

Die Evolution des Universums:
Vom Urknall zur komplexen Welt der Galaxien

KOSMOLOGIE

Gerhard Börner

- ▶ Urknall
- ▶ Hubble-Expansion
- ▶ Mikrowellenstrahlung
- ▶ Kosmologische Modelle
- ▶ Allgemeine Relativitätstheorie
- ▶ Elemententstehung
- ▶ Strukturbildung
- ▶ Sternentwicklung
- ▶ Dunkle Materie und Energie
- ▶ Schwarze Löcher
- ▶ Das inflationäre Universum



Die Bände der Reihe **FISCHER KOMPAKT** gliedern sich in vier Abschnitte. Der **GRUNDRISS** gibt eine bündige Gesamtdarstellung des Themas. Die **VERTIEFUNGEN** geben die Möglichkeit, verschiedene Facetten, die im Grundriss angesprochen werden, genauer kennen zu lernen. Das **GLOSSAR** erläutert zentrale Begriffe. Die **LITERATURHINWEISE** geben Empfehlungen für weitere Lektüren. Laufend aktualisierte Hinweise des Autors auf interessante Texte und Links sind im Internet zu finden unter www.fischer-kompakt.de/kosmologie

- S.105** Die Markierungen in der Marginalspalte, zusammen mit Hervorhebungen im Text, verweisen auf einen entsprechenden Abschnitt in den Vertiefungen.

Originalausgabe
Veröffentlicht im Fischer Taschenbuch Verlag,
einem Unternehmen der S. Fischer Verlag GmbH,
Frankfurt am Main, Oktober 2002
Gestaltungskonzept, Umschlagentwurf und Satz:
Wolff Kommunikation, Frankfurt am Main
Druck und Bindung: Clausen & Bosse, Leck
Printed in Germany
ISBN 3-596-15355-7

KOSMOLOGIE

GRUNDRISS

| | |
|--|-----------|
| Das expandierende Universum | 3 |
| Galaxien | 4 |
| Modellvorstellungen | 6 |
| Ein Zeitrafferbild | 7 |
| Die Ausdehnung des Weltalls..... | 9 |
| Das Hubble'sche Gesetz | 9 |
| Bestimmung der Hubble-Konstanten durch | |
| Cepheidenmessungen | 15 |
| Bestimmung der Hubble-Konstanten durch SNIa | 16 |
| Das Alter der Sterne | 19 |
| Kugelsternhaufen | 19 |
| Entwicklung der Sterne: Das Hertzsprung-Russell-Diagramm | 20 |
| Die Altersbestimmung..... | 24 |
| Die Wärmestrahlung des Universums | 25 |
| Die Kosmologischen Modelle | 28 |
| Mathematische Vereinfachungen | 28 |
| Der gekrümmte Raum..... | 31 |
| Rotverschiebung und zeitliche Entwicklung | 35 |
| Leuchtende und dunkle Kosmische Materie | 36 |
| Die leuchtende Materie | 36 |
| Dunkle Materie in Galaxien | 38 |
| Dunkle Materie in Galaxienhaufen | 38 |
| Die baryonische Materie | 40 |
| Nichtbaryonische dunkle Materie | 43 |
| Die kosmische Hintergrundstrahlung - CMB | 44 |
| Akustische Schwingungen im frühen Universum | 45 |
| Beobachtungen und kosmische Parameter..... | 48 |
| Dunkle Materie und dunkle Energie | 49 |
| Die Entstehung der Strukturen im Universum | 50 |
| Einige theoretische Überlegungen | 50 |
| Beobachtungen | 52 |

| | |
|--|-----------|
| Dunkle Halos und leuchtende Galaxien | 54 |
| Sterne und Elemente | 58 |
| Elementarteilchenphysik und Kosmologie..... | 59 |
| Die fundamentalen Kräfte | 59 |
| Baryonasymmetrie | 63 |
| Das Inflationäre Universum | 64 |
| Schwierigkeiten des Standardmodells | 64 |
| Das Inflationsmodell | 65 |
| Lösung der kosmologischen Rätsel..... | 70 |
| Chaotische Inflation | 70 |
| Kritische Anmerkungen..... | 71 |
| Weltentstehung | 73 |
| Die Möglichkeiten der Physik | 73 |
| Das anthropische Prinzip | 74 |
| Die Auswahl des Anfangszustands..... | 77 |
| Hawkings Vorschlag | 82 |
| Das Ende? | 84 |

VERTIEFUNGEN

| | |
|---|-----|
| Einheiten..... | 86 |
| Entfernungen..... | 87 |
| Elementarteilchen | 89 |
| Kosmologische Modelle | 94 |
| Allgemeine Relativitätstheorie..... | 97 |
| Die Gravitation..... | 101 |
| Masse und Energie | 104 |
| Schwarze Löcher und Raumzeitsingularität..... | 106 |
| Gleichgewicht..... | 112 |
| Das Vakuum | 113 |

ANHANG

| | |
|-------------------------|-----|
| Glossar | 119 |
| Literaturhinweise | 128 |

DAS EXPANDIERENDE UNIVERSUM

Zu allen Zeiten hat der Anblick des nächtlichen Himmels die Menschen fasziniert. Die Betrachtung der hellen Lichtpunkte der Sterne am schwarzen Firmament ist auch schon eine erste und einfache kosmologische Beobachtung. Warum ist der Himmel zwischen den Sternen dunkel? Wenn sich die Sterne gleichförmig und unveränderlich ohne Ende ins All erstrecken würden, so trüfe der Blick schließlich in jeder Richtung auf einen Stern und der ganze Himmel wäre so hell wie die Oberfläche der Sonne. Diese schlichte Tatsache heißt »Olbers'sches Paradoxon«, obwohl sie weder von Olbers stammt noch paradox ist.

Schon Johannes Kepler hatte 1610 bemerkt, dass die Dunkelheit des Nachthimmels einigen älteren Vorstellungen vom Weltenbau, insbesondere dem Weltbild Giordano Brunos, widerspricht. Später wurde seine Überlegung mehrfach wiederholt, auch 1823 von dem Bremer Arzt und Astronomen Heinrich Wilhelm Olbers. Interessanterweise wurde aber zu Anfang des 20. Jahrhunderts dieses Argument nicht beachtet. Damals glaubten alle Astronomen an eine statische Welt. Selbst Albert Einstein versuchte zunächst aus seiner Theorie ein derartiges Modell abzuleiten.

Wir wissen heute, dass die Welt nicht statisch ist, dass alle Sterne vor endlicher Zeit entstanden sind und wieder vergehen. Deshalb trifft unser Blick in vielen Richtungen nicht auf einen Stern und der Nachthimmel erscheint dunkel.

In dunklen Nächten, weitab von der Lichterfülle der Städte, können wir das helle Band der Milchstraße sehen, wie es sich über den Himmel zieht - Milliarden von Sternen, die alle ihre Energie verströmen. Eigentlich können wir mit dem bloßen Auge, dem »unbewaffneten« Auge, wie sich militante Astronomen ausdrücken, nur etwa tausend

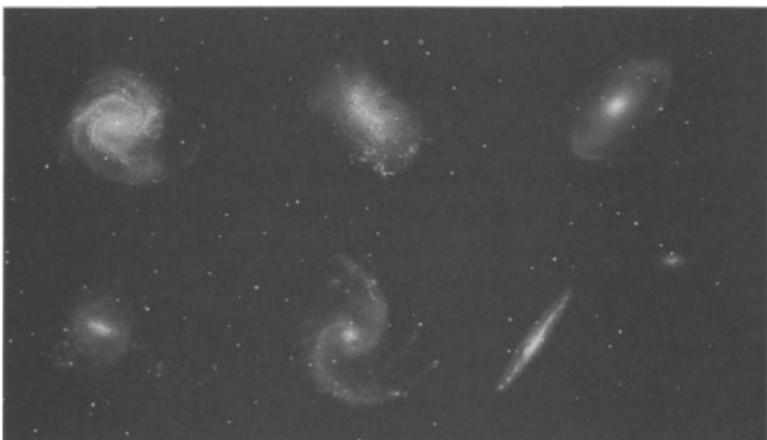


Abb.1: Einige Spiralgalaxien, die unterschiedlich zur Blickrichtung orientiert sind, erscheinen als Scheibe oder nur als leuchtende Kante.

unserer nächsten Sternnachbarn sehen. Aber bewaffnet mit einem Teleskop erkennen wir mehr und wir sehen auch, dass es neben der Milchstraße viele verschwommene Lichtflecken am Himmel gibt, die sich bei näherem Hinsehen als Sternsysteme wie unsere Milchstraße, als »Galaxien«, zeigen.

Galaxien

Die Galaxien - riesige Systeme aus Sternen, Gas und Staub - sind die Bausteine des Universums, zumindest des Teils, der unserer Beobachtung zugänglich ist (Abb. 1). Im Reich der Galaxien wurden für unser Weltbild entscheidende Entdeckungen gemacht. Unsere Milchstraße besteht aus etwa 100 Milliarden Sternen und erstreckt sich über riesige Distanzen. Die Astronomen verwenden als Messlatte nicht mehr das Meter, sondern die Laufzeit des Lichts: Von der Sonne zur Erde braucht das Licht 8 Minuten. Diese Entfernung von 144 Millionen Kilometern entspricht also dem Entfernungsmesser von

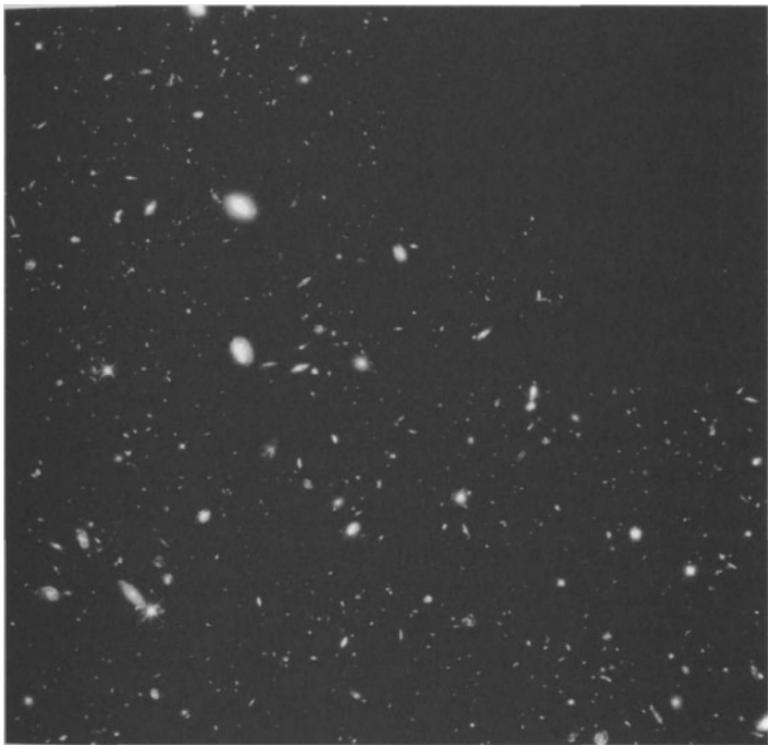


Abb.2: Ein winziger Ausschnitt (etwa eine Bogenminute zum Quadrat, d.h. 25 Milliardstel) des Himmels, den das Weltraumteleskop Hubble (kurz HST) 10 Tage lang beobachtete, um auch noch die lichtschwächsten Galaxien zu finden.

8 Lichtminuten. Um ein Sternensystem wie unsere Milchstraße zu durchqueren, braucht das Licht etwa 100 000 Jahre. Im Schnitt sind Galaxien etwa eine Million Lichtjahre voneinander entfernt. Ausgehend von Beobachtungen wie der in Abb.2 gezeigten Aufnahme des Weltraumteleskops Hubble, kommen die Astronomen zu der Vermutung, dass der beobachtbare Bereich etwa zehn Milliarden Galaxien enthält. Jede einzelne Galaxie mit ihren Milliarden von Sternen ist für sich ein interessantes System, doch in der Erforschung des Kos-

mos wird sie wie ein Testteilchen betrachtet, das nur dazu dient, gewisse, vielleicht vorhandene, globale Eigenschaften aufzuzeigen.

Das moderne Bild vom Kosmos ruht im Wesentlichen auf zwei fundamentalen Beobachtungen, der Entdeckung des amerikanischen Astronomen Edwin P. Hubble, dass sich fast alle fernen Galaxien von uns weg bewegen, und der Messung eines kosmischen Strahlungsfeldes im Mikrowellenbereich durch Arno Penzias und Robert Wilson im Jahre 1964. Die Entdeckung Hubbles im Jahr 1929 veränderte das Bild der Welt dramatisch: Die Vorstellung einer gleichmäßigen, unveränderlichen Verteilung von Sternen bis in unendliche Tiefen musste aufgegeben werden zugunsten des Konzepts eines Universums der Entwicklung und Veränderung, wie es das auseinander fliegende, expandierende System der Galaxien darstellt.

Die astronomischen Beobachtungen dieser Expansion führen zur Bestimmung einer charakteristischen Zeitspanne von 15 Milliarden Jahren. Vor 15 Milliarden Jahren waren die auseinander fliegenden Galaxien dicht beisammen. Die Temperatur der kosmischen Mikrowellenstrahlung, die jetzt etwa 2,7 Kelvin beträgt, war in der Vergangenheit im weniger ausgedehnten Kosmos höher. Diese beiden fundamentalen Beobachtungen führen nahezu zwangsläufig zu dem Schluss, dass es einen heißen dichten Frühzustand des Universums gegeben hat, in dem die Galaxien und Sterne, die wir jetzt sehen, in einem nur wenig strukturierten, heißen und dichten Gemisch aus Strahlung und Materie aufgelöst waren.

Modellvorstellungen

Das expandierende Universum lässt sich in mathematischen Modellen beschreiben, die sich als einfache Lösungen der Einstein'schen Gravitationstheorie ergeben. Es gibt eine ganze Reihe von Modellen, die im Einklang mit den astronomischen Messungen sind. Trotzdem sprechen die Astronomen von einem »Standard-Urknallmodell«, im

Sinne einiger typischer Eigenschaften, die alle diese Modelle gemeinsam haben: Das Universum hat sich nach einer explosionsartig schnellen Ausdehnung zu Anfang durch eine heiße und dichte Frühphase zum gegenwärtigen Zustand entwickelt. Es sieht in jedem Punkt und in allen Richtungen gleich aus, abgesehen von Unregelmäßigkeiten auf kleinen Skalen. Galaxien und Galaxienhaufen haben sich aus anfänglich kleinen Dichteschwankungen durch die Wirkung der Schwerkraft gebildet. Die Keime dieser Schwankungen sind auch als Unregelmäßigkeiten der kosmischen Mikrowellenstrahlung vorhanden, so wie sie etwa 400000 Jahre nach dem Urknall der Strahlung und Materie eingeprägt waren.

Neueste Messungen an Supernovae, explodierenden Sternen in fernen Galaxien, erbrachten zusätzlich den Hinweis, dass die Expansion gegenwärtig sogar beschleunigt verläuft, angetrieben von einer kosmischen Abstoßung, einer positiven »kosmologischen Konstanten«. Dies bedeutet, dass die Ausdehnung des Weltalls unumkehrbar für alle Zeit weitergehen wird.

Im Standardmodell beginnt das Universum mit einer Urexpllosion von unendlicher Dichte, Temperatur und unendlich großem Anfangsschwung. Diese Anfangssingularität entzieht sich einer Beschreibung mit den Begriffen und Gesetzen der uns bekannten Theorien. Der Urknall ereignete sich nicht an einem bestimmten Punkt, sondern überall. Doch kurz nach dem Urknall, etwa 1 Sekunde später, gilt wohlbekannte Physik, und das weitere Verhalten des Universums lässt sich in einem konsistenten Standardmodell beschreiben.

Hier sei noch ein Zeitrafferbild geschildert, das die zeitliche Entwicklung des Kosmos veranschaulichen soll:

Ein Zeitrafferbild

Drängen wir die Geschichte des Universums auf ein Jahr zusammen. Jeder Monat in diesem Bild entspricht in Wirklichkeit einer Milliarde

Jahre. Stellen wir uns vor, mit dem Glockenschlag zum neuen Jahr entstehe auch unsere Welt im Urknall. Der Urstoff, eine Strahlung, die den ganzen Raum gleichmäßig und mit ungeheurer Dichte und Temperatur erfüllte, besaß noch keine Struktur, aber durch den Schwung der geheimnisvollen Urexpllosion dehnte er sich überall gegen seine eigene Schwerkraft aus und kühlte sich dabei ab. Schon in einem winzigen Bruchteil der ersten Sekunde des ersten Januar entstand die Materie: die Elementarteilchen und gleich darauf die einfachsten Atomkerne, Wasserstoff und Helium. Noch vor Ende Januar entkoppelten Strahlung und Materie und die Galaxien bildeten sich. Die ersten Sternengenerationen in den Galaxien erzeugten in ihrem Inneren die höheren chemischen Elemente und schleuderten sie - zum Teil in Staubform - bei ihrer Explosion in das umgebende Gas. Kohlenstoff entstand sehr häufig, und auf Staubkörnern in der Nähe von Sternen formten sich komplizierte organische Moleküle, die heute durch radioastronomische Beobachtungen nachweisbar sind. Mitte August ging aus einer zusammenstürzenden Wolke von Gas und Staub unser Sonnensystem hervor. Schon nach einem Tag war die Sonne in ihrem heutigen Zustand und versorgte ihre Planeten mit einem ziemlich konstanten Strahlungsstrom mit einer Temperatur von etwa 6000 Grad. Da der übrige Himmel dunkel und kalt war, konnte die Erde die zugestrahlte Energie bei viel tieferer Temperatur wieder abstrahlen. So erschienen auf der Erde zuerst komplizierte chemische, dann biologische Strukturen. Von Mitte September stammen die ältesten Gesteine der Erdoberfläche, und in ihnen finden sich offenbar schon die ersten Spuren von Leben: fossile Einzeller. Bereits von Anfang Oktober stammen fossile Algen, und im Laufe von zwei Monaten entstand nun zunächst in den Gewässern eine ungeheure Vielfalt von Pflanzen und Tierarten. Die ersten Wirbeltierfossilien datieren wir auf den 16. Dezember. Am 19.12. besiedelten die Pflanzen die Kontinente. Am 20.12. waren die Landmassen mit Wald bedeckt, das Leben schuf sich selbst eine Sauerstoff reiche Atmo-

sphäre, die das ultraviolette Licht zurückhielt und somit noch komplexere und empfindlichere Formen des Lebens ermöglichte. Am 22. und 23. Dezember entstanden aus Fischen amphibische Vierfüßler und eroberten feuchtes Land. Aus ihnen entwickelten sich am 24. Dezember die Reptilien, die auch das trockene Land besiedelten. Am 25.12. erschienen die ersten Säugetiere. In der Nacht zum 30.12. begann die Auffaltung der Alpen. In der Nacht zum 31.12. entsprang der Menschenzweig dem Ast, von dem ein weiterer Zweig zu den heutigen Menschenaffen führt. Mit etwa 20 Generationen pro Sekunde begann nun der Mensch seine Entwicklung. Fünf Minuten vor zwölf lebten die Neanderthalen, 15 Sekunden vor zwölf wurde Jesus Christus geboren, eine halbe Sekunde vor zwölf begann das technische Zeitalter. Schon sind wir im neuen Jahr.

DIE AUSDEHNUNG DES WELTALLS

Das Hubble'sche Gesetz

Hubble hatte mit dem neuen 2,5 m Teleskop auf dem Mt. Wilson in den Jahren 1923 und 1925 so genannte Cepheiden in verschiedenen »Nebelflecken« (wie M31 und M33) entdeckt. Diese Cepheidensterne können zur Messung kosmischer **Entfernungen** benutzt werden, denn sie verändern ihre Helligkeit rhythmisch, d.h. sie pulsieren mit einer Periode von einigen Stunden bis zu Tagen. Man weiß: Je langsamer sie pulsieren, desto größer ist ihre Leuchtkraft. Die auf der Erde gemessene Helligkeit des Sterns ist die Leuchtkraft geteilt durch das Quadrat der Entfernung. Da Cepheiden mit derselben Pulsperiode dieselbe Leuchtkraft haben, kann man aus der Messung ihrer Helligkeit ihre Entfernung bestimmen, falls man einige Kandidaten mit genauer Entfernung kennt, um die Beziehung festzulegen - zu eichen, wie die Astronomen sagen.

S.87

Hubble fand, dass die »Nebelflecke« weit entfernt von unserer Milchstraße sind und als eigenständige Galaxien angesehen werden müssen. Damit war die lange währende Debatte um die Natur der Nebelflecken entschieden: Bereits zu Ende des 18. Jahrhunderts hatten William und John Herschel Tausende von nicht sternförmigen, d.h. nicht punktartigen, leuchtenden Objekten katalogisiert. Schon damals wurde gelegentlich die Vermutung geäußert, solche »Nebel« seien Systeme wie unsere Milchstraße, nur in sehr großer Entfernung. Schließlich wurde aufgrund von Hubbles Arbeiten diese Hypothese allgemein akzeptiert.

Noch aufregender aber war Hubbles Entdeckung der Verschiebung der Spektrallinien. Er zerlegte das Licht, das von den Galaxien kam, mit einem Prisma oder Beugungsgitter in seine Grundfarben und fand, dass, wie bei der Strahlung eines leuchtenden Gases im Labor, nicht alle Farben des Regenbogens vorkamen, sondern nur einige klare Farben, die von dunklen Bereichen unterbrochen waren. Diese Strahlung ist der Fingerabdruck eines Elementes, nach dem es identifiziert werden kann. Hubble konnte seine Beobachtungen erst dann bestimmten Elementen, wie Wasserstoff oder Helium zuordnen, wenn er das System der Linien einer Galaxie um einen für diese Galaxie charakteristischen Betrag verschob. Präzise Messungen im Labor zeigten, dass die Bewegung der Licht aussendenden Materie eine derartige Verschiebung bewirkt: Die inneren Abstände der Linien im Spektrum bleiben erhalten, nur das Muster insgesamt wird zu kürzeren oder längeren Wellenlängen verschoben, je nachdem, ob die Lichtquelle sich nähert oder entfernt. Die Astronomen sprechen von einer Rotverschiebung bei einer Verschiebung zu längeren Wellenlängen, von einer Blauverschiebung, falls das Muster zu kürzeren Wellenlängen hin versetzt ist. Doch nicht nur die »Dopplerverschiebung« (benannt nach ihrem Entdecker Christian Doppler) aufgrund der Bewegung, auch die Schwerkraft selbst kann zu einer Rotverschiebung führen. Wie wir später sehen werden, sind bei kosmischen

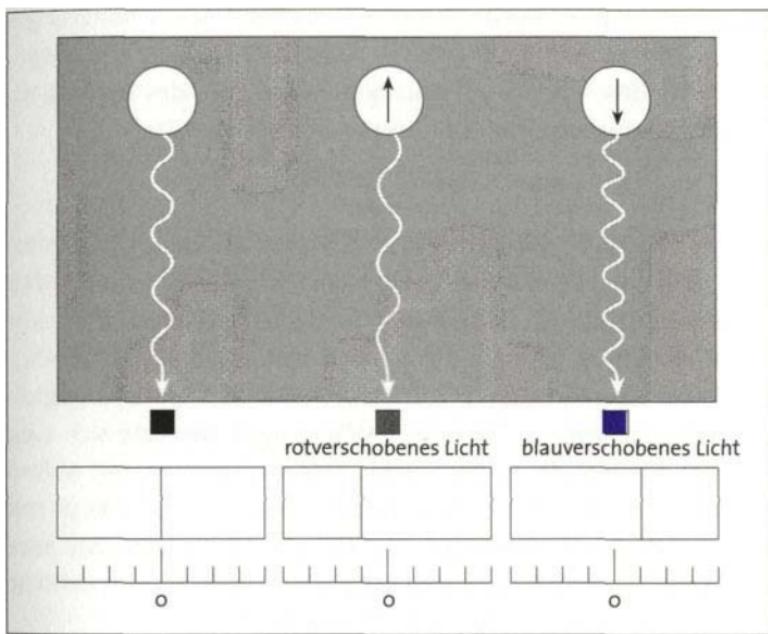


Abb.3: Der Dopplereffekt: Die Bewegung einer Lichtquelle vom Beobachter weg (oder auf ihn zu) führt zu einer Verschiebung der beobachteten Wellenlängen.

Rotverschiebungen stets Doppler- und Gravitationseffekt miteinander vermischt.

Die Dopplerverschiebung lässt sich leicht plausibel machen: Man kann sich die Emission als eine Folge von Pulsen vorstellen, die mit einer bestimmten Zahl pro Sekunde N_{emission} ausgesandt werden. Dieses Bild entspricht dem Charakter der elektromagnetischen Strahlung als einer periodischen Schwingung, wobei die Pulse z.B. den Maxima der Schwingung entsprechen könnten. Die Ausbreitung geschieht mit konstanter Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit c . Falls sich das strahlende Atom vom Beobachter weg bewegt, müssen die später ausgesandten Pulse einen ständig wachsenden Weg zurücklegen. Deshalb werden weniger Pulse pro Sekunde $N_{\text{beobachtet}}$

registriert, als pro Sekunde ausgesandt wurden N_{emission} - Näherungsweise kann die Verringerung durch $N_{\text{emission}} = N_{\text{emission}} (1 + \frac{v}{c})$ ausgedrückt werden, wobei v die Fluchtgeschwindigkeit des Senders ist. Die Rotverschiebung z wird definiert durch das Verhältnis

$$z \equiv \frac{N_{\text{emission}} - N_{\text{beobachtet}}}{N_{\text{beobachtet}}} = \frac{v}{c}.$$

Von 1912 bis 1915 entwickelte Vesto M. Slipher am Lowell Observatory Verfahren, die es ihm erlaubten, die Dopplergeschwindigkeiten von etwa 40 Galaxien zu messen. Er fand überraschenderweise sehr große Werte, fast bis zu 200 km/s, weit mehr als die Geschwindigkeiten der Sterne in unserer Milchstraße. Fast alle Spektren zeigten eine Rotverschiebung. Die beobachtete Galaxie bewegte sich weg von der Milchstraße. Edwin Hubble setzte zusammen mit Milton Humason am Mt. Wilson diese Arbeiten fort und kombinierte sie mit seinen Entfernungsmessungen der Galaxien. So glückte ihm eine fundamentale Entdeckung: Jede Galaxie zeigt eine Proportionalität zwischen Rotverschiebung z und Entfernung d

$$cz = H_0 d$$

(c ist die Lichtgeschwindigkeit, cz die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxie).

Diese Beziehung wird als »Hubble-Gesetz« bezeichnet, und die Zahl H_0 , die das Verhältnis von Rotverschiebung und Entfernung angibt, wird »Hubble-Konstante« genannt. Schon Hubble selbst schloss aus seiner Entdeckung, dass die Dopplerverschiebung der Wellenlängen, wie sie bei einer bewegten Quelle auftritt, die Phänomene erkläre, und dass folglich die Galaxien sich von uns weg bewegen mit der Fluchtgeschwindigkeit $v = cz$ proportional zur Entfernung. Falls die Expansionsgeschwindigkeit der Galaxien stets konstant war, dann entspricht die Zeit, die nötig war, damit eine Galaxie jetzt von unserer Milchstraße den Abstand d erreichte, genau dieser Entfernung, geteilt durch die Geschwindigkeit. Bei einer Geschwindigkeit,

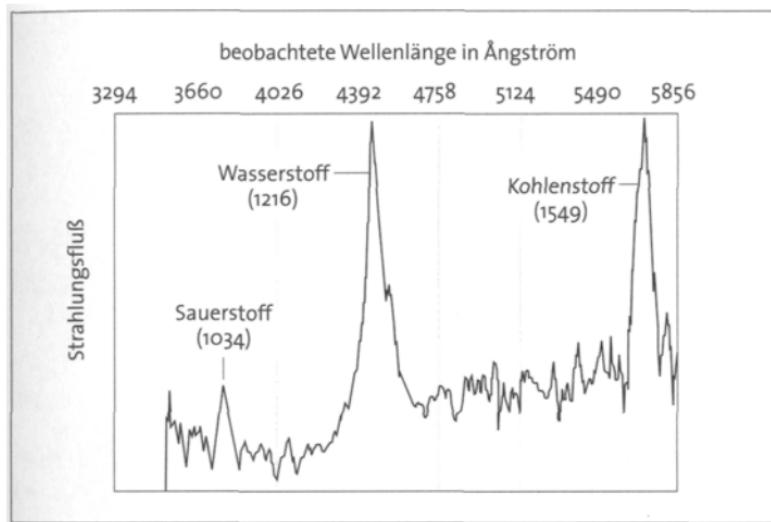


Abb.4: Das Spektrum eines Quasars, einer energiereichen Strahlungsquelle, mit der hohen Rotverschiebung von $z = 2,66$. Die beobachtete Wellenlänge ist in Ångström (Einheiten von 10^{-8} cm) angegeben. Bei den Spektrallinien der Elemente Sauerstoff, Wasserstoff, Kohlenstoff steht in Klammern die Ruhewellenlänge.

die dem Abstand proportional ist, ist diese Zeit dann für alle Galaxien gleich $\frac{d}{v} = \frac{1}{H_0}$: für den gemessenen Wert von H_0 etwa 15 Milliarden Jahre. Dieses »Alter«, d.h. die charakteristische Expansionszeit der Galaxien, ist nicht exakt das wirkliche Alter des Universums, da die Galaxien sich nicht immer mit der gleichen Geschwindigkeit bewegt haben, aber es ist auch klar, dass sich in Zeiträumen von dieser Größenordnung die Welt entscheidend verändert hat. Die Strecke, die das Licht in dieser Zeit zurücklegen konnte, $\frac{c}{H_0}$, liefert auch ein Maß für die Ausdehnung der beobachtbaren Welt.

Natürlich haben die Astronomen den Ehrgeiz, solch eine wichtige Größe wie die Hubble-Konstante so genau wie möglich zu messen. Der Wert, der von Hubble ursprünglich errechnet wurde, stand im Widerspruch zu Altersbestimmungen von Gesteinen auf der Erde.

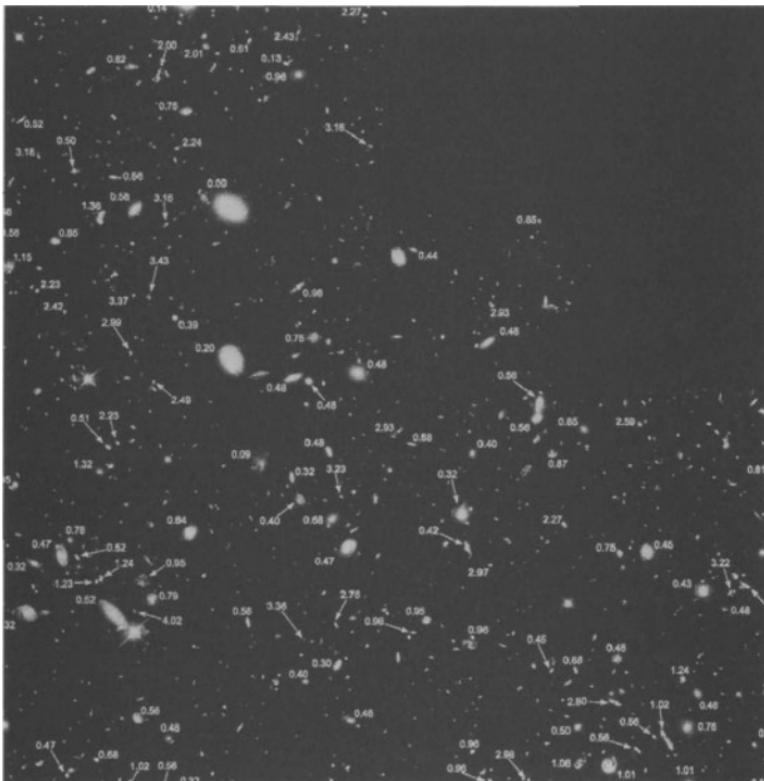


Abb.5: Für einige Galaxien der Langzeit-HST-Beobachtung sind auf dem Bild die Rotverschiebungen eingetragen. Für diese schwach leuchtenden Galaxien ist die Rotverschiebung nicht leicht zu messen. Daher sind viele noch ohne Messwert.

Verbesserte Messungen und besonders die Neueichung der Cepheiden durch Baade (1952) brachten schließlich den Wert in den Bereich von 50 bis 100 - in den **Einheiten**, in denen Astronomen gerne die Hubble-Konstante angeben, nämlich als Geschwindigkeit (in Kilometern pro Sekunde) pro Megaparsec. Ein Megaparsec (Mpc) sind etwa drei Millionen Lichtjahre. Diese Wahl der Einheiten ist auch ganz einleuchtend: Eine Galaxie in einer Entfernung von einem Mpc be-

Bestimmung der Hubble-Konstanten durch Cepheidenmessungen

wegt sich mit einer Geschwindigkeit von 50 bis 100 km pro Sekunde von uns weg.

Im Prinzip würde es genügen, die Entfernung und die Rotverschiebung einer einzigen Galaxie zu bestimmen, um den Wert von H_0 zu erhalten. In der Praxis ist die Angelegenheit wesentlich komplexer: Man kann ziemlich sicher sein, dass ein einzelnes Objekt nicht exakt der Hubble-Expansion folgt. Alle Galaxien weisen auch zufällige Eigenbewegungen auf von einigen 100 km s^{-1} (M31 zeigt sogar eine Blauverschiebung), denn sie sind zumeist in größeren Strukturen eingebunden, deren Gravitationsfeld ihre Bewegung beeinflusst.

Bestimmung der Hubble-Konstanten durch Cepheidenmessungen

Die Hubble-Konstante präzise zu messen ist schwierig, denn alle Galaxien weisen zufällige Eigenbewegungen auf. Dies wirkt sich besonders für nahe Objekte aus, während bei weit entfernten Galaxien die Expansionsbewegung völlig überwiegt. Bei diesen allerdings sind die Entfernungsbestimmungen sehr ungenau. Dies ist wohl der Grund dafür, dass viele Jahre hindurch die Beobachter in zwei konkurrierende Lager gespalten waren, die jeweils für eine große Entfernungsskala ($H_0 \approx 50$) oder für eine kleine ($H_0 \approx 100$) votierten. Dies geht zurück auf die historische Diskrepanz zwischen Sandage und Tammann, die für $H_0=50$ plädierten, und de Vaucouleurs ($H_0=100$). Beide Resultate wurden üblicherweise mit sehr kleinen Fehlern angegeben (kleiner als 10%).

Man erwartete, dass die Situation sich entscheidend verbessern würde, wenn durch neue Teleskope, speziell durch das Weltraumteleskop »Hubble«, Cepheidensterne bis zu Entfernungen von 20 Mpc beobachtbar würden, somit bis zum Zentrum des Virgohaufens der Galaxien. In den Randbereichen dieses großen Systems aus Tausenden von Galaxien befindet sich auch unsere Milchstraße. Leider hat

sich nun herausgestellt, dass der Virgothaufen ein relativ komplex strukturiertes Gebilde ist, dessen Massenschwerpunkt entsprechend unsicher bestimmt ist. Da wir nicht genau wissen, wo die vermessenen Galaxien relativ zum Schwerpunkt liegen, müssen wir einen relativ großen systematischen Fehler in der Entfernung zu Virgo akzeptieren, 17 Mpc mit einer Unsicherheit von etwa 3 Mpc. Dies führt schließlich zu einem Wert von H_0 von

$$H_0 = 80 \pm 22.$$

Dieser Wertebereich ist natürlich nach wie vor recht ausgedehnt, diesmal aber bedingt durch die Beobachtungssituation. Es scheint, als wäre die Vermessung des Virgothaufens nicht der geeignete Weg, um H_0 mit hoher Genauigkeit zu bestimmen.

Bestimmung der Hubble-Konstanten durch SNIa

Eine Methode, die wesentlich größere Entfernungen erreicht, macht sich die riesige Leuchtkraft bestimmter Typen von Sternexplosionen zu Nutze, der Supernovae vom Typ 1a. Im Spektrum dieser explodierenden Sterne findet man keine Linien des Wasserstoffs, nur Hinweise auf höhere Elemente wie Helium und Kohlenstoff. Der Stern, der seine Existenz auf diese Weise beendet, hat wahrscheinlich schon eine lange Entwicklungszeit hinter sich. Sein Wasserstoffvorrat ist verbraucht und er besteht im Wesentlichen aus Helium und Kohlenstoff. Vermutlich handelt es sich um einen Weißen Zwerg, d.h. einen kompakten Stern mit dem Radius der Erde und der Masse der Sonne. In der Explosion wird radioaktives Nickel erzeugt, dessen Zerfall die Energie für die Leuchterscheinung liefert. Die Leuchtkraft dieser Supernovae steigt rasch an, erreicht innerhalb einiger Stunden ein Maximum und fällt dann wieder ab. Im Maximum ist die Leuchtkraft für verschiedene Supernovae fast die gleiche und deshalb sind diese Quellen gute Entfernungsindikatoren. Mit der Supernova-Methode

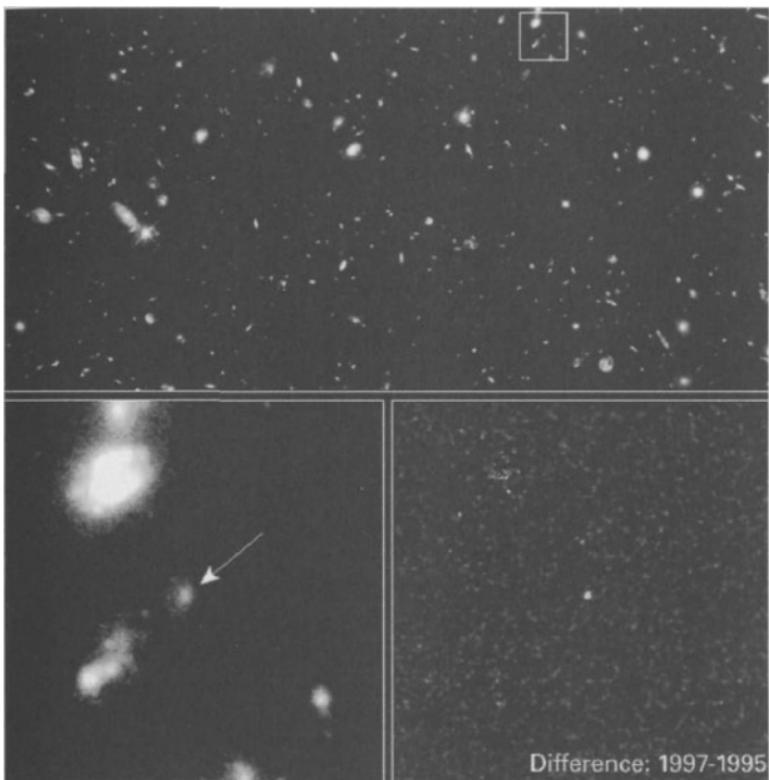


Abb.6: Diese Aufnahme mit dem HST zeigt eine ferne Supernova vom Typ 1a. Im vergrößerten Insert ist einmal die Supernova mit anderen Objekten, einmal nach Abziehen der beständigen Leuchterscheinungen, der Lichtpunkt der Supernova alleine zu sehen.

gelang es, die Sprossen der Entfernsleiter zu überspringen und direkt Messpunkte jenseits des Virgothaufens zu erhalten.

Da die Rotverschiebungen der bisher beobachteten Supernovae vom Typ 1a bis zum Wert 1 reichen, ist man hier zu Entfernungen vorgestoßen, bei denen lokale Geschwindigkeitsfelder keine Rolle mehr spielen. Man versucht im Augenblick eine möglichst gute Eichung dieser Methode, indem man durch Cepheidensterne die Distanz zu

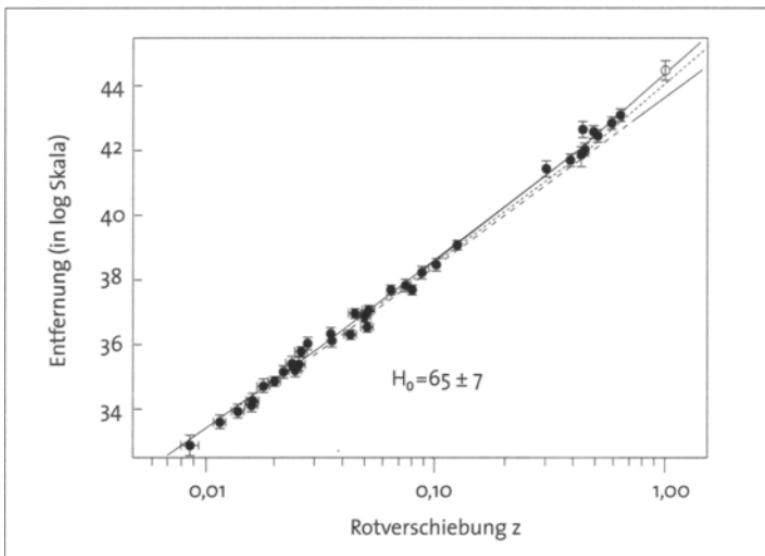


Abb.7: Die Hubble'sche Beziehung für Supernovae vom Typ 1a. Die Entfernung (in einem logarithmischen, ehrwürdigen und Astronomen wohlvertrauten Maßstab - dem so genannten Entfernungsmodul) ist gegenüber der Rotverschiebung aufgetragen. Die Messpunkte liegen sehr genau auf einer Geraden. Hieraus kann man die Hubble-Konstante bestimmen.

möglichst vielen Galaxien feststellt, in denen Typ 1a Supernovae registriert wurden.

In den letzten Jahren ist es gelungen, Typ 1a Supernova systematisch bis zu sehr großen Entfernungen aufzuspüren und den raschen Anstieg ihrer Helligkeit, wie auch den typischen Abfall nach dem Maximum zu vermessen. Diese Unternehmung erforderte die Zusammenarbeit vieler Beobachtungsstationen weltweit, denn es ist notwendig, jede Supernova sofort nach ihrer Entdeckung mit einem großen Teleskop genau zu beobachten.

Es stellte sich heraus, dass diese Sternexplosionen noch besser zur Entfernungsmessung geeignet sind, als man zunächst dachte. Die Supernovae zeigen nach dem Maximum ihrer Lichtkurve einen Ab-

fall der Intensität, dessen Verlauf ganz eng mit der maximalen Leuchtkraft verknüpft ist. So wird es möglich, individuelle Unterschiede in der Leuchtkraft bei den verschiedenen Supernovae zu korrigieren und sehr exakt die Entfernung zu bestimmen. Abb. 7 zeigt ein Diagramm, in dem die Rotverschiebung derartiger Supernovae und ihre Entfernung aufgetragen sind. Es ergibt sich eine nahezu perfekte Hubble-Relation, und die Hubble-Konstante kann mit einer Genauigkeit von etwa 10% abgelesen werden:

$$H_0 = (65 \pm 7).$$

Die Messungen der Hubble-Konstanten mit verschiedenen Methoden stimmen im Rahmen der Messfehler überein. Der Kehrwert der Konstanten H_0^{-1} ist eine für die Ausdehnung des Weltalls charakteristische Zeit. Vor dieser Zeit von 15 Milliarden Jahren begann die heute beobachtete Expansion. Das Universum muss damals wesentlich anders als heute ausgesehen haben, denn alle Galaxien, die wir jetzt beobachten, waren damals an einem Raumpunkt.

DAS ALTER DER STERNE

Kugelsternhaufen

Schon mit einem kleinen Fernrohr kann man in unserer Milchstraße verschiedene Sternhaufen erkennen. Neben den weniger konzentrierten offenen Sternhaufen findet man gewaltige Zusammenballungen von Sternen, die als rundliche Nebelflecke mit einer zentralen Verdichtung erscheinen. Die klassischen Positions-kataloge von Messier (1784; M) sowie von Dreyer (1890; NGC) enthalten bereits eine Vielzahl derartiger Sternassoziationen. Heute kennt man in unserer Galaxie etwa 650 offene Haufen (darunter die Hyaden und die Plejaden), von denen der einzelne zwischen 20 und 1000 Sterne enthält,

sowie etwa 130 Kugelsternhaufen mit 10^5 bis 10^7 Mitgliedern. Auch in benachbarten Galaxien (M31-Andromeda, LMC) wurden Kugelsternhaufen katalogisiert.

Die Kugelsternhaufen in unserer Milchstraße folgen in ihrer Verteilung nicht der Scheibenstruktur, sondern stehen um die Scheiben-ebene in einer sphärischen Halo mit etwa 100000 Lichtjahren Durchmesser, etwas abgeplattet zur Scheibenebene hin. Dies passt gut zu Vorstellungen, nach denen unsere Milchstraße aus dem Zusammensturz eines ungefähr kugelförmigen, rotierenden Urnebels entstand. Wegen des vorhandenen Drehimpulses bildete sich beim Kollaps die wohlbekannte galaktische Scheibe aus. Doch bevor noch der Kollaps stark von der sphärischen Symmetrie abwich, können sich schon - sehr frühzeitig - die Kugelsternhaufen herauskondensiert haben. Somit sollten die Kugelhaufen, als »Halopopulation«, älter sein als die Sterne, die in der galaktischen Scheibe entstanden sind. Es gibt auch andere Überlegungen, die klar zeigen, dass die Kugelsternhaufen die ältesten Systeme in unserer Galaxis sind. Sie bestehen aus Sternen, die nicht sehr massereich sind und also auch sehr sparsam mit ihrem Wasserstoffvorrat umgehen.

Entwicklung der Sterne: Das Hertzsprung-Russell-Diagramm

Die Helligkeit und die Farbe eines Sterns sind zwei charakteristische Merkmale, die mit physikalischen Größen eng zusammenhängen. Falls die Entfernung des Sterns bekannt ist, lässt sich aus der gemessenen Helligkeit die absolute Helligkeit oder die Leuchtkraft, d.h. die ausgestrahlte Energie bestimmen. Die Astronomen verwenden für die Helligkeitsbestimmung gerne eine logarithmische Skala, deren

Abb.8: Dieses Bild des Kugelsternhaufens M15, der zu unserer Milchstraße gehört, verdeutlicht die dichte Ansammlung vieler Sterne in diesen Systemen.

Entwicklung der Sterne: Das Hertzsprung-Russell-Diagramm



Ursprünge auf den griechischen Astronomen Hipparchos zurückgehen. Die Farbe eines Sterns zeigt an, welche Temperatur die Oberfläche hat. Es gibt verschiedene quantitative Farbskalen, die in der Astronomie verwendet werden.

Falls man nun die Sterne in einem Diagramm anordnet, in dem man, so wie E. J. Hertzsprung und H. N. Russell dies zu Anfang des 20. Jahrhunderts taten, den Farbindex gegen die absolute Helligkeit aufrätzt, so erhält man das »Hertzsprung-Russell-Diagramm« und findet, dass die Sterne nicht ungeordnet nach diesen Größen verteilt sind, sondern dass Gesetzmäßigkeiten bestehen: Die Mehrzahl der Sterne liegt auf einer Linie, die das Diagramm diagonal durchzieht und die als Hauptreihe bezeichnet wird. Auch die Sonne ist solch ein Hauptreihenstern. In Abb.9 ist das H.-R.-Diagramm für einen Kugelsternhaufen gezeigt. Wir sehen, dass die Sternverteilung nicht beliebig weit der Hauptreihe folgt (von rechts unten nach links oben, d.h. von kleiner Leuchtkraft, niedriger Oberflächentemperatur, zu hoher Leuchtkraft, hoher Oberflächentemperatur), sondern irgendwann nach rechts abbiegt. Oberhalb einer bestimmten Temperatur enthalten die Sternhaufen also keine Hauptreihensterne mehr, sondern die Sterne höherer Leuchtkraft bevölkern einen quer zur Hauptreihe nach rechts oben ziehenden Ast. Sie strahlen röthliches Licht aus und ihre Radien betragen das 100- bis 10^4 fache des Sonnenradius. Sie werden »Rote Riesen« genannt.

Aus der Theorie der Sternentwicklung kennen wir die physikalischen Ursachen der verschiedenen Äste im H.-R.-Diagramm: Die Sterne auf der Hauptreihe beziehen ihre Energie aus dem Fusionsprozess, bei dem im Zentralgebiet des Sterns Wasserstoff- zu Heliumkernen verschmolzen werden. Die äußeren Schichten des Sterns werden durch diese Energieproduktion im Inneren praktisch nicht verändert, und viele Milliarden Jahre behält er friedlich seinen Platz auf der Hauptreihe - als gigantischer Fusionsreaktor, der auch die radioaktiven Abfälle sicher lagert.

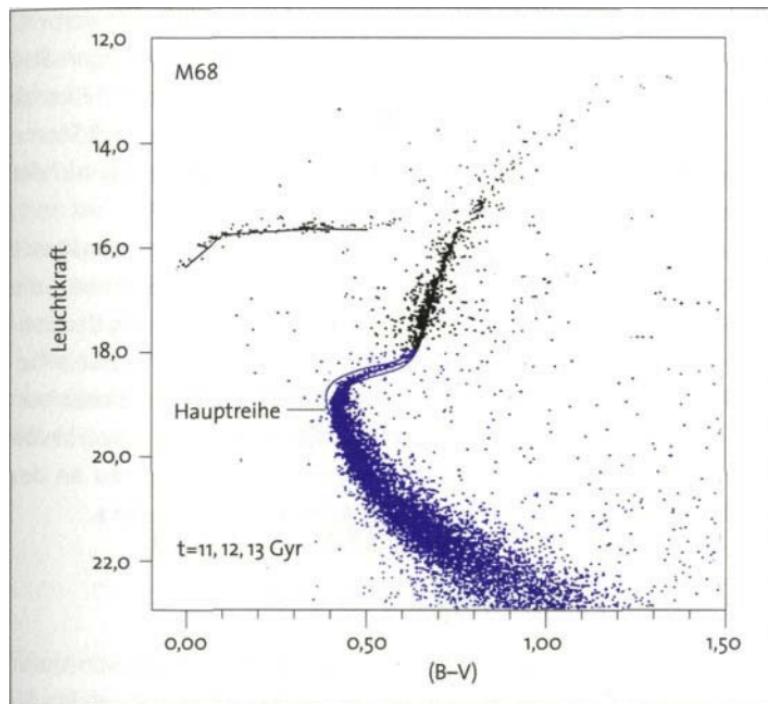


Abb.9: Die Leuchtkraft und Farbe der Sterne im Kugelsternhaufen M68 illustriert die Existenz der Hauptreihe und des Roten-Riesen-Stadiums. Der Abbiegepunkt der Hauptreihe führt zur Altersbestimmung von 12 Milliarden Jahren.

Sobald aber etwa 10% des Wasserstoffs verbraucht sind, ändert sich die Situation. Um das mit Helium angereicherte Zentrum bildet sich eine Kugelschale, in der Wasserstoff verbrannt wird. Der Stern findet eine neue Gleichgewichtskonfiguration, indem er seine äußere Hülle weit aufbläht - er wird zu einem Roten Riesen und verlässt die Hauptreihe. Die Zeit, die ein Stern auf der Hauptreihe verbringt, ist bestimmt durch das Verhältnis der in Fusionsreaktionen erzeugten Energie zur Leuchtkraft. Die Zeit auf der Hauptreihe nimmt mit dem Quadrat der Masse ab.

Während die Sonne 10 Milliarden Jahre auf der Hauptreihe verbringen wird - die Hälfte dieser Zeit ist schon verflossen -, biegen also sehr massereiche Sterne wesentlich früher von der Hauptreihe ab ($t \approx 10^8$ Jahre für $M = 10M_\odot$; M_\odot steht für die Masse der Sonne), Sterne mit geringerer Masse als die Sonne bleiben dagegen länger auf der Hauptreihe ($t = 8 \times 10^{10}$ Jahre für $M = \frac{1}{2} M_\odot$).

In den Kugelsternhaufen findet man nun Rote Riesen ebenso wie Hauptreihensterne. Es ist klar, dass in derart dichten Systemen - die Sterndichte ist 10- bis 100-mal größer als in der Umgebung der Sonne - alle Sterne zur gleichen Zeit entstanden sind. Die masseärmeren liegen noch auf der Hauptreihe, während die massereichen von der Hauptreihe abgezweigt sind und den Roten-Riesen-Ast bevölkern. Die Leuchtkraft und die Masse der Sterne, die genau an der Abbiegestelle sitzen, bestimmen das Alter des Kugelhaufens.

Die Altersbestimmung

Im Prinzip ist alles ganz einfach: Die Hauptreihe im Kugelsternhaufen und ein paar simple Regeln der Sternentwicklung liefern das Alter. Die Schwierigkeiten stecken aber - wie stets - im Detail. Natürlich möchte man das Alter, da es von derselben Größe scheint wie das Alter des Universums, möglichst genau bestimmen. Vielleicht zeigen sich sogar Diskrepanzen zu den astronomischen oder kernphysikalischen Werten? Um diese Überlegungen aber zu präzisieren, muss man erstens sehr genaue Entwicklungsmodelle für Sterne errechnen und zweitens eine genaue Bestimmung der Helligkeit und Farbe der Sterne des Kugelhaufens durchführen. Da die Kugelsternhaufen alle sehr weit entfernt sind, ist ihre Hauptreihe sehr lichtschwach: Bis heute ist deshalb nur bei wenigen Kugelhaufen die Hauptreihe vermessen.

Die Sternmodelle und Entwicklungsrechnungen enthalten ebenfalls einige Unsicherheiten, wie etwa die Beschreibung der Konvek-

tion, der Gasströmungen im Sterninneren. Auch die Opazitäten der äußeren Schichten des Sterns und die Anfangsverteilung der chemischen Elemente beeinflussen das Resultat.

In Abb.9 sind Entwicklungswege für die Sternpopulation im Kugelsternhaufen M68 mit den Messdaten verglichen. Aus diesen Vergleichen kann man auf ein Alter von n bis 13 Milliarden Jahren für dieses Sternsystem schließen. Das eindrucksvolle Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass die ältesten Sterne vor einer Zeit von 10 bis 14 Milliarden Jahren entstanden sind.

Die Tatsache, dass die Hubble-Zeit und die Altersbestimmungen übereinstimmen, gibt uns die Gewissheit, dass diese Zeitskala auch für das Alter unseres Universums von großer Bedeutung ist.

DIE WÄRMESTRAHLUNG DES UNIVERSUMS

Ein weiterer großer Fortschritt in der Kosmologie war die Entdeckung der so genannten kosmischen Mikrowellenstrahlung durch die Wissenschaftler Arno Penzias und Robert Wilson. Diese Strahlung im Wellenlängenbereich von 10cm bis 1mm trifft aus allen Richtungen nahezu in gleicher Stärke ein und folgt in ihrer spektralen Verteilung dem Gesetz, das Max Planck zu Anfang dieses Jahrhunderts für die Wärmestrahlung eines Körpers oder Gases gefunden hat. Die Planck'sche Formel gilt genau genommen für den idealen Fall eines **Gleichgewichts** zwischen Strahlung und Materie. Die Materieteilchen absorbieren dabei ständig die Strahlung und emittieren sie wieder, ohne im Mittel ihre eigene oder die Energie der Strahlung zu verändern. Es gibt dann ein und dieselbe Temperatur für die Strahlung und die Materie, denn Temperaturunterschiede würden sofort durch die ständigen Wechselwirkungen wieder angeglichen. Die kosmische Mikrowellenstrahlung (kurz »CMB«: Cosmic Microwave

S.112

Background) bewahrt die Erinnerung an diesen Zustand, obwohl die Intensität der Strahlung im expandierenden Universum abnahm. Doch das Verhältnis von Energie der einzelnen Strahlungsquanten und Temperatur blieb konstant. Dieses Verhältnis bestimmt die Form der Planck-Kurve. Durch den im November 1989 gestarteten NASA-Satelliten COBE wurde diese Strahlung besonders genau vermessen. Die Temperatur dieser Wärmestrahlung beträgt

$$T = 2,728 \pm 0,005 \text{ K}.$$

(K steht für Kelvin und entspricht Grad Celsius plus 273.) Dies ist sozusagen die gegenwärtige Temperatur des Universums, sehr kalt allerdings, etwa minus 270 Grad Celsius.

Dieses Messergebnis in Verbindung mit der allgemeinen Expansion wird von den meisten Fachleuten als Hinweis auf einen heißen, dichten Anfangszustand des Universums angesehen. Die Wärmestrahlung hat sich im Laufe der Expansion auf die niedrige gemessene Temperatur abgekühlt, aber es muss eine Zeit gegeben haben, zu der die Temperatur viel höher war. Das Universum war damals so heiß und dicht, dass die Atome in ihre Kerne und Elektronen aufgelöst waren. Als Folge davon stießen Lichtteilchen (Photonen) sehr häufig mit freien Elektronen zusammen und es stellte sich ein Gleichgewicht zwischen Strahlung und Materie ein. Dies entsprach einer Temperatur von etwa 3000K. Im Laufe der Expansion kühlte der Kosmos ab; Wasserstoff- und Heliumatome bildeten sich und banden Elektronen, die Strahlung löste ihre enge Bindung mit der Materie und konnte von diesem Zeitpunkt an das Universum ungehindert durchdringen. Durch die weitere Expansion nach der Entkopplungszeit verringerte sich die Temperatur der Strahlung bis zum heute gemessenen Wert von 2,7 K.

Bemerkenswert ist auch, wie gleichmäßig aus allen Richtungen diese Strahlung auf der Erde eintrifft: Eine kleine Asymmetrie von der Größenordnung von 3 Tausendstel Kelvin wird als Dopplereffekt

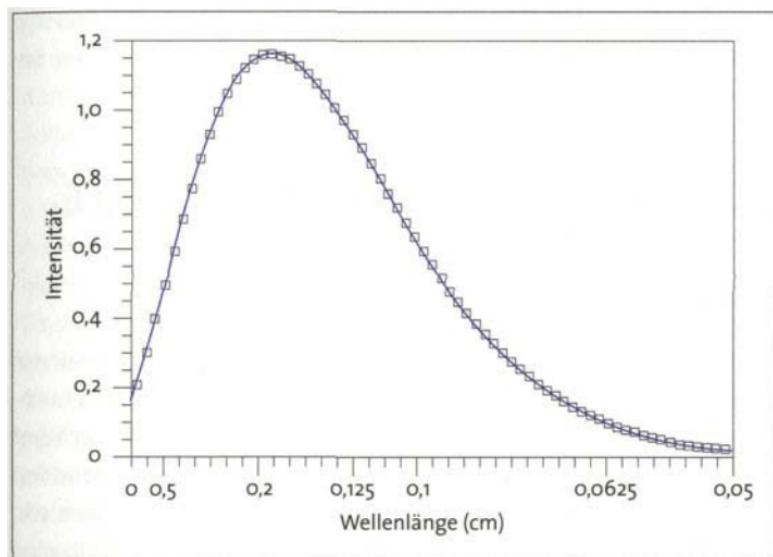


Abb.10: Die kosmische Mikrowellenstrahlung wurde mit den Instrumenten an Bord des Satelliten COBE vermessen. Die Intensitätsverteilung bezüglich der Wellenlänge zeigt ein Maximum bei etwa 2mm Wellenlänge. Die durchgezogene Kurve entspricht einem Planck Spektrum mit einer Temperatur von 2,728 Kelvin. Die farbige Verbreiterung der Kurve deutet die Streuung der Messwerte an. Im Rahmen der Messgenauigkeit wurde keine Abweichung vom Spektrum einer idealen Wärmestrahlung gefunden.

gedeutet, der als Folge der Bewegung unserer Galaxie gegen diesen gleichförmigen Strahlungshintergrund entsteht. Wird dieser Anteil aus den Daten entfernt, so bleiben kleine Schwankungen $\frac{\Delta T}{T} = 10^{-5}$ auf Winkelskalen von etwa 10° am Himmel. Diese geringen Schwankungen zeigen uns, dass der Kosmos erfreulicherweise doch nicht völlig perfekt und symmetrisch ist. Eine kleine Abweichung von der Gleichförmigkeit ist ja notwendig, damit Strukturen im Kosmos entstehen können. Die Schwankungen des CMB spiegeln die Dichteschwankungen wider, die als Keime für die Entstehung der Galaxien, der Galaxienhaufen und noch größerer Strukturen dienen.

Der gleichmäßige CMB und die Expansion der Galaxien sind die wichtigsten Eigenschaften, die den kosmologischen Modellen zu grunde liegen.

DIE KOSMOLOGISCHEN MODELLE

Mathematische Vereinfachungen

Will man das auseinander fliegende System der Galaxien mit einem einfachen Modell beschreiben, so wird man versuchen, das gleichförmige Auseinanderstreben dieser Objekte darzustellen. Es scheint auch vernünftig, diese Bewegung nicht so aufzufassen, als stünden wir im Mittelpunkt des Universums und alle Galaxien streben von uns weg. Dafür gibt es keinen Grund und deshalb ist es wohl eine bessere Beschreibung, wenn diese kosmische Expansion, von jeder beliebigen anderen Galaxie aus betrachtet, genauso aussähe, wie terrestrische Astronomen sie beobachten. Darüber hinaus wird man die Galaxien und Sterne selbst nicht genau, sondern lediglich in der Form einer gleichmäßigen Materieverteilung erfassen können. Die Modelle werden also nur sehr grobe, näherungsweise Beschreibungen der wirklichen Verhältnisse sein. Lassen wir Albert Einstein selbst zu Wort kommen. Die von ihm aufgestellte Gravitationstheorie, die **Allgemeine Relativitätstheorie**, ist die Grundlage für die mathematische Beschreibung des Kosmos. Er sagt: »Der metrische Charakter (Krümmung) des vierdimensionalen raumzeitlichen Kontinuums wird nach der allgemeinen Relativitätstheorie in jedem Punkt durch die daselbst befindliche Materie und deren Zustand bestimmt. Die metrische Struktur dieses Kontinuums muß daher wegen der Ungleichmäßigkeit der Verteilung der Materie notwendig eine äußerst verwickelte sein. Wenn es uns aber nur auf die Struktur im Großen ankommt, dürfen wir uns die Materie als über ungeheure Räume

gleichmäßig ausgebreitet vorstellen, so daß die Verteilungsdichte eine ungeheuer langsam veränderliche Funktion wird. Wir gehen damit ähnlich vor wie etwa die Geodäten, welche die im Kleinen äußerst kompliziert gestaltete Erdoberfläche durch ein Ellipsoid approximieren.«

Wir verwenden also einfache **kosmologische Modelle**, die so genannten Friedmann-Lemaître-Modelle (kurz: FL-Modelle; nach Friedmann (1922) und Lemaître (1927), die als Erste diese Lösungen aus Einsteins Gravitationstheorie abgeleitet haben): Die Expansion wird als das Auseinanderfließen einer idealisierten, gleichmäßig verteilten Materie aufgefasst, wie eine Flüssigkeit mit homogener Dichte $p(t)$ und Druck $p(t)$, die sich mit der Zeit t verändern. Die Flüssigkeitsteilchen, die man sich in diesem Bild als repräsentativ für die Galaxien denken kann, schwimmen in der sich ausdehnenden kosmischen Materie; ihr Abstand vergrößert sich mit der Zeit. Diese Expansion kann ohne Ende immer weitergehen, oder sie erreicht ein Maximum und kehrt sich danach um in eine Kontraktion (siehe Abb.11). Das unterschiedliche Verhalten wird festgelegt durch die im Kosmos vorhandene Menge an Materie. Strahlung und weiterer eventuell vorhandener Energieformen. Man misst die **Masse und Energie** der kosmischen Substanz pro Volumen: die Energiedichte. Es gibt die Möglichkeit, die kosmische Dichte durch eine Zahl zu charakterisieren, nämlich durch ihr Verhältnis zu einer Referenzgröße, der so genannten »kritischen Dichte«, die mit Hilfe der Hubble-Konstanten und der Newton'schen Gravitationskonstanten G konstruiert wird.

Die Größe

$$\rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

ist ein Ausdruck mit der Dimension einer Massendichte (Gramm pro Kubikzentimeter). Mit den gemessenen Werten von H_0 entspricht diese Dichte einem Masseninhalt von etwa 10 Wasserstoffatomen in einem Kubikmeter, ein exzellentes »Vakuum«, das in irdischen Labors

S.94

S.104

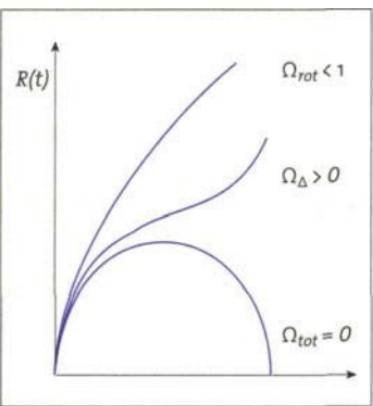


Abb.11: Die Kurven zeigen die zeitliche Änderung der Abstände zwischen den Galaxien, die proportional zum Weltradius $R(t)$ ist. Der Verlauf hängt ab von der mittleren Dichte und Energie. Falls Ω_{tot} kleiner als eins ist, wächst $R(t)$ ständig an; für Ω_{tot} größer oder gleich eins gibt es ständige Expansion (für Ω_Δ größer als null)-, wie auch die Möglichkeit eines Endkollapses für $\Omega_\Delta=0$. Die Messungen deuten darauf hin, dass die Kurve mit $\Omega_\Delta>0$ für unsere Welt maßgebend ist.

nicht erreicht werden kann. Die kosmische Dichte ρ_0 stellen wir durch folgende Größe dar:

$$\Omega_0 \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_0 .$$

Zur Gesamtdichte tragen aber nicht nur die vorhandenen Massen bei, sondern auch jede andere Form von Energie. Insgesamt lassen sich diese verschiedenen Komponenten aufaddieren zu einer Gesamtdichte Ω , wobei jede Komponente als Bruchteil der kritischen Dichte angegeben wird.

Für Ω kleiner als eins, d.h. für eine Dichte unterhalb der kritischen, geht die Expansion immer weiter. Für Ω größer als eins kann sich die Expansion umkehren und alles kann wieder in einem Endknall zusammenstürzen. Diese Möglichkeiten sind in Abb. 11 graphisch dargestellt.

Eine möglicherweise vorhandene überall konstante Energiedichte wird als »kosmologische Konstante« bezeichnet, der entsprechende Energiedichteparameter wird geschrieben als Ω_Δ . Albert Einstein hatte eine positive kosmologische Konstante in seinen Gleichungen eingeführt, um ein statisches Weltmodell zu erhalten. Er stellte sich den Kosmos als eine unveränderliche, gleichförmige Verteilung von

Sternen vor, die sich ins Unendliche erstreckt. Eine positive kosmologische Konstante wirkt als abstoßende kosmische Kraft, die der Anziehung der Schwerkraft das Gleichgewicht halten kann. Als Hubble die Ausdehnung des Weltalls entdeckte, wollte Einstein die Größe Q_Δ tilgen. Er bezeichnete es als seine »größte Eselei«, sie eingeführt zu haben. Mittlerweile gibt es aber tatsächlich astronomische Evidenz für eine konstante Energiedichte im Kosmos. Die kosmologische Konstante beschleunigt die kosmische Expansion. Falls diese Energiekomponente überwiegt, dehnt sich also der Kosmos beschleunigt aus - für alle Zeit, gleichgültig, ob Ω kleiner oder größer als eins ist. Welcher Fall liegt nun tatsächlich vor? Dies versuchen die Astronomen durch Messungen der kosmischen Dichte herauszufinden.

Der gekrümmte Raum

In den FL-Lösungen gibt es drei verschiedene Raumtypen: Zu jeder festen Zeit ist der dreidimensionale Raum entweder der aus der Alltagserfahrung gewohnte ebene, unendlich ausgedehnte, in dem die euklidische Geometrie gilt, oder ein Raum mit konstanter positiver oder negativer Krümmung. Der »gekrümmte Raum« ist ein etwas schwieriger Begriff, der ohne Mathematik nicht ohne weiteres verständlich ist. Wir können versuchen, eine anschauliche Vorstellung von diesen Räumen zu gewinnen, wenn wir eine Raumdimension in Gedanken weglassen, also nur zwei Dimensionen betrachten. Die drei unterschiedlichen Raumtypen entsprechen im anschaulichen Bild entweder einer Ebene (dies ist der euklidische Raum ohne Krümmung oder mit Krümmung null), der Oberfläche einer Kugel (positive Krümmung) oder einer sattelartigen Fläche (negative Krümmung).

Die sphärischen und sattelartigen Räume bereiten gewiss der Vorstellung mehr Schwierigkeiten als der ebene, unendliche Raum. Wie die Oberfläche einer Kugel ist der sphärische Raum geschlossen: Man kommt zum Ausgangspunkt zurück, wenn man unentwegt gerade-

aus weitergeht. »Geradeaus« heißt natürlich, dem Großkreis auf der Kugeloberfläche zu folgen. Man trifft dabei nie auf eine Grenze, denn die gibt es auf der Kugel nicht. Die Analogie hinkt leider etwas, weil wir den Raum außerhalb der Kugelfläche vergessen müssen - nur die Oberfläche existiert wirklich. Für den realen dreidimensionalen Raum müsste man sich eine weitere Dimension hinzudenken.

Das gesamte Raumvolumen ist endlich, wie die Oberfläche einer Kugel eine bestimmte endliche Fläche hat, während der ebene Raum und der sattelartige Raum unendlich und offen sind (d.h. man kommt nicht zum Ausgangspunkt zurück). In den FL-Modellen wird die Raumkrümmung durch die Materiedichte hervorgerufen. Größere Dichte krümmt den Raum zu einer kleineren, d.h. stärker gebogenen (3-dimensionalen) Kugel.

S.97

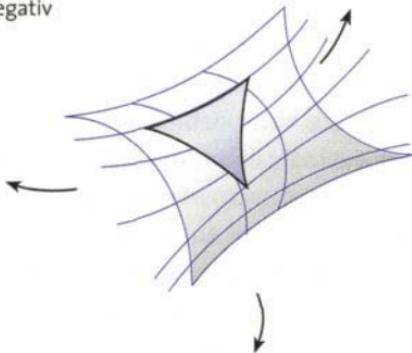
Die Raumkrümmung ist eine Spezialität der **Allgemeinen Relativitätstheorie** Albert Einsteins. Dieser Theorie liegt der Gedanke zugrunde, dass Raum und Zeit nicht fest vorgegeben sind, sondern von den vorhandenen Massen und Energien bestimmt werden. Jeder Körper verzerrt in seiner Umgebung das räumlich-zeitliche Maßfeld, in das er eingefügt ist, d.h. er beeinflusst den Gang von Uhren und verändert die Maßstäbe. Umgekehrt wirkt auch die Raumzeit-Geometrie auf die Dynamik der Körper. Das Wechselspiel zwischen allen

S.104

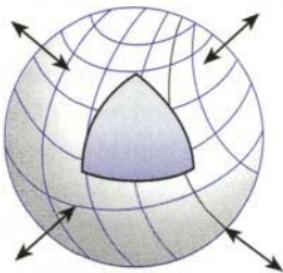
Massen und Energien ergibt dann schließlich das kosmologische Modell. Unter diesem Gesichtspunkt ist es höchst erstaunlich, dass aus dem Zusammenwirken aller Dinge im Kosmos ein Raum konstanter Krümmung oder gar ein ebener Raum entsteht. Die Expansion können wir im anschaulichen Bild darstellen als das Auseinanderziehen einer elastischen ebenen kugelförmigen oder sattelförmigen Fläche.

Betrachten wir beispielsweise die Kugeloberfläche etwas näher, so können wir die Expansion darstellen als ein gleichmäßiges Aufblasen dieser in sich geschlossenen endlichen Fläche, ähnlich dem Aufblasen eines Luftballons. Die Galaxien können wir durch Markierungspunkte auf dem Luftballon andeuten. Wächst die Kugel, so

a) Krümmung negativ



b) Krümmung positiv



c) Krümmung null

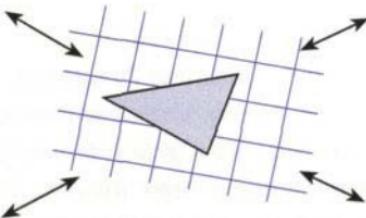


Abb.12: Negativ und positiv gekrümmter, sowie euklidischer Raum sind hier schematisch dargestellt in Form der entsprechenden 2-dimensionalen Flächen.

behalten zwar diese Punkte ihre Position auf der Oberfläche, aber ihre Abstände nehmen zu. Beim Luftballon entspricht diese Abstandsänderung einer Dehnung des elastischen Materials, aus dem er besteht, im kosmologischen Modell ist es eine »Dehnung« des Raum-Zeit-Gefüges. Die »Galaxien« entfernen sich voneinander mit einer Geschwindigkeit, die ihrem Abstand proportional ist. Die Abstände selbst ändern sich proportional zum Radius der Kugel, den wir mit $R(t)$ bezeichnen wollen. Auch in den exakten kosmologischen Modellen geschieht die Abstandsänderung proportional zu einer Funktion $R(t)$, die als »Expansionsfaktor« bezeichnet wird. Ausgehend vom jetzigen Zustand lässt sich mit Hilfe dieser FL-Modelle die Geschichte des Kosmos theoretisch konstruieren.

Aus den Lösungen der FL-Gleichungen lässt sich entnehmen (siehe Abb. n), dass $R(t)$ vor einer endlichen Zeit gleich null war. Bei Annäherung an diesen Zeitpunkt, beim Rückgang in die Vergangenheit, geht auch jeder endliche Abstand zweier Teilchen gegen null. Druck und Dichte werden unendlich groß in dieser Anfangssingularität, die generell als Urknall bezeichnet wird. Man kann die Entwicklung nicht weiter theoretisch zurückverfolgen, weil die Begriffe und Gesetze der Theorie ihren Sinn verlieren. Diese Anfangssingularität kennzeichnet den Anfang der Welt - alles, was wir jetzt beobachten, ist vor 15 Milliarden Jahren in einer Urexpllosion entstanden, die von unendlicher Dichte, Temperatur und unendlich großem Anfangsschwung war. Kurz nach dem Urknall können wir versuchen, die Welt mit der uns bekannten Physik zu beschreiben und die zeitliche Abfolge verschiedener physikalisch unterschiedlicher Phasen darzustellen.

Zur quantitativen Festlegung eines bestimmten kosmologischen Standardmodells benötigt man außer der Hubble-Konstanten H_0 noch zwei Parameter. Geeignet sind etwa der Dichteparameter Q_0 und das Weltalter t_0 . Diese drei, zumindest im Prinzip, messbaren Parameter legen das Weltmodell (einschließlich des Werts der kosmologischen Konstanten) eindeutig fest.

Rotverschiebung und zeitliche Entwicklung

Die Situation der Astronomen in einer Welt, die durch ein FL-Modell beschrieben wird, stellt sich so dar: Lichtsignale von fernen Galaxien erreichen uns hier und heute, sind aber von der Quelle vor langer Zeit ausgesandt worden. Diese Galaxien werden also nicht in ihrem jetzigen Zustand beobachtet, sondern so, wie sie in einer vergangenen Epoche ausgesehen haben. Die astronomischen Beobachtungen liefern einen Querschnitt durch die Geschichte des Kosmos, und der gegenwärtige Zustand kann nur in Verbindung mit einem geeigneten Modell erschlossen werden.

Die Lichtausbreitung in den FL-Modellen erfolgt so, dass die Rotverschiebung z der Wellenlängen direkt die Ausdehnung des Weltalls relativ zur jetzigen Größe misst: Licht, das z.B. zu einer Zeit ausgesandt wurde, als der Kosmos nur halb so groß war wie jetzt, erfährt eine Verdopplung der Wellenlänge, d. h. die Rotverschiebung $z = i$.

Die einfache Formel

$$1+z = \frac{R_{jetzt}}{R(t_{emission})}$$

beschreibt diesen Sachverhalt. Das Verhältnis der Weltradien jetzt und zum Zeitpunkt der Aussendung des Signals ist ein geeignetes Maß für die Ausdehnung des Universums.

Die ersten Galaxien, die wir beobachten, tauchen bei einer Rotverschiebung von $z = 6$ auf. Als sie ihr Licht aussandten, war das Universum erst bei einem Siebtel seiner jetzigen Größe. Die Mikrowellenstrahlung bringt uns Kunde von einer Epoche mit $z = 1100$. Der Kosmos heute ist 1100-mal so groß wie zu jener Zeit. Dies bedeutet auch, dass Materie und Strahlung selbst viel dichter gepackt waren. Die Dichte wächst um den Faktor 1100^3 an (etwa 1,3 Milliarden). Damit befinden sich bei dieser Rotverschiebung statt 10 Wasserstoffatomen pro Kubikmeter immerhin 10 Milliarden davon in einem Kubikmeter. Die Temperatur des CMB beträgt etwa 3000 Kelvin.

LEUCHTENDE UND DUNKLE KOSMISCHE MATERIE

Die Astronomen verfolgen das Ziel, die mittlere Dichte im Kosmos zu bestimmen, d.h. die Masse pro Volumen, die festlegt, in welcher Art von Universum wir uns befinden, im ständig expandierenden oder im wieder kollabierenden. Dazu versuchen sie aus der Strahlung, die sie aus dem Weltall empfangen, die Menge und die Verteilung der kosmischen Materie zu erschließen.

Besonders interessant ist aber auch die Frage, wie überhaupt im idealisierten Modell Galaxien und Sterne aus der gleichförmigen »Ursuppe« entstehen konnten.

Die leuchtende Materie

Das Licht im sichtbaren Bereich wird von Sternen ausgesandt. In unserer Milchstraße und in einigen nahe gelegenen Galaxien kann man die Sterne noch als einzelne Individuen erfassen, aber von weiter entfernten Galaxien kommt nur noch ein diffuser Lichtschimmer. Doch auch dieses Licht wird von großen Teleskopen sehr effizient eingefangen, bis hin zu sehr schwachen Quellen. Die Astronomen machen nun das, was sie am liebsten tun: Sie zählen. Sie zählen alle diese Galaxien bis zum winzigsten Lichtstäubchen und addieren die gesamte Strahlungsenergie auf. Dann versuchen sie den Raumbereich abzuschätzen, aus dem sie Licht gesammelt haben. Am besten geht dies, wenn zu den Positionen der Galaxien am Himmel auch ihre Entfernung bekannt ist. Nun gibt das Hubble'sche Gesetz die Entfernung einer Galaxie an, wenn deren Rotverschiebung gemessen ist. Dies stimmt ungefähr, wenn die Eigenbewegung der Galaxie nicht zu groß ist und sie der allgemeinen kosmischen Expansion in

etwa folgt. Damit kennt man das räumliche Volumen, aus dem die Strahlung stammt, und kann nun die Strahlungsenergie pro Volumen angeben.

Nun fehlt noch ein Schritt, um die Massendichte zu finden. Die Strahlung muss mit Masse in Beziehung gebracht werden.

Das Licht stammt von Sternen, und aus der Theorie des Sternaufbaus ist bekannt, wie viel Licht ein Stern bestimmter Masse aussendet. Die Leuchtkraft ist zur dritten Potenz der Masse proportional. Nun wissen die Astronomen außerdem aus genauen Beobachtungen der Sterne in der Sonnenumgebung, wie viel Sterne es ungefähr in einem bestimmten Massenbereich gibt. Es gibt sehr viele Sterne mit kleiner Masse und nur wenige mit großer, denn die kleinen leben lange und die großen kurz. Diese Tatsache kann man auch ganz quantitativ ausdrücken und das mittlere Verhältnis von Masse und Leuchtkraft für Sterne angeben. Man findet einen Wert von $\frac{M}{L} = 7$, wenn man die Masse (M) in Einheiten der Sonnenmasse und die Leuchtkraft (L) in Einheiten der Sonnenleuchtkraft angibt. Multipliziert mit der Energiedichte der Strahlung findet man so einen Wert für die mittlere Massendichte der leuchtenden Materie: Etwa ein halbes Prozent der kritischen Dichte $\Omega = 1$ wird erreicht.

Ausgedrückt mittels des Dichteparameters $Q = \frac{M}{L}$ steht für Stern: $\Omega = 0,005$.

Dieser Wert ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet, denn es könnte ja sein, dass die Galaxien, die registriert wurden, doch nicht so ganz typisch für die leuchtende Materie insgesamt sind. Auch die Unsicherheiten der Messung der Hubble-Konstanten müssen in Kauf genommen werden.

Die Beobachter haben jedoch viele verschiedene Volumina ausgezählt - auch mit etwas unterschiedlichen Resultaten - und gefunden, dass dieser Wert für Q ganz verlässlich ist. Er könnte vielleicht auch doppelt so groß sein, aber es steht ohne Zweifel fest, dass die leuchtende Materie nur etwa ein Hundertstel der kritischen Dichte erreicht.

Dunkle Materie in Galaxien

In den Spiralgalaxien sind die Sterne in einer flachen Scheibe angeordnet, die um das Zentrum rotiert. Die Astronomen haben die Rotationsgeschwindigkeiten bis zu großen Abständen genau vermessen. Dies gelingt durch die Beobachtung der Radiostrahlung, die von Wolken aus neutralem Wasserstoff emittiert wird, noch weit außerhalb der leuchtenden Scheibe. Es zeigte sich, dass die Masse nicht wie das Licht im Zentrum konzentriert ist, sondern dass es eine nichtleuchtende Materiekomponente gibt, die sich viel weiter erstreckt als das sichtbare Licht. Auch bei den Galaxien, die nur als leuchtendes Scheibchen ohne Spiralarme erscheinen (elliptische Galaxien) und die keine umfassende Rotation zeigen, fand man in den irregulären Geschwindigkeiten der Sterne Hinweise auf dunkle Massen. Dies führt auf Abschätzungen des Masse-Leuchtkraft-Verhältnisses von Galaxien, vom dreifachen Wert für Sterne, $\frac{M}{L} = 20$. Die Masse in Galaxien trägt also insgesamt etwas mehr zur Dichte bei, sie erreicht etwa 1,5% der kritischen Dichte, also $\Omega_{\text{Gal}} = 0,015$.

Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Ein Blick auf die Verteilung der Galaxien, wie in Abb. i8, überzeugt uns sofort davon, dass die Galaxien selbst meist in größere Strukturen eingebunden sind. Neben lang gestreckten Filamenten kann man dünne Schichten und vor allem dichte Ansammlungen in Haufen erkennen. Ihre typische Größe ist etwa 3 Mpc. Diese Galaxienhaufen eignen sich besonders gut, um noch mehr von der kosmischen Masse in die Bilanz einzubringen. Man erwartet, dass diese Gebilde durch ihre eigene Schwerkraft gebundene Systeme sind. Die Geschwindigkeiten der Galaxien in diesen Haufen allerdings sind so groß, dass sie alle auseinander fliegen müssten, falls nicht zusätzliche dunkle Massen vorhanden sind, die sie gebunden halten. Für eine ganze Reihe

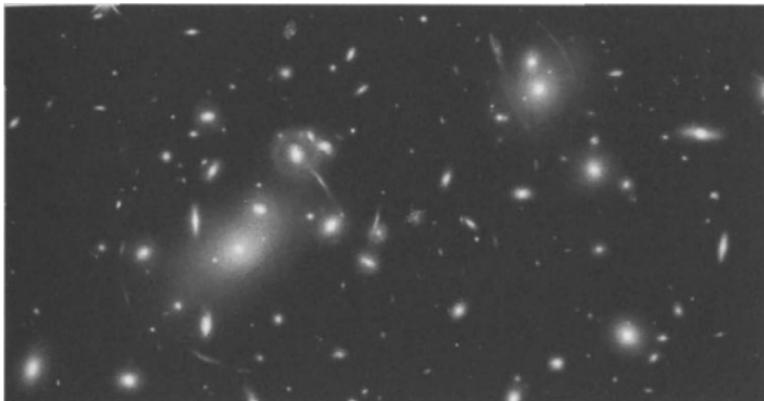


Abb.13: Der Galaxienhaufen A2218 wirkt als Gravitationslinse auf das Licht ferner Galaxien. Die elliptische Verformung der leuchtenden Scheibchen weist auf einen hohen Anteil dunkler Materie hin.

von Haufen wurde durch Vermessung der Geschwindigkeiten eine Massenbilanz aufgestellt, die dazu zwingt, einen hohen Anteil an dunkler Masse für diese Objekte zu akzeptieren. Die nichtleuchtende Masse, die einzelne Galaxien in Form einer Kugel, in einer sphärischen Halo, umgibt, reicht bei weitem nicht aus. Mindestens das 10fache an dunkler Materie ist nötig. Ein $\frac{M}{L}$ -Verhältnis von 200 ist typisch für Galaxienhaufen. Dieses Resultat wird auch durch weitere Beobachtungen bestätigt.

Mit Satelliten wurde eine starke Röntgenstrahlung der Galaxienhaufen registriert. Sie stammt von einem 100 Millionen Grad heißen Gas zwischen den Galaxien. Damit dieses Gas nicht entweicht, muss es durch die Schwerkraft zusätzlicher nicht sichtbarer Massen gebunden werden. Die dazu nötige Masse führt auf das gleiche $\frac{M}{L}$ -Verhältnis von 200.

Viele Galaxienhaufen wirken als Gravitationslinse, d.h. sie lenken die Lichtstrahlen ab, die von weiter entfernten Galaxien durch den Haufen zu uns gelangen, und verzerrten so das Bild der Quellgalaxie.

Die Art der Verzerrung erlaubt Rückschlüsse auf die Massenverteilung in den Galaxienhaufen. Auch diese Beobachtungen führen auf den gleichen, hohen Anteil an dunkler Materie.

Insgesamt addiert sich damit die auf der Skala von Galaxienhaufen geklumpte Materie zu einem Wert $\Omega = 0,15$ auf. Die Unsicherheiten können beachtlich sein, so dass wir vorsichtshalber einen Wertebereich von $\Omega = 0,2 \pm 0,1$ angeben wollen. Das verblüffende Ergebnis ist in jedem Fall, dass die dunkle Materie deutlich überwiegt. Es ist 30mal mehr dunkle als leuchtende Materie vorhanden.

Diese Schätzungen erfassen allerdings nicht eine gleichförmig verteilte Materie oder Energie, die auf der Dimension von Galaxienhaufen noch keine Klumpung zeigt. Welcher Art könnte diese dunkle Materie sein?

Die baryonische Materie

Die Natur der kosmischen Materie kann in einem Punkt recht zuverlässig angegeben werden: Es gibt nur einen geringen Anteil an normaler Materie, die aus Atomkernen und letzten Endes aus Protonen und Neutronen aufgebaut ist und aus der die Sonne, die Planeten und auch wir bestehen. Diese Materie wird auch als »baryonische« Materie bezeichnet. Die Häufigkeit der leichten Elemente Helium und Deuterium und ihre Entstehungsgeschichte im Urknallmodell begrenzen deren Beitrag auf 2% der kritischen Dichte ($\Omega_B = 0,02 \pm 0,01$).

Wie kommen die Kosmologen zu diesem Ergebnis? Im frühen Universum konnten Temperatur und Dichte beliebig hohe Werte erreichen, falls das heiße Urknallmodell die Verhältnisse richtig beschreibt. Alle nur denkbaren Prozesse der Hochenergiephysik konnten stattfinden, da ja die Elementarteilchen durch ihre thermische Bewegung auf hohe Energien beschleunigt wurden.

So bestand bei Temperaturen, die $6 \times 10^9 K$ übersteigen, das kosmische Gas aus Photonen, Elektronen, Neutrinos sowie den entspre-

chenden Antiteilchen, mit einer unbedeutenden (nicht für uns allerdings!) Beimischung von Baryonen.

Die Entstehung der leichten Isotope Deuterium, Helium und Lithium wird im Standard-Modell der Kosmologie erklärt. Messungen der Elementverteilung in unserer Umgebung ergeben hervorragende Übereinstimmung mit den theoretischen Vorhersagen. Es ist sicher ein beeindruckender Erfolg der Urknalltheorie, dass sie ohne zusätzliche Annahmen erklären kann, warum im Anfang nicht nur der Wasserstoff war, sondern bereits bei der Geburt der ersten Sterne etwa ein Viertel der Materie aus Helium bestand und der gesamte kosmische Deuteriumvorrat unmittelbar dem Urknall entstammt. Die Argumentation geht von einem Gleichgewicht zwischen Protonen, Neutronen und der Strahlung im frühen Universum aus. Da die Massendifferenz zwischen Neutron und Proton $m_n - m_p = 1,29\text{ MeV}$ beträgt, sind bei Temperaturen, die diesen Wert weit übersteigen, gleich viele Protonen wie Neutronen vorhanden. Die relative Häufigkeit X_n der Neutronen ist also zu Beginn des heißen Urknallmodells auf den Wert $\frac{1}{2}$ festgelegt.

Allein die Annahme, bei hohen Temperaturen herrsche thermisches **Gleichgewicht**, genügt um diese Werte zu erhalten. Es ist nicht nötig, eine Anfangsbedingung zu postulieren. Die relative Häufigkeit der Neutronen verändert sich mit zunehmender Expansion und Abkühlung des kosmischen Plasmas. Sobald die Temperatur unter etwa $T_d \approx 0,8 \times 10^9 \text{ K}$ gesunken war, konnten die Kerne des Deuteriums bestehen, die bei höheren Temperaturen durch die heiße Strahlung sofort wieder zerstört wurden. Nun setzte sehr schnell eine Reihe von Kernreaktionen ein, die im Wesentlichen zur Bildung von Heliumkernen führten: Proton und Neutron verbanden sich zu Deuteriumkernen, diese durch die Anlagerung von weiteren Deuteriumkernen und Neutronen zu Helium.

S.112

Da es bei den Massenzahlen $A = 5$ und $A = 8$ keine stabilen Kerne gibt, bildeten sich schwere Elemente nur in sehr geringem Ausmaß.

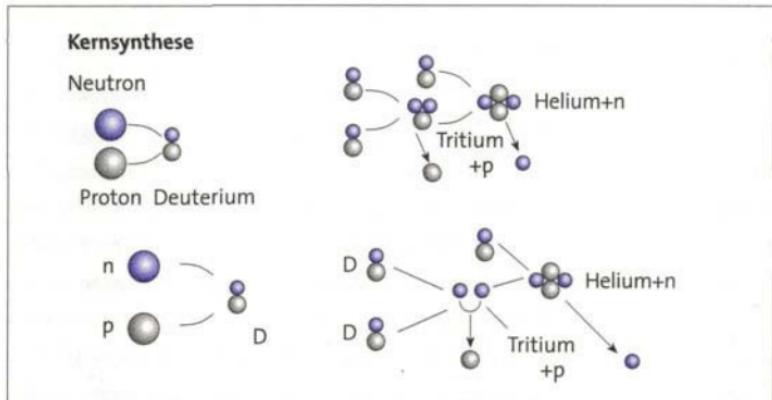


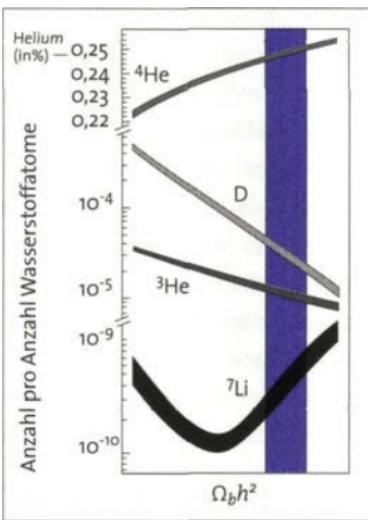
Abb. 14: Die Bildung der leichten Elemente Deuterium und Helium verläuft über die Kernreaktionen zwischen Protonen, Neutronen und Tritium.

Die Kernsynthese war abgeschlossen, nachdem alle Neutronen, die bei $T = 0,8 \times 10^9 K$ vorhanden waren, in 4He und in kleine Beimischungen von D , 3He , 7Li verarbeitet waren. Diese Prozesse waren im frühen Universum nach einigen Minuten beendet. Zu Beginn der Nukleosynthese war $X_n \approx 1/7$, und grob abgeschätzt ergibt sich deshalb ein relativer Massenanteil Y_p von Helium $Y_p = X(^4He) = 2X_n \approx 0,28$.

Dies hängt entscheidend von der Existenz eines heißen Strahlungsfelds ab, das die Entstehung von Deuterium verhindert, bevor nicht die Temperatur unter $0,1 \text{ MeV}$ gefallen ist. Andernfalls wäre alle Materie schon im Urknall zu Helium fusioniert worden, die normale Energiegewinnung der Sterne durch Wasserstoffkernfusion wäre unmöglich geworden und ebenso wohl die Entstehung des Lebens. Die Hintergrundstrahlung hat also auch die Frühgeschichte des Kosmos entscheidend beeinflusst, indem sie die Bildung eines zu hohen Heliumanteils verhinderte.

Die beobachteten Häufigkeiten der Elemente Helium und Deuterium (Helium: 24% der Masse aller Baryonen, Deuterium 5×10^{-5} der Anzahl der Wasserstoffkerne) passen zu den Rechnungen, falls die

Abb.15: Die Häufigkeit der Elemente Helium, Deuterium und Lithium kann in Abhängigkeit von der baryonischen Dichte Ω_B berechnet werden (h ist $H_0/100$). Da die Zahlenwerte der Häufigkeiten sehr unterschiedlich sind, sind Helium (in %), wie auch Deuterium und Lithium in jeweils verschiedenen Skalen aufgetragen. Der Vergleich der berechneten mit der gemessenen Häufigkeit schränkt $\Omega_B h^2$ auf einen schmalen Bereich ein (vertikaler Balken).



mittlere Dichte der Baryonen zwischen 1% und 3% der kritischen Dichte liegt:

$$0,01 \leq \Omega_B \leq 0,03.$$

Der Vergleich mit Abb.15 zeigt dass ein sehr enger Wertebereich ausgewählt wird. Das ist ja nochmal gut gegangen, möchte man da ausrufen. Ernsthafter betrachtet ist dies ein großartiger Erfolg des heißen Urknallmodells.

Die Baryonendichte ist größer als die Dichte der leuchtenden Materie-es gibt also dunkle baryonische Materie-, aber viel kleiner als die Dichte der dunklen Materie. Es muss also nichtbaryonische dunkle Materie geben.

Nichtbaryonische dunkle Materie

Die Art der dunklen Materie ist nach wie vor unbekannt. Die einzigen auch experimentell nachgewiesenen Vertreter dieser Spezies

sind die Neutrinos, langlebige Elementarteilchen mit geringer Masse, die bei den radioaktiven Zerfallsprozessen eine wichtige Rolle spielen. Sie leisten aber nur einen unbedeutenden Beitrag zur kosmischen Massendichte. Ansonsten ist man auf theoretisch gut untermauerte Vermutungen angewiesen. Favorisiert werden stabile Elementarteilchen mit sehr schwacher Wechselwirkung und beträchtlicher Masse. Namen wie Axionen oder Neutralinos stehen für diese Kandidaten. Wir müssen geduldig auf einen experimentellen Nachweis warten. Bis dahin leben wir mit dem beunruhigenden Gefühl, dass wir die dominierende Materieform im Kosmos nicht kennen.

DIE KOSMISCHE HINTERGRUND- STRAHLUNG - CMB

Verfolgen wir die Geschichte des Kosmos im Rahmen der einfachen FL-Modelle immer weiter in die Vergangenheit zurück, so sehen wir, dass in der Frühzeit im kosmischen Strahlungsfeld genügend viele energiereiche Photonen vorhanden waren, um alle Wasserstoffatome im ionisierten Zustand zu halten. Dies war noch der Fall, als die mittlere Strahlungstemperatur etwa 3000K betrug. Zu dieser Zeit, etwa 400000 Jahre nach dem Urknall, bestand die Materie aus einem ziemlich gleichförmigen heißen Plasma. Sterne oder Galaxien gab es in dieser Frühphase noch nicht.

Doch bei weiterer Abkühlung als Folge der Expansion begannen sich in diesem heißen Urbrei die freien Elektronen mit den Atomkernen zu Wasserstoff und Helium zu verbinden. In dieser Epoche der »Rekombination«, wie sie unglücklicherweise benannt wurde, denn eigentlich entstehen zum ersten Mal in der kosmischen Geschichte Wasserstoff- und Heliumatome, wurde das Universum durchsichtig, die Streuung der Photonen an Elektronen wurde stark reduziert. Dies

geschah in kurzer Zeit, jedoch nicht ganz plötzlich. Zunächst bildeten sich angeregte Atome, d.h. Atome höherer Energie, die wiederum leicht ionisiert werden konnten, oder selbst Photonen aussandten, die andere neutrale Atome ionisierten. Ab und zu aber wurden Photonen emittiert, die zu geringe Energien hatten, um weiter zu ionisieren. Dies führte allmählich zur Rekombination. Dieser Prozess dauerte aber doch etwa 40000 Jahre. Das entsprechende Rotverschiebungsintervall ist $\Delta z = 80$. (Die Rotverschiebung dieser Epoche ist etwa $z = 1100$) Diese Unscharfe in der Rotverschiebung macht sich im Spektrum des CMB überhaupt nicht bemerkbar. Die Tatsache, dass keine Abweichung von einem Planck'schen Spektrum gefunden wurde, ist ein weiterer, sehr schöner Hinweis auf die Gültigkeit der einfachen kosmologischen Modelle: Die Energie der Photonen und die Strahlungstemperatur müssen auch während der 40000 Jahre dauernden Rekombinationsphase perfekt der kosmischen Expansion gefolgt sein.

Akustische Schwingungen im frühen Universum

Aus dem CMB lässt sich aber noch mehr herauslesen. Vor der Rekombinationszeit hatten sich in der dunklen Materie schon erste, schwach ausgeprägte Massenkonzentrationen gebildet. Das eng verkoppelte Plasma aus Photonen und Baryonen folgte diesen Kondensationen, doch dem Wunsch der Baryonen nach Zusammenballung stand der Druck der Photonen entgegen, durch den diese Plasmawolken wieder auseinander getrieben wurden. Im Widerstreit der Kräfte begannen sie zu schwingen - ganz analog zu Schallwellen. Die größte schwingende Plasmawolke war bis zur Rekombinationszeit gerade einmal von einer Schallwelle durchlaufen worden. Noch größere Wolken konnten noch keinen Gegendruck aufbauen, sondern folgten einfach der Schwerkraft und zogen sich langsam zusammen. Kleinere Wolken oszillierten mit höherer Frequenz. Alle Schwingungen waren



Abb.16: Start des Ballons der Boomerang Mission am Südpol mit Mt.Erebus im Hintergrund.

in Phase, perfekt synchronisiert durch den Urknall. Bei der Kontraktion und Verdichtung wurde das Photonengas heißer, bei der Verdünnung, beim Auseinanderlaufen, kühlte es sich ab.

Zur Rekombinationszeit verließen die Photonen die Plasmawolken und finden sich nun mit leicht unterschiedlichen Temperaturen in den Detektoren der Astronomen wieder. Die Temperaturschwankungen der dichteren und dünneren Plasmawolken sollten sich als heiße und kühle Bereiche des CMB am Himmel zeigen.

Tatsächlich haben schon 1992 Messungen mit dem NASA-Satelliten COBE zu Himmelkarten des CMB geführt, auf denen Schwankungen in Form kalter und weniger kalter Flecken erschienen. Die Instrumente von COBE hatten eine geringe Auflösung, der Satellit war zu »kurzsichtig«, um kleine Strukturen zu erkennen; die Winkelaustrahlung musste einige Grad betragen, damit ein Bereich als

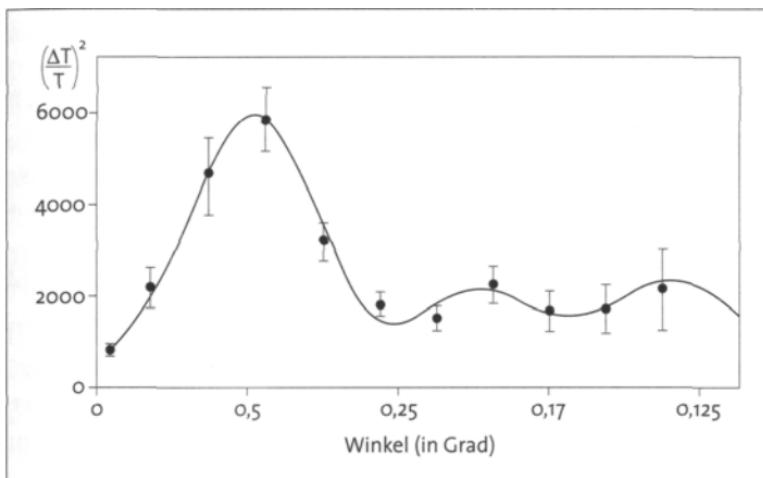


Abb.17: Hier ist das Messresultat des Boomerang Experiments gezeigt. Die Quadrate der mittleren Temperaturschwankungen (in Einheiten von Millionstel Kelvin zum Quadrat) sind als Funktion des Winkels dargestellt. Das ausgeprägte Maximum bei 1/2 Grad beweist, dass der Raum keine Krümmung hat ($0 = 0$).

Messpunkt identifiziert werden konnte. Beim Blick auf die Erde wäre ganz Bayern gerade nur ein Messpunkt für COBE. Die Intensitätschwankungen, die man als Keime für die Entstehung von Galaxienhaufen und Galaxien erwartet, zeigen sich erst auf Skalen von deutlich unter einem Grad. Der vor kurzem erfolgreich gestartete amerikanische Satellit MAP und die für 2007 geplante europäische Sonde PLANCK sollen Himmelskarten mit der gewünschten Detailgenauigkeit liefern.

Mittlerweile ist aber ein beträchtlicher Himmelsausschnitt durch Ballonexperimente (Boomerang und Maxima) kartographisch erfasst worden. Die Winkelauflösung von -0,5 Grad reichte aus, um im CMB die Signale der akustischen Schwingungen zu finden. Diesen enormen Fortschritt erreichten die Forscher durch die Entwicklung neuer, für Temperaturunterschiede sehr empfindlicher Messinstrumente.

Beobachtungen und kosmische Parameter

In Abb. 17 ist das Ergebnis dieser Messungen dargestellt. Es zeigt sich ein ausgeprägtes Maximum der gemittelten Temperaturschwankungen. Dies entspricht der größten akustischen Schwingung - der Strecke, die eine Schallwelle vom Urknall bis zur Rekombinationszeit zurücklegen konnte. Diese Länge ist durch physikalische Prozesse festgelegt und sie erscheint am CMB-Himmel als Signal mit einer Winkelaustrittsdehnung von etwa einem Grad. Der Winkel, unter dem man eine bestimmte Strecke sieht, wird durch die Krümmung des Raumes bestimmt. Bei positiver Krümmung nimmt dieselbe Strecke einen größeren Winkel ein als bei Krümmung null, bei negativer Krümmung einen kleineren.

Der gemessene Wert passt zur Krümmung null, d.h. das Universum gehorcht der euklidischen Geometrie - es ist so einfach wie nur möglich. Krümmung null heißt auch, dass die gesamte Masse und Energiedichte Ω_{tot} den kritischen Wert $d = 1$ erreicht. Die genaue Analyse ergibt $\Omega_{tot} = 1,02 \pm 0,06$.

Nur noch eine kleine positive oder negative Krümmung ist im Rahmen der Messgenauigkeit zugelassen.

In der akustischen Schwingung folgt auf die Verdichtung eine Verdünnung, die in der Abbildung als zweites Maximum aufgetragen ist (gezeigt wird ja das Quadrat der Schwankungen).

Je mehr baryonische Materie vorhanden ist, desto stärker ist die Verdichtung beim Einfall in die Gravitationspotentiale der dunklen Materie ausgeprägt. Das Verhältnis der Amplituden ermöglicht die Festlegung der baryonischen Materie auf 2% der kritischen Dichte ($O\beta=0,02$) und auf 28% für die dunkle nichtbaryonische Materie ($Q_m = 0,28$). Diese Werte sind in Einklang mit anderen astronomischen Messungen. Die Unsicherheiten betragen jeweils etwa 20%.

Die baryonische und die dunkle Materie zusammen erreichen bei weitem nicht den Wert $\Omega_{tot} = 1$. Es muss eine weitere Komponente

der kosmischen Materie geben, die für dieses Defizit gerade steht. Diese Komponente muss sehr gleichmäßig verteilt sein, sie darf keine Klumpung auf der Skala von Galaxienhaufen oder darunter aufweisen. Eine konstante oder nahezu konstante kosmische Energie-dichte Ω_Δ muss vorhanden sein, mit $\Omega_\Delta = 0,7$.

Dunkle Materie und dunkle Energie

Die geklumpte dunkle Materie kennen die Physiker noch nicht, trotz vieler Hinweise aus astronomischen Beobachtungen, doch sind Experimente im Aufbau, die wohl in einigen Jahren ein geeignetes Elementarteilchen als Kandidaten dafür aufzeigen werden.

Es bleibt aber noch eine Deckungslücke in der kosmischen Energiebilanz von etwa 70% der kritischen Dichte. Die Physiker neigen dazu, das Defizit durch die Energie eines speziellen Feldes oder durch die Energie des Vakuums, des Grundzustands der Welt, auszugleichen in Erinnerung an die bald wieder aufgegebenen Versuche Einsteins, eine »kosmologische Konstante« einzuführen. Eine derartige, nahezu konstante Feldenergie würde die kosmische Expansion beschleunigen, im Gegensatz zu den Massen im Kosmos, die durch ihre gegenseitige Schwerkraftwirkung die Expansion abbremsen.

Was steckt nun hinter dieser »dunklen Energie«? Die Quantentheorie könnte eine Deutung dieser Größe als Energie des Vakuums, des Grundzustandes tiefster Energie, liefern. Der leere Raum ist, quantentheoretisch betrachtet, ein komplexes Gebilde, durchzogen von einem Geflecht aus fluktuierenden Feldern, die zwar nicht beobachtet werden können, die aber zu einer Energie des Vakuums beitragen. Die Theoretiker können einige dieser Beiträge ganz gut abschätzen, erhalten aber einen Wert, der um etwa 120 Größenordnungen den Wert übertrifft, den die Beobachtungen nahelegen. Andere Beiträge, die (noch) nicht berechnet werden können, würden diesen Wert vielleicht ausbalancieren, aber dieser Ausgleich müsste dann

mit unvorstellbarer Präzision bis auf 120 Stellen nach dem Komma erfolgen. Es ist ein ungelöstes Rätsel der Quantenphysik, wie das zugehen könnte.

Somit bleiben zunächst nur die Versuche, unsere Unkenntnis mathematisch zu präzisieren, durch die Beschreibung der kosmologischen Konstanten in einem passenden Modell. Auch der schöne Name »Quintessenz« ist für diese kosmische Energiedichte vorgeschlagen worden.

Tatsächlich bleibt es ein Rätsel, warum diese dunkle Energie überhaupt vorhanden ist und warum sie gerade jetzt die kosmische Expansion bestimmt. Bleibt die dunkle Energie konstant, so wird die kosmische Expansion sich immer weiter beschleunigen und stets weitergehen. Die Verknüpfung mit dem Konzept der Feldenergie bietet aber auch die interessante Möglichkeit, dass in der Zukunft überraschende Wendungen durch das zeitliche Verhalten des Feldes in der kosmischen Entwicklung auftreten.

DIE ENTSTEHUNG DER STRUKTUREN IM UNIVERSUM

Einige theoretische Überlegungen

Das theoretische Modell des Universums und die astronomischen Beobachtungen stehen in gewissem Gegensatz zueinander. Im Modell wird das gleichförmige Auseinanderfließen eines Gemisches aus Strahlung und Materie beschrieben, während die astronomischen Beobachtungen zeigen, dass die leuchtende Materie in scharf umgrenzten Bausteinen, den Galaxien, organisiert ist. Eine befriedigende Erklärung lässt sich gewinnen, wenn man die Entstehung der Galaxien als Entwicklungsprozess betrachtet, in dem die heute be-

obachteten Strukturen aus anfänglich sehr kleinen Schwankungen der Massen- und Strahlungsverteilung entstanden sind. Kleine Abweichungen von der Gleichmäßigkeit müssen zu Anfang vorhanden gewesen sein, denn aus volliger Ebenmäßigkeit kann nichts Komplexeres entstehen.

Die zunächst nur schwach ausgeprägten Inhomogenitäten in der kosmischen Ursuppe treten aufgrund ihrer eigenen Schwerkraft im Laufe der Zeit immer deutlicher hervor, bis sie sich von der allgemeinen Expansion abtrennen und schließlich zu dichten Objekten zusammenballen. Diese einleuchtende Idee gerät in folgende Schwierigkeit: Nach dem Zeitpunkt der Entkopplung von Strahlung und Materie, etwa 400000 Jahre nach dem Urknall, konnten kleine Dichteschwankungen zwar anwachsen - relativ zur Gesamtdichte -, aber nur in gleichem Maße wie das Universum selbst. Dies bedeutet, dass nur ein Wachstumsfaktor 1000 möglich ist. Dies ist nicht genug, da die Anfangsverdichtung sehr klein gewesen sein muss, etwa so groß wie die Schwankungen der Intensität der kosmischen Mikrowellenstrahlung (CMB) von etwa 10^5 . Ein Faktor 1000 ergibt somit auch nur Schwankungen im Prozentbereich, d.h. keine Galaxien, keine Sterne, nichts. Das Universum bliebe im Wesentlichen homogen. Die Existenz von Temperaturschwankungen des CMB ist aber ein deutlicher Hinweis darauf, dass das Evolutionsmodell die Strukturbildung richtig beschreibt.

In diesem Dilemma bietet die dunkle Materie einen Ausweg an, der in den letzten Jahren viel begangen wurde. Ein Untergrund aus Teilchen der dunklen Materie hat keine direkte Wechselwirkung mit der Strahlung, kann deshalb größere anfängliche Dichteschwankungen besitzen als normale Materie, hat einen größeren Anwachsfaktor und kann die Schwerkraftzentren vorgeben, in denen dann die normale baryonische Materie sich ansammelt. Die leuchtende Materie, also die Galaxien, wären sozusagen die Spitze eines Eisbergs aus dunkler Materie, der selbst nicht zu sehen ist, aber durch seine

Schwerkraft die Verteilung und die Geschwindigkeit der Galaxien bestimmt.

Da die dunkle Materie eindeutig dominiert, versucht man in diesem Modell zunächst einmal nur die Strukturen zu berechnen, die sich in der dunklen Materie herausbilden. In einem zweiten Schritt wird dann die normale Materie in den vorgeformten Schwerkraftfeldern der dunklen Materie verteilt. Dieses Programm wird zur Zeit von vielen Forschergruppen in aller Welt verfolgt.

Beobachtungen

Die theoretischen Konzepte der Galaxienbildung können überprüft werden, weil inzwischen präzise und umfangreiche Beobachtungsdaten gewonnen wurden. Es ist mit modernen Teleskopen möglich, in kurzer Zeit die Rotverschiebungen sehr vieler Galaxien zu messen. In Abb. 18 sind die Ergebnisse des Las Campanas Redshift Surveys aufgetragen, der etwa 30000 Objekte enthält, mit Rotverschiebungen bis zu 0,2. Gemäß der Hubble-Expansion haben diese Galaxien Fluchtgeschwindigkeiten bis zu 60000 Kilometern pro Sekunde. Demgegenüber sind ihre Eigengeschwindigkeiten von einigen 100 Kilometern pro Sekunde unbedeutend. Man kann also das Hubble'sche Gesetz benutzen, um die Eigengeschwindigkeiten der Galaxien festzulegen, und damit gelangt man, nimmt man die Position am Himmel hinzu, zu einem dreidimensionalen Bild der Verteilung. Die Abb. 18 enthält die Galaxien aus drei streifenförmigen Gebieten am Himmel von je 6 Grad Breite und einer Längenausdehnung (der so genannten Rektaszension) von 120 Grad. In diesem keilförmigen Bild sind die Galaxien mit ihrer Längenkoordinate und der Rotverschiebung aufgetragen, während die Ausdehnung in der Breite komprimiert ist. Der Beobachter befindet sich in der Spitze des Keils.

Das räumliche Bild wirkt außerordentlich inhomogen. Fast alle Galaxien liegen in ausgedehnten dünnen Schichten, die wie eine

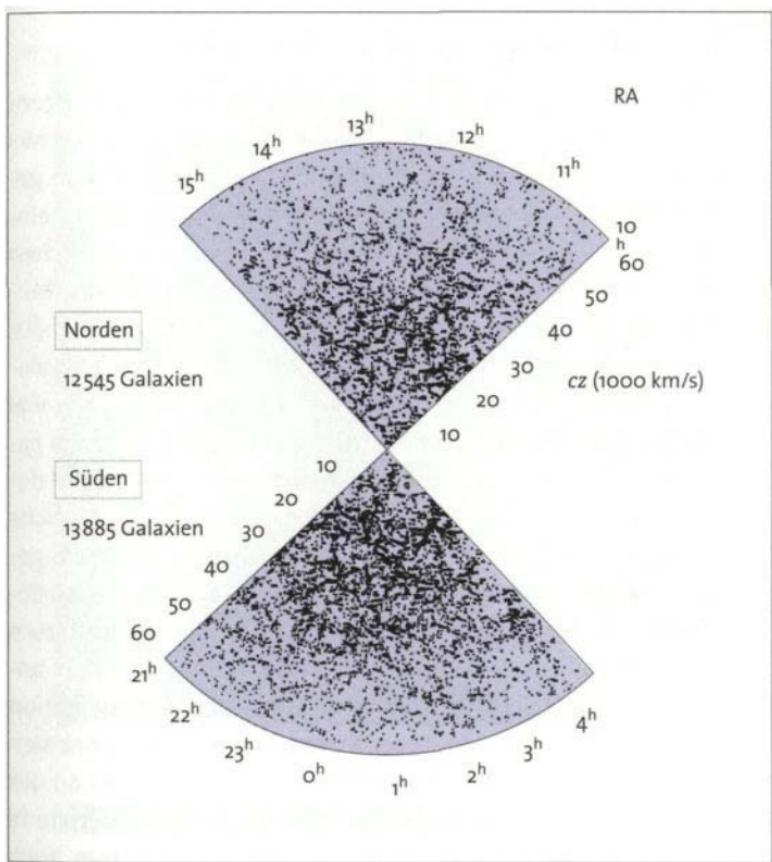


Abb.18: Die Galaxienverteilung am Nord- und Südhimmel aus dem Las Campanas Katalog ist als Keildiagramm gezeigt. Hierin sind die Koordinaten längs des Kreisbogens die galaktische Länge (Rektaszension) und längs der Seite die Rotverschiebung (als cz in Einheiten von 1000 km/s).

Haut große, fast leere Gebiete umschließen. Die Vorstellung einer schwammartigen Verteilung, bei der die Galaxien in den dünnen Wänden von nahezu kugelförmigen Bereichen liegen, scheint zutreffend. Reiche Haufen von Galaxien finden sich an den Stellen, an denen mehrere solcher Wände aneinanderstoßen.

Dunkle Halos und leuchtende Galaxien

Den Theoretikern ist es in den letzten Jahren gelungen, die Eigenschaften dieser Verteilung sowohl qualitativ wie quantitativ in etwa zu reproduzieren. Da die Teilchen der dunklen Materie nur ihre gegenseitige Schwerkraft spüren, ist die Berechnung im Prinzip einfach. Schwierig wird sie deshalb, weil man Millionen dieser Teilchen rechnerisch verfolgen muss, um zu sehen, welcher Art die sich herausbildenden Strukturen sind. Dazu braucht es aufwändige Computersimulationen und einiges Geschick in numerischer Mathematik.

Einige prinzipielle Aspekte können wir uns aber auch ohne viel Mathematik klarmachen. Betrachten wir einen Raumbereich im expandierenden Universum, der etwas mehr Masse enthält als der Durchschnittswert. Die eigene, innere Schwerkraft dieses Bereichs bremst die kosmische Expansion stärker ab, als dies außerhalb geschieht. Deshalb verdünnt sich zwar die Materie auch in diesem Bereich, aber langsamer als im restlichen Kosmos. Der Kontrast zum Außenbereich wird also im Laufe der kosmischen Expansion anwachsen und irgendwann so groß werden, dass die Eigengravitation überwiegt. Dann trennt sich dieser Materieklopfen ab, dehnt sich nicht mehr weiter aus, sondern nimmt nur noch als Ganzes an der kosmischen Expansion teil. Diese Kondensation der dunklen Materie bezeichnet man als Halo. In dieser Halo sammelt sich nun auch etwas normale, leuchtende Materie an, es entstehen Galaxien und Galaxienhaufen.

Nehmen wir der Einfachheit halber an, die Halo sei kugelförmig, dann ist nach der Abtrennung vom Rest des Universums die Dichte im Inneren 180-mal größer als im kosmologischen Modell. Tatsächlich erwartet man, wie neueste Simulationsrechnungen zeigen, eher elliptisch geformte Halos. Der Dichtekontrast ist aber etwa derselbe. Es können sich Halos verschiedener Größe bilden und darin - zu verschiedenen Zeiten - auch Galaxien verschiedener Art und Zahl.

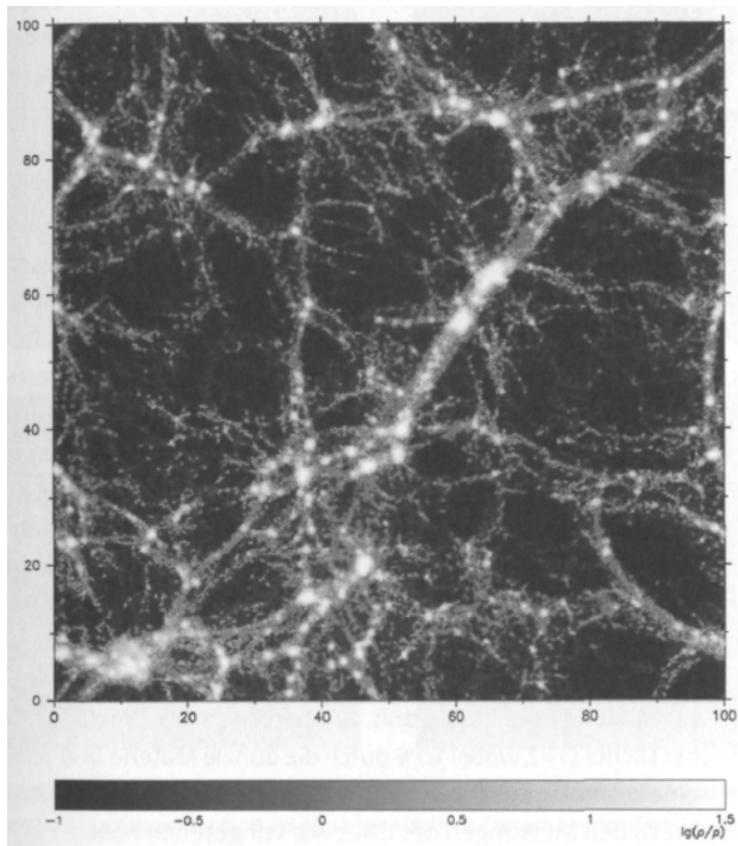


Abb. 19: Das Resultat einer numerischen Simulation mit dunkler Materie zeigt die Verdichtungen von 128³ Teilchen in einem Würfel von 100 Mpc Kantenlänge. Ein Ausschnitt von 10 Mpc Dicke ist in die Zeichenebene projiziert. Die hellen Bereiche sind Gebiete hoher Dichte, in denen die Entstehung von Galaxien zu erwarten ist.

In Abb. 19 sehen wir einen Ausschnitt aus einer numerischen Simulation, in der 16777216 Teilchen der dunklen Materie in einem Würfel mit der Kantenlänge von 300 Millionen Lichtjahren rechnerisch erfasst wurden. In den hellen Gebieten ist die Dichte sehr hoch und

hier erwartet man auch die Entstehung leuchtender Objekte. Deutlich zu erkennen sind verschiedene großräumige Strukturen, Bänder oder Filamente, hoher Dichte und ausgedehnte fast leere Gebiete. Alle diese qualitativen Züge stimmen völlig überein mit den tatsächlichen astronomischen Beobachtungen. Um auch quantitative Vergleiche anstellen zu können, muss man sich ein Verfahren überlegen, wie Galaxien in den Halos aus dunkler Materie anzusiedeln sind.

Natürlich ist dies eigentlich durch die grundlegenden physikalischen Prozesse vollkommen festgelegt, aber man ist noch nicht in der Lage, die komplexen Vorgänge der Heizung und Kühlung des Gases, der Sternentstehung und der Sternexplosionen durchzurechnen. Deshalb probiert man verschiedene Verfahren aus, die - meist abhängig von der Masse und Entwicklungsgeschichte eines Halo - massereiche, oder masseärmere, wenige oder zahlreiche Galaxien darin ansiedeln. Die quantitativen Vergleiche mit den Beobachtungen erfolgen auf der Basis von raffinierten Statistiken. Dabei zeigt sich, dass die Verteilung der Galaxien im Raum und auch ihre mittlere Geschwindigkeit in den Modellen richtig wiedergegeben werden, sofern man die anfänglichen Schwankungen der Dichte und das kosmologische Modell geeignet wählt. Am besten passen Modelle mit kritischer Dichte $\Omega = 1$, wobei 30% durch die dunkle Materie und 70% durch eine kosmologische Konstante beigetragen werden. Dies passt exzellent zu den Messungen des CMB, wie wir gesehen haben.

Da mittlerweile auch bei großen Rotverschiebungen viele Galaxien vermessen werden, kann das Entwicklungsmodell der Galaxien nicht nur am gegenwärtigen Zustand, sondern auch in früheren Epochen überprüft werden.

Alle diese Tests zeigen, dass die theoretischen Vorstellungen zwar noch nicht alle Details korrekt wiedergeben, aber doch eine zuverlässige Beschreibung der Strukturbildung darstellen.

In Abb. 20 ist das Konzept der Galaxienbildung noch einmal schematisch dargestellt. Aus kleinen Unregelmäßigkeiten der dunklen

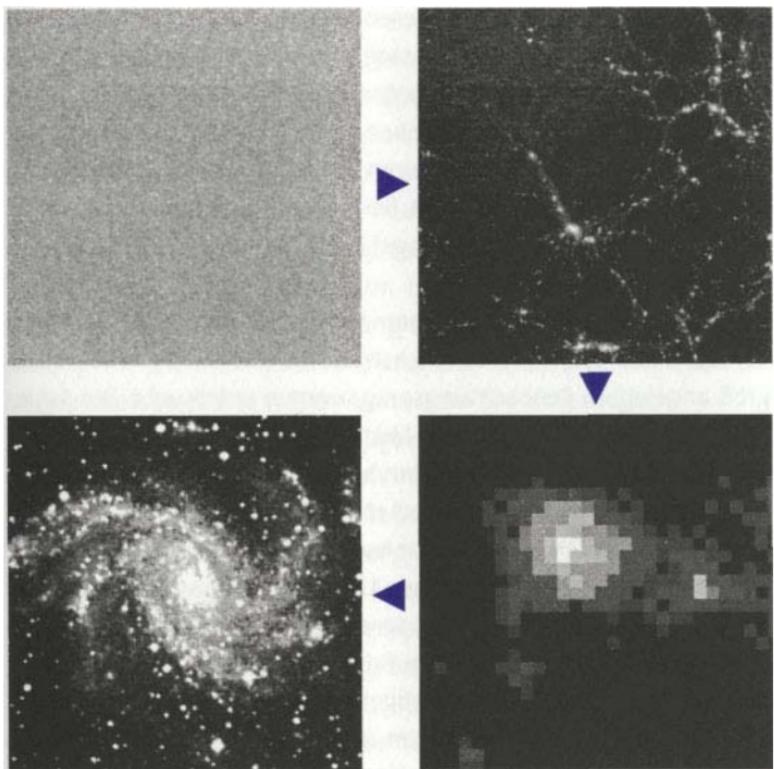


Abb. 20: Die Entstehung einer Spiralgalaxie ist ein Zweistufen prozess, in dem zuerst die Strukturen der dunklen Materie entstehen. Danach kondensiert das Gas in diesen Gravitationspotentialen und bildet Sterne und Galaxien.

Materie entstehen allmählich kontrastreichere Gebilde, in deren Verdichtungen, den dunklen Halos, sich die baryonische Materie ansammelt, durch Strahlung Energie verliert, abkühlt und zu Sternen und Galaxien kondensiert. Die ersten kondensierten Wasserstoffwolken beobachteten die Astronomen bei Rotverschiebungen von 6. Diese frühe Epoche ist natürlich nur mit den größten Teleskopen zu erreichen und auch mit diesen erhält man keine Bilder, sondern nur ein-

zelne Spektrallinien. Schon in diesen Spektren findet man aber nicht nur die Linien der Elemente Wasserstoff und Helium, sondern auch Beiträge von schwereren Elementen. Selbst in dieser frühen Phase muss es also bereits Sterne gegeben haben, die das kosmische Material nach ihrer Explosion mit Spuren von Kohlenstoff, Sauerstoff und Magnesium angereichert haben. Bei einer Rotverschiebung von 3 beobachtet man bereits richtig ausgebildete Galaxien mit leuchtenden Sternen in großer Zahl.

Jede Galaxie sollte also von einem Halo aus dunkler Materie umgeben sein. Der Halo unserer Milchstraße wird seit einigen Jahren in groß angelegten Beobachtungsprogrammen untersucht. Die Astronomen machen sich dabei den »Mikrolinseneffekt« zunutze: Falls der Halo aus dunklen Himmelskörpern bestünde, denen der hübsche Name »Machos« (»Massive Compact Halo Objects«) gegeben wurde, so würde das Licht ferner Sterne für kurze Zeit deutlich verstärkt, nämlich genau dann, wenn die gerade Linie vom Beobachter zum Stern einen dunklen Körper streift. Dieser selbst ist nicht sichtbar, aber die Wirkung seines Schwerefeldes auf die vom Stern kommenden Lichtstrahlen. Diese werden etwas abgelenkt und insgesamt so gebündelt, dass die Helligkeit des Sterns ansteigt und völlig symmetrisch wieder abfällt, nachdem der dunkle Körper vorbeigezogen ist. Millionen von Sternen in der Großen Magellan'schen Wolke werden seit einigen Jahren überwacht. Ein Dutzend Mikrolinsenereignisse wurden bisher beobachtet. Daraus schließen die Forscher, dass etwa 30% der Masse des Halo in der Form kleiner, nichtleuchtender Himmelskörper vorhanden ist. Die restlichen 70% liegen wohl in der Form von exotischen Elementarteilchen vor.

Sterne und Elemente

In den ersten Vorstufen von Galaxien, die sich formten, als das Universum etwa ein Siebtel seiner heutigen Größe aufwies und 300-mal

dichter war als heute, entstanden auch die ersten Sterne. Im Inneren dieser massereichen Sterne wurden die schweren Elemente - Kohlenstoff, Sauerstoff, Eisen etc. - gebraut. Auch wir bestehen buchstäblich aus Sternenstaub. Jedes Kohlenstoff- und Sauerstoffatom in unserem Körper entstand im Inneren eines Sterns, wurde nach dessen Explosion in den interstellaren Raum geschleudert, um schließlich bei der Entstehung des Sonnensystems auf die Erde zu gelangen.

Sterne einer zweiten Generation, bei deren Entstehung schon die schweren Elemente zur Verfügung standen, und die nachfolgende Bildung von Planetensystemen, sind also eine Folge von Entwicklungsprozessen, die im frühen Universum begonnen haben.

Die riesige Zeitspanne von einigen Milliarden Jahren ist notwendig, damit die schwache Gravitationskraft genügend große Massen gegen den alles auseinander reißenden Ursprung der kosmischen Explosion konzentrieren kann. Der gleichmäßige Energiestrom eines Sterns wie unsere Sonne und die feste Oberfläche eines Planeten mit ihrer Konzentration schwerer Elemente schufen schließlich die Voraussetzungen für die Entstehung komplexer biologischer Strukturen.

Wie wir bereits sahen, ist dieses strukturierte Universum entstanden aus einer völlig anders erscheinenden Frühphase, in der im Wesentlichen ein heißes, ziemlich gleichförmiges Plasma expandierte. In diesem Zustand wurden aber die Bedingungen geschaffen, die unsere Welt entstehen ließen.

ELEMENTARTEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

Die fundamentalen Kräfte

Nach dem heutigen Verständnis der Physiker bestimmen vier Kräfte oder Wechselwirkungen das Erscheinungsbild der Materie: elektro-

magnetische, starke und schwache Wechselwirkung sowie **Gravitation**.

S.101 Diese Wechselwirkungen erscheinen in einer bemerkenswerten hierarchischen Gliederung: Die Größe der Atome, z.B. des Wasserstoffatoms von etwa 10^{-8} cm, ist in der Quantenmechanik bestimmt durch die elektromagnetische Wechselwirkung zwischen den positiv geladenen Protonen im Atomkern und den negativ geladenen Elektronen in der Hülle. Diese Größenbestimmung ist universell, d. h. alle Wasserstoffatome sind im stabilsten Zustand gleich groß. Die Nukleonen im Atomkern werden in ihrer Ausdehnung festgelegt durch die starke Wechselwirkung, die zwischen ihren fundamentalen Bausteinen, den Quarks, herrscht. Der Radius der Nukleonen wird so 10^{-13} cm. Im Inneren der Skala der Atomkerne spielt die elektromagnetische Wechselwirkung nur eine unwesentliche Rolle, während umgekehrt die starke Wechselwirkung nur auf diesen und auf kleineren Skalen wirksam ist und für die Struktur des Atoms keine Bedeutung hat. Die schwache Wechselwirkung erscheint nur als Korrektur zu diesen Kräften in Prozessen wie radioaktiven Zerfällen und allen Reaktionen, an denen Neutrinos beteiligt sind. (Die Neutrinos sind langlebige **Elementarteilchen** mit sehr kleiner Masse, die fast ungehindert normale Materie durchdringen und deshalb sehr schwer nachzuweisen sind. Die Sonne sendet einen Strom von Neutrinos aus ihrem Inneren zur Erde. Jeder von uns wird pro Sekunde und Quadratzentimeter Oberfläche von 60 Milliarden Neutrinos durchquert, glücklicherweise ohne etwas davon zu merken, denn die Neutrinos reagieren eben extrem schwach mit Materie.

S.89 Bis zur Dimension makroskopischer fester Körper bestimmen diese Wechselwirkungen und aus ihnen abgeleitete Kräfte die Strukturen. Die Gravitation ist in diesen Größenbereichen unmerklich schwach. Obwohl sich das Proton und das Elektron im Wasserstoffatom auch gravitativ gegenseitig anziehen, ist doch diese Kraft um viele Größenordnungen schwächer als die elektromagnetische Kraft. Die Gravitation wirkt aber zwischen allen Teilchen als Anziehungskraft und

nimmt mit dem Abstand nur langsam ab, während starke und schwache Wechselwirkungen auf Kerndimensionen beschränkt sind. Die elektromagnetische Kraft wird im Mittel abgeschirmt, da elektrische Ladungen verschiedenen Vorzeichens einander anziehen, während gleichartige Ladungen einander abstoßen. Deshalb sind makroskopische Körper elektrisch neutral, und daher wird schließlich die Struktur und Bewegung der Himmelskörper und des Universums durch die im Laboratorium vernachlässigbar kleine Gravitation bestimmt.

Die Elementarteilchentheoretiker haben im letzten Jahrzehnt gewisse Erfolge bei dem Versuch erzielt, diese Hierarchie der Wechselwirkungen zu verstehen. Besonders erfolgreich, auch experimentell, war der Ansatz, die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung aus *einer* gemeinsamen Ursache abzuleiten. Nach diesen Ideen soll die Verschiedenheit der Kräfte, die wir beobachten, bei genügend hohen Energien, d. h. kleinen Abständen, verschwinden, und elektromagnetische und schwache Wechselwirkung sollen oberhalb dieser Vereinheitlichungsenergie miteinander verschmelzen und gemeinsam die Strukturen bestimmen. Diese Schwelle liegt im experimentell zugänglichen Bereich, bei etwa der tausendfachen Massenenergie des Protons (10^3 GeV). Die Vorhersage der W- und Z-Teilchen und der experimentelle Nachweis dieser Teilchen im Jahre 1983 bei CERN, dem Europäischen Kernforschungszentrum in Genf, erhöhten natürlich das Zutrauen zu derartigen Spekulationen. Die starke Wechselwirkung wurde in einem analogen Schema mit einbezogen. Die Schwelle für diese großvereinheitlichten Theorien liegt bei etwa 10^5 GeV, ist also nicht in Beschleunigern, wohl aber im frühen Universum als thermische Energie erreichbar.

Wollte man die Gravitation in dieses Schema mit einbeziehen, so muss man die riesige Schwelle der so genannten »Planckenergie« von 10^9 GeV erreichen. Dies entspricht dem 10^{19} fachen der Massenenergie des Protons. Es ist aber bisher trotz über 50-jähriger vielfäl-

tiger Bemühungen nicht gelungen, eine Theorie aufzustellen, welche sowohl die von der Quantentheorie erfassten Eigenschaften der Materie als auch die Erklärung der Gravitation durch die Einstein'sche Theorie widerspruchsfrei enthält. Das Problem einer Verknüpfung der Einstein'schen Gravitationstheorie mit der Quantentheorie ist wohl das größte Hindernis auf dem Weg zu einer einheitlichen Theorie aller bekannten Wechselwirkungen.

Es ist ein interessanter Aspekt dieser neuen Vorstellungen von der verborgenen Einheit aller Kräfte, dass die physikalischen Größen, die eine Theorie bestimmen, wie die »Kopplungskonstanten«, welche die Stärke der zwischen den Teilchen herrschenden Kräfte festlegen, und die Massen der Elementarteilchen, nicht länger fest vorgegebene konstante Werte erhalten, sondern von ihrer Energie abhängen. Bei sehr hohen Energien soll die Welt durch eine fundamentale »vereinheitlichte« Theorie von hoher Symmetrie beschrieben werden. (Die Symmetrien einer Theorie sind einmal geometrischer Art, wie die Drehungen oder Verschiebungen im Raum, die bestimmte Konfigurationen unverändert lassen. Dann gehören aber verschiedene Umwandlungen der Teilchen und Felder dazu, wie etwa die Umwandlung aller Teilchen in ihre Antiteilchen. »Hohe Symmetrie« heißt, dass es viele derartige Transformationen gibt, unter denen sich die Theorie nicht ändert.)

Die Massen der Elementarteilchen sind in dieser Theorie gleich null, alle Kopplungskonstanten sind gleich. In den Übergängen, die zu weniger symmetrischen Systemen führen, verändern sich die Kopplungskonstanten, und die Elementarteilchen erhalten Massen, die vom Grundzustand, vom »**Vakuum**« der neuen Theorie bestimmt werden.

Im frühen Universum kamen alle möglichen Phasen wirklich vor. Ausgehend von einem extrem heißen, also hochenergetischen und symmetrischen Zustand kurz nach dem Urknall wurde der Kosmos wegen der Expansion und Abkühlung Schritt für Schritt unsymme-

trischer, aber auch reicher an Struktur. Schade nur, dass nahe beim Urknall keine Beobachter existierten, die hier ultimative experimentelle Kenntnisse hätten gewinnen können.

Baryonasymmetrie

Die kosmische Mikrowellenstrahlung enthält etwa 10 Milliarden Photonen auf ein Materienteilchen. Diese Zahl charakterisiert den jetzigen Zustand des Kosmos. In der heißen Ursbstanz, in der die Strahlung im Wesentlichen aus Teilchen und Antiteilchen bestand, bedeutete dies einen winzigen Überschuss von 10 Milliarden plus i Teilchen gegenüber 10 Milliarden Antiteilchen. Im Laufe der Expansion wurde die Ursbstanz kühler, Teilchen und Antiteilchen annihilierten sich zu Photonen, d.h. elektromagnetischer Strahlung, und es blieb der kleine Überschuss von eins zu einer Milliarde. Dem verdanken wir unsere Existenz! Man untersucht nun, ob diese kleine Unsymmetrie aus einem völlig symmetrischen Anfangszustand durch die Wechselwirkungen der Elementarteilchen erzeugt werden kann - vielleicht in einer vereinheitlichten Theorie. Neuere theoretische Untersuchungen lassen es als sehr plausibel erscheinen, dass diese kleine Asymmetrie erzeugt wird, wenn die elektroschwache Kraft sich aufspaltet in die schwache und elektromagnetische, bei etwa 1000 GeV. Zumindest konnte im Rahmen dieser Überlegungen gezeigt werden, dass jede etwa vorher vorhandene Asymmetrie durch diesen Übergang zerstört wird. Es stellt sich also der symmetrische Zustand ein mit gleicher Zahl von Teilchen und Antiteilchen. Die Konstruktion von Modellen, bei denen ein kleiner Rest von Teilchen nach der Annihilation übrig bleibt, ist schon in Ansätzen, aber noch nicht in überzeugender Weise, gelungen. Unsere Existenz ist aber ein deutlicher Hinweis, dass es möglich sein muss. Ein Modell der Baryonasymmetrie, das nur von fundamentalen Naturkonstanten bestimmt wäre, könnte auch als Test für die Physik des frühen Universums dienen.

DAS INFLATIONÄRE UNIVERSUM

Schwierigkeiten des Standardmodells

Das klassische Standardmodell des Urknalls weist eine Reihe von Feinabstimmungen auf, die nicht unmittelbar auf einfachere Bedingungen zurückgeführt werden können.

So darf die mittlere Dichte nicht zu stark vom kritischen Wert $\Omega=1$ abweichen, damit das Universum genügend lange existieren und genügend viel Struktur hervorbringen kann. In früheren Zeiten, bei Annäherung an den Urknall, muss die Dichte äußerst präzise in der Nähe dieses kritischen Wertes liegen. Bereits kleine Abweichungen würden zu frühem Kollaps führen (falls die Dichte zu groß wäre). Andererseits wäre bei zu kleiner Dichte ($\Omega << 1$) die Expansion so dominierend, die Verdünnung der Materie so stark, dass sich keinerlei Strukturen wie Galaxien oder Sterne bilden könnten.

Eine andere Schwierigkeit der Friedmann-Lemaître-Modelle ist die Existenz kausal getrennter Gebiete, d.h. Verbindungen mittels Lichtsignalen können nur zwischen Punkten hergestellt werden, deren Abstand klein ist im Vergleich zur Größe des Universums.

Im anschaulichen Bild des expandierenden Luftballons lässt sich der Horizont eines Punktes - also die mit Lichtstrahlen erreichbaren Orte - darstellen als Kreis auf der Ballonfläche. Der Radius dieses Kreises wächst im strahlungserfüllten Universum quadratisch mit dem Radius des Luftballons an. Verfolgen wir die Expansion zurück in die Vergangenheit, so schrumpft also der Horizont schneller als jede Länge auf der Kugelfläche, die sich ja proportional zum Radius $R(t)$ ändert. Punkte, die sich jetzt innerhalb dieses Horizontkreises befinden, lagen alle zu ausreichend früher Zeit außerhalb.

Als Folge davon lässt sich leicht ausrechnen, dass um 180 Grad getrennte Gebiete am Himmel bis zur Entkopplungszeit (400000 Jahre nach dem Urknall) nicht kausal verknüpft waren. Trotzdem hat die

Strahlung in allen Richtungen dieselbe Temperatur. Wenn man nicht an Anfangsbedingungen appellieren will, so muss es ein Rätsel bleiben, wie diese Gleichförmigkeit der Strahlung entstand. Die jetzige Horizontdimension beträgt 1000 Mpc , aber nur 300 kpc zur Entkopplungszeit t_R . Eine Längenskala L , die zur Zeit t_R innerhalb des Horizonts lag, d.h. kausal verknüpfte Punkte verbunden hat, kann bis zur Gegenwart höchstens anwachsen auf 300 Mpc ($\frac{R(t_0)}{R(t_R)} \times 0,3 \text{ Mpc}$). Bei größeren Objekten hätte man wohl Schwierigkeiten, die Entstehungsgeschichte allein aus physikalischen Prozessen zu erklären. Das kosmische Strahlungsfeld etwa war zur Entkopplungszeit noch in 40 Horizontlängen unterteilt. Das Modell des so genannten »inflationären Universums« versucht zu erklären, wie durch die Abänderung der Expansionsgeschwindigkeit in einem sehr frühen Stadium (10^{-43} Sek. oder 10^{-35} Sek. nach dem Urknall, je nach Modell) das uns zugängliche Universum notwendigerweise den kritischen Wert der Dichte erreicht und auch keine Horizontprobleme mehr hat.

Das Inflationsmodell

In den Entwürfen zu einer vereinheitlichten Theorie der Elementarteilchen treten bestimmte Feldgrößen auf, so genannte skalare »Higgs-Felder«, die durch ihre Wechselwirkungen dafür sorgen, dass schließlich aus einer einzigen Urkraft die heutige beobachtete Hierarchie der fundamentalen Kräfte entsteht. Obwohl die Existenz derartiger Felder experimentell noch nicht nachgewiesen werden konnte, wird doch durch diese Theorien ein Bild nahegelegt, in dem auch das frühe Universum von skalaren Feldern erfüllt ist. (»Skalar« bedeutet, dass diese Größen durch einen Zahlenwert an jedem Raumzeitpunkt gegeben sind.)

Zu Anfang befand sich der Kosmos in einer Phase hoher Symmetrie, der man auch eine hohe Energie des Feldes zuschreibt. Im Zuge fortschreitender Expansion und Abkühlung wird ein Zustand niedri-

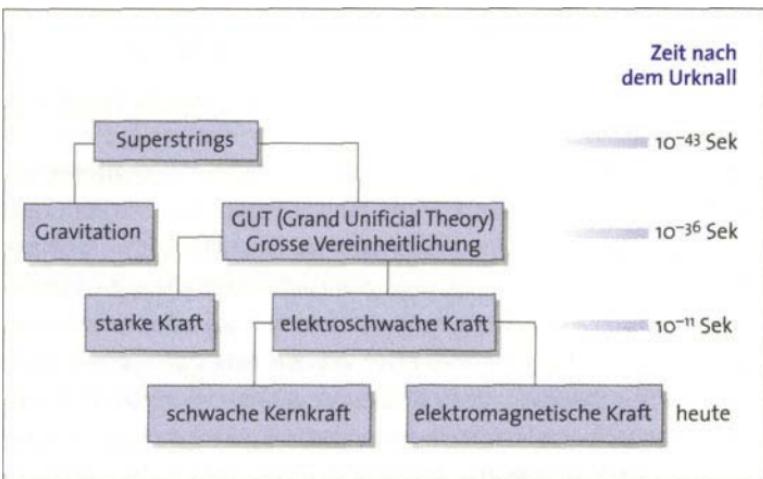


Abb. 21: Die Aufspaltung der Kräfte im Laufe der kosmischen Entwicklung ist schematisch dargestellt.

ger Energie bevorzugt, der zu dem hierarchisch gegliederten Aufbau der Wechselwirkungen gehört. Läuft nun dieser Übergang aus der symmetrischen in die unsymmetrische Phase nicht unmittelbar ab, sondern ereignet sich allmählich oder verzögert, so kann die Energiedifferenz zwischen den verschiedenen Zuständen des Skalarfeldes auch die kosmische Expansion beeinflussen. Die Expansion kann sogar vollkommen durch diese Größe bestimmt werden, dann nämlich,

wenn die Energiedichte der Strahlung, die ja mit der Expansion abnimmt, weit unter diese Energiedifferenz abgesunken ist. Es könnte auch, wie in einigen Modellen untersucht wurde, einen Anfangszustand des Universums geben, der völlig von skalaren Feldern und deren Energiedichten dominiert wird und in dem die Strahlung energetisch keine Rolle spielt. Der hochenergetische, hochsymmetrische Grundzustand wird oft als »falsches Vakuum« bezeichnet, um anzudeuten, dass er nicht von Dauer ist, da sich das Feld in die energetisch günstigere, tiefere Konfiguration begeben wird.

Die Energiedichte des »falschen Vakuums« hat eine sehr bemerkenswerte Eigenschaft, die ganz verschieden von dem Verhalten normaler Materie ist. Während bei der Ausdehnung eines mit normaler Materie gefüllten Volumens die Energiedichte abnimmt, bleibt die Energiedichte des falschen Vakuums bei der Expansion konstant, verdünnt sich also nicht. Es ist ja der Grundzustand der Welt, das »Vakuum«, das durch den jeweiligen Wert der Higgs-Felder bestimmt ist. Auch während der kosmischen Expansion besteht natürlich das Bestreben, in diesem Grundzustand zu bleiben. Diese Eigenschaft ist begründet in der Beziehung zwischen Druck und Dichte dieses merkwürdigen Materials, bei dem der Druck gleich der negativen Dichte ist. Volumenvergrößerung ist damit gleichbedeutend mit Arbeit gegen den negativen Druck, bedeutet also Energiegewinn. Falls man diese besondere Eigenschaft des falschen Vakuums mit den Gleichungen für die kosmologischen Modelle verknüpft, so findet man, dass in einer Epoche, in der die Energiedichte des falschen Vakuums überwiegt, die kosmische Expansion nicht abgebremst, sondern beschleunigt wird, d. h. diese Energiedichte bewirkt eine Abstoßung.

Alle 10^{-35} Sekunden etwa verdoppelt sich der Abstand zweier Teilchen in üblichen Inflationsmodellen. Zwischen 10^{-35} Sekunden und einigen 10^{-32} Sekunden ist durch die »inflationäre Expansion« der Abstand um den Faktor 10^{29} vergrößert worden. In diesem kurzen Zeitraum wäre er im Standardmodell nur auf das Hundertfache angewachsen (Abb. 22).

Während dieser kurzen Zeitspanne wurden alle Objekte, die vor der Inflationsepoke vorhanden waren, ausgedünnt, ihre Dichte wurde vernachlässigbar klein. Auch die Temperatur sank um den Inflationsfaktor ab. Die Krümmung der Raumzeit wurde geglättet, wie die Runzeln in einem Ballon, wenn man ihn aufbläst.

Die inflationäre Phase bestand, während das Skalarfeld sich im falschen Vakuumzustand befand, sie ging zu Ende, sobald das Feld sein

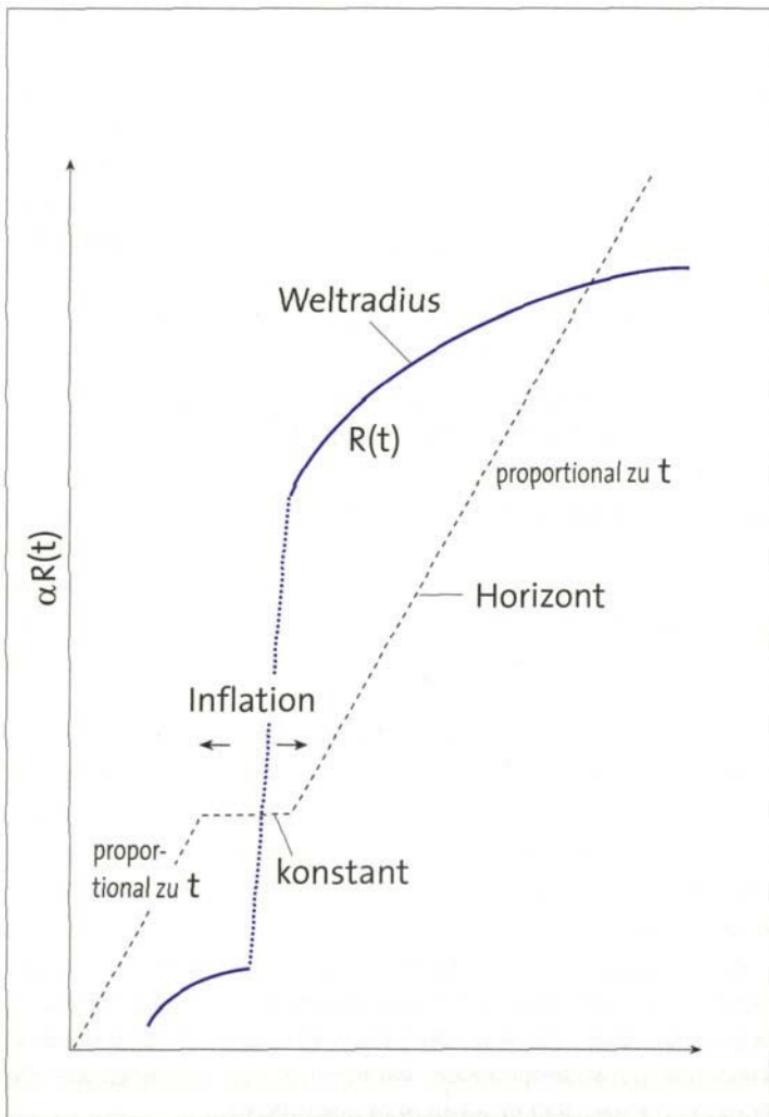


Abb.22: Im inflationären Modell erfährt der Weltradius für kurze Zeit ein rasantes Wachstum, während der Horizont (gestrichelte Linie) konstant bleibt.

Minimum erreicht hatte. In der Endphase wurde die Energiedichte des falschen Vakuums freigesetzt, der inflationäre Bereich füllte sich mit einem Gas heißer Teilchen und Strahlung. Von diesem Zeitpunkt an entwickelte sich der Kosmos wie im Standardmodell der Kosmologie, aber mit Anfangsbedingungen, die zumindest teilweise durch physikalische Prozesse bestimmt waren. Dieser »Neuanfang« erfordert auch, dass alle Materie, Energie und Entropie des beobachteten Teils des Universums durch die Expansion und den Zerfall des falschen Vakuums erzeugt wurden.

Es ist aber nicht nötig, dass die gesamte Raumzeit diesen Prozess durchlief. Tatsächlich könnte der gesamte gegenwärtig beobachtete Kosmos aus einem sehr kleinen Anfangsbereich entstanden sein. Stellen wir uns vor, dass in einem vielleicht sogar chaotischen Universum ein kleines Gebiet relativ homogen strukturiert war, mit einem Wert des Skalarfeldes weit weg vom Minimum der Energie. Dieser Bereich konnte dann eine Phase exponentieller Expansion erfahren und dadurch enorm anwachsen.

Wie groß müsste dieser Bereich sein, um das gesamte gegenwärtige beobachtbare Universum zu erfassen? Vom heutigen Zustand des Kosmos mit einer Temperatur von $2,7K$ und einer typischen Ausdehnung von $10000\ Mpc$ (etwa 10^{28}cm) können wir auf die Epoche am Ende der Inflation zurückrechnen. Der beobachtete Teil des Kosmos hätte damals eine Ausdehnung von etwa 10cm . Die Inflation mit einer Ausdehnung um einen Faktor 10^{29} bedeutet, dass der Anfangsbereich, der Keim, aus dem unser Universum entstanden ist, eine Dimension von etwa 10^{-18}cm hatte, kleiner als der Horizont $\frac{c}{H}$ zur Zeit $t = 10^{-35}$ Sekunden. In vielen Modellen für eine inflationäre Epoche (wie z.B. in Lindes »chaotischer Inflation«) ergeben sich sogar wesentlich höhere Ausdehnungsfaktoren. Die inflationäre Epoche führt also zu einem Entwicklungsbild des Kosmos, in dem das beobachtete Universum aus einem kleinen, kausal verknüpften Bereich stammt. Unser Kosmos wäre ein winziger Ausschnitt einer größeren Struktur.

Lösung der kosmologischen Rätsel

Das Kausalitätsproblem des Standardmodells wird einer Erklärung zugänglich: Der Bereich, der sich zum heute beobachtbaren Universum entwickelte, lag vor der Inflation innerhalb eines Horizontvolumens. Physikalische Prozesse hatten also genügend Zeit, eine gleichmäßige Energiedichte herzustellen.

Als eine Konsequenz der Inflationsepoke entwickelt sich die Dichte sehr präzise auf den kritischen Wert hin, auf einen Wert des Dichteparameters $\Omega = 1$. Dies liegt einfach daran, dass die Krümmung der Raumzeit durch die starke Dehnung aller Abstände während der Inflation verschwindend klein wird. In vielen Fällen »überschließt« die Inflation, d.h. die Dehnungsfaktoren sind noch wesentlich größer als 10^{29} . Man kann die Aussage $\Omega = 1$ als eine Folge der Inflation ansehen, eine Vorhersage, die für einen weiten Bereich von Anfangsbedingungen gilt.

Die mittlere Dichte im inflationären Modell wäre völlig homogen und gleichmäßig, wenn nicht die Quantennatur der Materie in frühesten Epochen Anlass zu kleinen Schwankungen der Energiedichte gäbe. Diese Quantenfluktuationen führen im inflationären Modell zu Dichteinhomogenitäten, aus denen sich viel später Galaxien bilden können. Es scheint, dass ein Inhomogenitätsspektrum entsteht, bei dem der Überschuss an Masse in einem bestimmten Volumen proportional zur Längendimension dieses Volumens abnimmt. Das passt zu den Messungen der CMB-Anisotropien.

Chaotische Inflation

Im »chaotischen Modell«, das der jetzt in Stanford lebende russische Physiker Andrei Linde 1985 formulierte, beginnt das Universum in einem Zustand völliger Unordnung kurz nach der Planckzeit, angefüllt mit Skalarfeldem, die alle möglichen Werte annehmen (**Einheiten**).

Gelegentlich entsteht ein kleiner Bereich, der die Inflationsepoke durchlaufen und um einen riesigen Faktor aufgebläht werden kann. In phantasievoller Weise hat Andrei Linde dieses Bild weiter gezeichnet und betont, dass durch Quantenfluktuationen immer wieder Bereiche entstehen könnten, die eine Inflationsepoke durchlaufen. Jeder dieser Bereiche führt schließlich zum Start eines »UrknaU Universums«. Andere Gebiete des falschen Vakuums expandieren unterdessen weiter. Das falsche Vakuum verschwindet nicht, sondern das Volumen, in dem falsches Vakuum herrscht, wächst sogar mit der Zeit an. Auf diese Weise würden unendlich viele Universen entstehen, die wegen der exponentiellen Expansion des falschen Vakuums rasch kausal getrennt wären. Wir könnten nicht nachprüfen, nicht einmal im Prinzip, ob diese Blasen eines anderen Universums wirklich existieren. Die Inflation könnte also ein kontinuierlicher Prozess sein, ohne Anfang und ohne Ende. Eine Blase aus dieser unendlichen Anzahl böte schließlich die Bedingungen, die zu unserem lebenspendenden Kosmos führen. Solche Bilder können sehr attraktiv erscheinen; es ist aber schwierig, sie quantitativ physikalisch zu beschreiben.

Kritische Anmerkungen

Zunächst sollten wir uns darüber im Klaren sein, dass die Modelle für Inflation eine merkwürdige Mischung aus klassischer Physik und Quantenphysik darstellen. Das Skalarfeld wird beschrieben wie ein Punktteilchen der klassischen Mechanik, seine Quanteneigenschaften werden eigentlich nicht behandelt. Nur die Existenz von zwei verschiedenen Vakuumzuständen wird benutzt. Es ist auch noch nicht gelungen, ein funktionierendes Inflationsmodell aufzustellen, das in engem Zusammenhang mit einer fundamentalen Quantenfeldtheorie steht. In der einschlägigen Literatur wird zwar eifrig behauptet, die Inflation entstehe durch die Symmetriebrechung einer

fundamentalen Quantenfeldtheorie und den damit verbundenen Phasenübergängen, tatsächlich konnte aber bisher kein Modell dieser Art konsistent formuliert werden.

Das »inflationäre Modell« des Universums löst auch nicht wirklich das Problem des einzigartigen Anfangszustandes. Es postuliert stattdessen eine statistische Verteilung von Konfigurationen. Leider ist es bis jetzt auch nicht gelungen, nichtsymmetrische Startbedingungen wirklich rechnerisch in ihrer Entwicklung zu beschreiben. Nach wie vor müssen - zwar nur in einem kleinen Gebiet - sehr präzise bestimmte Bedingungen erfüllt sein. Der Startwert des Skalarfeldes muss ad hoc - als Anfangsbedingung - eingesetzt werden. Er bestimmt aber entscheidend den Verlauf der Inflation.

Eine ganzfundamentale Schwierigkeit betrifft schließlich die Vakuumenergiedichte der Skalarfelder, die im frühen Universum dynamisch wirksam ist und die inflationäre Expansion antreibt. Das Problem kann man sich mit einer einfachen Abschätzung verdeutlichen: Fassen wir die aus den CMB-Schwankungen erschlossene »Dunkle Energie« als Vakuumenergiedichte auf, so erreicht diese etwa 70% der kritischen Dichte. Die Energiedichte des falschen Vakuums in der Inflationsepoke ist aber um 120 Zehnerpotenzen größer.

Natürlich darf auch das Vakuum der Quantentheorien, die die starke, schwache oder elektromagnetische Wechselwirkung beschreiben, nicht gravitativ wirksam sein. Die typischen Energiedichten sind so groß, dass sich unmittelbar Widersprüche zu den astronomischen Beobachtungen ergäben. Versucht man etwa - wie Wolfgang Pauli um 1920 - die Nullpunktenergie des elektromagnetischen Feldes als kosmologisch bedeutsame Energiedichte zu betrachten, so erhält man aus den Gleichungen ein Modell des Universums, dessen Ausdehnung kleiner ist als die Entfernung von der Erde zum Mond. Dies zeigt, wie schwierig dieses Problem ist.

Man kann mit Recht fragen: Warum sollte das Vakuum jetzt nicht gravitativ wirksam sein, aber in einer frühen kosmischen Phase die

Entwicklung bestimmt haben? Eine Antwort auf diese Frage brächte sicher einen wesentlichen Fortschritt in unserem Verständnis vom Anfang der Welt.

WELTENTSTEHUNG

Die Möglichkeiten der Physik

In der Theorie des frühen Universums können wir mit einiger Sicherheit nur die physikalischen Prozesse beschreiben, die später als eine Sekunde nach dem Urknall abliefen. Alle früheren Zeitpunkte sind allein der mehr oder weniger gut begründeten spekulativen Überlegung zugänglich. Wir haben diskutiert, welche Möglichkeiten sich ergeben, wenn versucht wird, bestimmte theoretische Überlegungen der Quantentheorie mit dem frühesten Zustand des Kosmos zu einem konsistenten Bild zusammenzufügen. Allerdings wird auch in diesen Überlegungen nach wie vor der singulare Beginn ausgeklammert und dem Urknall werden bestimmte Bedingungen für die Struktur der Materie und Strahlung unterstellt, die letztendlich zum heute beobachteten Zustand der Welt führen sollen. Die Frage des Physikers nach der Weltentstehung ist also im Wesentlichen die Frage, welche Anfangsbedingungen gestellt werden müssen. Die Welterklärung erscheint umso überzeugender, je weniger derartige Bedingungen notwendig sind, oder je allgemeiner der Anfangszustand charakterisiert werden kann. Auch das Modell des inflationären Universums in seinen verschiedenen Spielarten geht von bestimmten Anfangskonfigurationen aus. Eine wesentliche Voraussetzung ist ja, dass Inflation überhaupt stattfinden kann. Dies ist gewiss nicht für beliebige Anfangszustände möglich.

Im frühesten Universum bei extrem hohen Dichten, Temperaturen und Raumkrümmungen müssen nicht nur Quanteneigenschaften der Materie in Betracht gezogen werden, auch das ganze Universum

selbst wird in einem gewissen (im Augenblick noch etwas verschwommenen) Sinn ein Quantenobjekt. Nur eine übergeordnete Theorie, die Quantenmechanik und Gravitation umfasst, erlaubt weitergehende Aussagen über den Anfang des Universums.

In dieser Situation, in der die Physik zunächst an Grenzen stößt, wurde versucht, weitergehende Einsichten in die Struktur des Kosmos zu gewinnen aus Argumenten, die die Bedingungen für die Entstehung von Leben unserer Art im Universum diskutieren. Einige dieser Gesichtspunkte werden üblicherweise unter der Bezeichnung »Anthropisches Prinzip« zusammengefasst werden.

Das anthropische Prinzip

Es gibt in unserer Welt eindrucksvolle Beispiele für numerische Feinabstimmungen, deren Zusammenwirken Leben von unserer Art (auf Kohlenstoff basierend) möglich macht.

So kann die Stärke der anziehenden Kernkräfte gerade die elektrische Abstoßung zwischen den positiv geladenen Protonen in den Kernen gewöhnlicher Atome, wie Sauerstoff oder Eisen, überwinden. Die Kernkraft ist aber nicht ganz so stark, dass sie zwei Protonen (Wasserstoffkerne) in ein gebundenes System bringen kann; das »Diproton« gibt es nicht. Falls jedoch die Anziehung der Kernkräfte nur ein wenig größer wäre, könnte das Diproton existieren, und praktisch der gesamte Wasserstoff im Kosmos hätte sich zu Diprotonen oder größeren Kernen gebunden. Wasserstoff wäre ein seltenes Element und Sterne wie die Sonne - die durch langsame Fusion von Wasserstoff zu Helium in ihrem Inneren lange Zeit Energie erzeugen - könnte es nicht geben.

Andererseits würden wesentlich schwächere Kernkräfte die Fusion von Wasserstoff unmöglich machen. Falls die Entwicklung des Lebens einen Stern wie die Sonne erfordert, die mit einer konstanten Rate über Milliarden Jahre hinweg Energie erzeugt, dann ist eine notwen-

dige Voraussetzung dafür, dass die Stärke der Kernkräfte innerhalb ziemlich enger Grenzen liegt.

Eine ähnliche, aber unabhängige numerische Feinabstimmung betrifft die Schwache Wechselwirkung, die tatsächlich die Wasserstoff-Fusion in der Sonne steuert. Die Schwache Wechselwirkung ist etwa eine Million Mal schwächer als die Kernkraft, gerade so schwach, dass der Wasserstoff in der Sonne langsam und gleichmäßig verbrennt. Falls die Schwache Wechselwirkung wesentlich stärker oder schwächer wäre, gäbe es Probleme für jede Art von Leben, das von sonnenartigen Sternen abhängt.

Eine weitere numerische Zufälligkeit betrifft die mittlere Entfernung zwischen den Sternen, die in unserer galaktischen Umgebung einige Lichtjahre beträgt. Man kann durchaus behaupten, dass den Sternen ein entscheidender Einfluss auf das menschliche Leben zu kommt, ohne ein Anhänger der Astrologie zu sein. Wir hätten nämlich keine großen Überlebenschancen, wenn die mittlere Entfernung zwischen den Sternen beispielsweise 10-mal kleiner wäre. Dann ergäbe sich eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass im Verlauf der vergangenen 4 Milliarden Jahre ein anderer Stern nahe genug gekommen wäre, um die Planetenbahnen zu verändern. Es würde schon genügen, die Erde in einen mäßig exzentrischen elliptischen Umlauf zu bringen, um Leben auf ihr unmöglich zu machen.

Man könnte viele weitere glückliche Zufälle dieser Art aufzählen: Eine empfindliche Balance zwischen elektrischen und quantenmechanischen Kräften bewirkt die Vielfalt der organischen Chemie. Wasser ist flüssig, Ketten von Kohlenstoffatomen bilden komplexe organische Moleküle, Wasserstoffatome bilden Brückenbindungen zwischen den Molekülen.

Diese bemerkenswerte Harmonie zwischen der Struktur des Universums und den Bedürfnissen von Leben und Intelligenz aufzuzeigen, ist das Anliegen, das als »schwaches anthropisches Prinzip« formuliert wurde. Dies ist einfach die Feststellung, dass unsere Existenz

nur unter gewissen Bedingungen möglich ist. Man sollte sich aber davor hüten, diese anregenden Betrachtungen als »Prinzip« im Sinne einer physikalischen Erklärung anzuwenden. Besonders aber die Vorstellung einer zielgerichteten Entwicklung, die auf die Entstehung menschlichen Lebens eingestellt ist, wie es das so genannte »starke anthropische Prinzip« aussagt, führt sicher zu weit. Tatsächlich drehen die »Erklärungen« des starken anthropischen Prinzips den Kausalzusammenhang um. Der zeitliche Ablauf und der Zusammenhang von Ursache und Wirkung sind eben so, dass gewisse Feinabstimmungen notwendig sind für die Existenz von Leben. Der Schluss gilt aber nicht in umgekehrter Richtung. Das »schwache anthropische Prinzip« dagegen zeigt nur einige der Relationen auf, ohne die das Leben nicht entstehen könnte. Es erklärt nicht, sondern weist darauf hin, dass in einigen Punkten Erklärungsbedarf besteht.

Es ist auch nicht ausgeschlossen, dass durch die Weiterentwicklung der Physik viele dieser Relationen als zwangsläufige Folge grundlegender physikalischer Gesetze erkannt werden. Das Standardmodell der elektroschwachen Theorie zeigt durchaus einen Weg, wie das Verhältnis der elektromagnetischen und der schwachen Kräfte, das wir jetzt beobachten, auf ein fundamentales, beide einschließendes Naturgesetz zurückgeführt werden kann. Herleitungen dieser Art, wenn auch wesentlich spekulativer, gibt es ebenfalls in den GUT (den »großen vereinheitlichten«) Theorien. Wir sind mit der physikalischen Erklärung noch nicht am Ende angelangt. Es wäre ja auch vermessen zu glauben, dass gerade jetzt alle Naturgesetze bekannt und verstanden sind. Man sollte diese anthropischen Argumente als Hinweise auf Erklärungslücken sehen und sich bemühen, in diesen Punkten Fortschritte zu erzielen.

Das von Andrei Linde entworfene Bild eines Universums aus vielen Blasen, die nicht kausal verknüpft sind und in denen jeweils verschiedene physikalische Gesetze, verschiedene Naturkonstanten wirken könnten, wäre ein zumindest logisch möglicher Abschluss

dieser Erklärungsversuche: Unter der Vielzahl möglicher Blasen gibt es eben eine, die genau die richtigen Voraussetzungen zur Entstehung von Leben bietet. Wie es unter vielen Millionen Lottospielern einen oder mehrere gibt, die 6 »Richtige« tippen, so findet sich zufällig auch einmal die richtige Kombination von Naturgesetzen und Naturkonstanten in einem Blasenuniversum. Aber ist das nicht ein bisschen viel Aufwand - Milliarden von Universen blähen sich auf und vergehen, und dadurch wird es möglich, dass auf einem kleinen Planeten am Rande einer Galaxis Leben entstehen kann?

Diese Erklärung scheint mir, abgesehen von den Schwierigkeiten, sie präzise zu beschreiben, unbefriedigend, weil ich doch gerne wüsste, ob diese vielen Möglichkeiten nicht vielleicht durch noch nicht gefundene physikalische Gesetze eingeschränkt werden, ob nicht letzten Endes doch ein fundamentales, alles umgreifendes Gesetz eindeutig zu einem physikalisch bestimmten Universum führt.

Die Auswahl des Anfangszustands

Thermodynamische Überlegungen sprechen dafür, dass der Anfangszustand der Welt sehr gleichmäßig und einheitlich strukturiert war, dass er nicht einem chaotischen Beginn entsprechen kann. Bei diesen Überlegungen spielt der Begriff der »Entropie« eine wichtige Rolle. Aus unserer Alltagserfahrung wissen wir, dass viele Vorgänge nicht umkehrbar sind: Ein Glas Wasser, das vom Tisch zu Boden fällt und zerbricht, zeigt das normale und erwartete Verhalten. Dagegen würde uns die Umkehrung, bei der sich die Glassplitter und das zerflossene Wasser wieder sammeln und in der ursprünglichen Form auf dem Tisch aufbauen würden, sicher sehr verblüffen. Die Gesetze der Mechanik lassen diese Umkehrung der zeitlichen Entwicklung als mögliche Lösung zu. Tatsächlich aber geschehen die Dinge von selbst immer so, dass ein geordneter Zustand in einen ungeordneten Zustand übergeht. Die »Entropie« wird als Maß für die Unordnung

in einem System eingeführt und die Alltagserfahrung wachsender Unordnung entspricht dem Gesetz von der Zunahme der Entropie (der so genannte »zweite Hauptsatz« der Thermodynamik). Man könnte vermuten, dass für diesen Entropiebegriff die subjektive Bewertung eine Rolle spielt, so wie ein Künstler oder ein Physiker unterschiedlich darüber urteilen könnten, ob mehr Ordnung im unversehrten oder im zerbrochenen Glas sei. Wie kann die Entropie eines physikalischen Systems als objektive Messgröße definiert werden? Aus welchen Eigenschaften des physikalischen Zustandes wird dieser Begriff abgeleitet?

Die Physiker geben Begriffen wie Energie, Druck, Temperatur eine präzise Bedeutung durch die Reduktion des betrachteten Systems auf eine Ansammlung von Teilchen, deren Orte, Geschwindigkeiten, Massen und Wechselwirkungen einen bestimmten Zustand eindeutig charakterisieren. Allerdings gibt es im Allgemeinen viele genau bestimmte Zustände, die alle zur gleichen Energie oder zur gleichen Temperatur des Systems führen, denn dazu müssen lediglich die Geschwindigkeiten der Teilchen innerhalb gewisser Grenzen bleiben, können ansonsten aber frei variieren.

Eine mathematisch bequeme, abstrakte Beschreibung einer Konfiguration aus N Teilchen ist der so genannte Phasenraum, in dem jedes Teilchen durch drei Orts- und Geschwindigkeitskoordinaten dargestellt wird. Für N Teilchen hat der Phasenraum also $6N$ Dimensionen. Die Zustände mit bestimmter Energie oder Temperatur füllen ein gewisses Volumen im Phasenraum aus. So ist beispielsweise ein Gas in einem Behälter durch Druck und Temperatur bestimmt. Der größte Teil des Phasenraums entspricht in diesem Fall einer gleichmäßigen Verteilung der Teilchen im Behälter und einer ziemlich zufälligen und ungeordneten Bewegung, dem thermischen Gleichgewicht. In einem Behälter von im^3 Volumen hat die Konfiguration, in der sich alle Gasteilchen in einer Ecke des Behälters im Volumen von $1cm^3$ befinden, ein Phasenraumvolumen, das um einen

Faktor 10^{-25} kleiner ist, als der Bereich des thermischen Gleichgewichts.

Die Entropie, nennen wir sie wie üblich S , wird in diesem präzisen Sinne durch den Logarithmus des Volumens im Phasenraum angegeben. (Man definiert die Entropie durch den Logarithmus, damit die Zahlen, mit denen man hantiert, nicht so riesig werden. Das Phasenraumvolumen ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Zustand realisiert werden kann. Es ist groß für völlig ungeordnete Zustände und klein für sehr gleichförmige, geordnete.)

Im Beispiel des Glases, das zu Boden fällt, kommt der überwiegende Anteil des Entropiemaßes von den zufälligen Bewegungen der Teilchen, die den winzigen Temperaturanstieg und das Zerfließen des Wassers hervorrufen, wenn das Glas zu Boden fällt. Der Unterschied zwischen dem unversehrten und dem zersplitterten Glas spielt keine Rolle.

Im heutigen Zustand des Universums ist die Entropie festgelegt durch das Strahlungsfeld der kosmischen Mikrowellenstrahlung. Die Zunahme der Entropie (anschaulich gesagt, der Anteil der völlig ungeordneten Strahlung und Materie) im Laufe der Zeit charakterisiert unsere Welt. Dies kann nur bedeuten, dass der unserer Beobachtung zugängliche Teil der Welt sich aus einem Anfangszustand sehr niedriger Entropie entwickelt hat. Da Materie und Strahlung völlig im Zustand thermischen Gleichgewichts waren, also im Zustand maximaler Entropie, muss dies eine Bedingung an die Entropie des Gravitationsfeldes sein.

Um einen Eindruck vom Entropievorrat der Gravitation zu bekommen, betrachten wir Extremzustände: die **Schwarzen Löcher**, in Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie vorhergesagte Endzustände massereicher Sterne. Ihre Masse ist in einem zentralen Punkt konzentriert, der umgeben ist von einem Horizont, einer Fläche, die den Massepunkt vom Außenraum abtrennt, denn kein Signal kann den Horizont durchqueren.

S.106

Nach einer Überlegung von Bekenstein und Hawking ist die Entropie eines Schwarzen Lochs proportional zu seiner Oberfläche, die wiederum dem Quadrat der Masse proportional ist. Die Entropie pro Masseneinheit eines Schwarzen Lochs ist also proportional zu dessen Masse, sie wächst mit der Masse des Schwarzen Lochs an. Deshalb ist für eine vorgegebene Masse, oder äquivalent für eine vorgegebene Menge an Energie, die größte Entropie erreicht, wenn das Material zu einem Schwarzen Loch kollabiert ist.

Die Entropie der Hintergrundstrahlung beträgt etwa 10^{10} pro Wasserstoffatom, also bei 10^{80} solchen Atomen im beobachtbaren Universum 10^{80} (in natürlichen Einheiten). Die Entropieerzeugung in üblichen physikalischen Prozessen ist völlig vernachlässigbar gegenüber dieser Strahlungsentropie. Die Entropie pro Kernteilchen in der Sonne ist etwa 1, ebenso wie die Entropiesteigerung in einer Supernovaexplosion Werte von 10 nicht überschreitet. Doch im Vergleich zu den Möglichkeiten eines Schwarzen Lochs ist selbst diese Strahlungsentropie völlig unbedeutend. Die Bekenstein-Hawking-Formel gibt einen Wert für die Entropie in natürlichen Einheiten von 10^{20} pro Baryon in einem Schwarzen Loch von der Masse der Sonne. Falls das Universum völlig aus Schwarzen Löchern von Sonnenmasse bestünde, so ergäbe dies eine Gesamtentropie von 10^{100} . Natürlich ist das Universum nicht so aufgebaut, doch diese Zahl deutet an, wie groß die im Gravitationsfeld, in den Irregularitäten und Krümmungen der Raumzeit enthaltene Entropie sein kann, im Vergleich zur Entropie des Strahlungshintergrundes. Falls wir uns ein wieder kontrahierendes Universum vorstellen, das schließlich in einer Endsingularität verschwindet, einem riesigen Schwarzen Loch, so finden wir eine Gesamtentropie von 10^{120} . Dies wäre wohl auch die Entropie, die in einem chaotischen Anfangsurknall zur Verfügung stünde. Warum ist die Entropie unseres Universums so klein im Vergleich zu den durch die Gravitation ermöglichten Werten? Können wir für diese äußerst präzise bestimmten Anfangsbedingungen noch eine Erklärung im

Rahmen der physikalischen Gesetze finden? Für den Phasenraum bedeutet dies, dass es $10^{10^{120}}$ verschiedene Möglichkeiten für das Universum gegeben hat, sich zu strukturieren. Jede dieser Möglichkeiten hat demnach eine extrem winzige Wahrscheinlichkeit von eins zu $10^{10^{120}}$. Die erforderlichen Anfangsbedingungen für das Universum, wie wir es kennen, stellen nur eine von $10^{10^{120}}$ Möglichkeiten dar.

Wie kann man ein Auswahlprinzip finden, das hier wirksam sein könnte? Das anthropische Prinzip ist zu unscharf. Eine Präzision von eins zu 10^{68} wäre mehr als ausreichend, um aus passend angeordneten Teilchen unser gesamtes Sonnensystem mit der Erde und all ihren Lebewesen zu schaffen. Das anthropische Prinzip kann eine Genauigkeit von eins zu $10^{10^{120}}$ nicht erklären.

Auch das inflationäre Modell stößt hieran seine Grenzen. Damit Inflation beginnen kann, muss zumindest ein kleiner gleichförmiger Bereich von der Ausdehnung H^{-1} vorhanden sein. Dies erfordert bereits eine Forderung extremer Gleichmäßigkeit an das Gravitationsfeld. Bei allgemeinen Anfangsbedingungen kann auch die Inflation nicht zu dem von uns beobachteten Universum führen. Roger Penrose, der englische Mathematiker, schließt daraus, dass es eine Bedingung an die Glattheit und Gleichförmigkeit der Raumzeitgeometrie im Urknall geben muss.

Da es bei diesen Überlegungen entscheidend auf die Struktur der **Raum-Zeit-Singularität** ankommt, kann wohl nur eine noch zu findende Theorie der Quantengravitation eine Erklärung liefern. Bis jetzt gibt es keine konsistente oder glaubhafte Theorie der Quantengravitation, doch müsste eine solche Theorie wohl dem Urknall eine Bedingung extremer Gleichmäßigkeit aufzwingen. Die Gravitation darf nichts zur Entropie beitragen. Vielleicht wäre aber dieses Entropieargument in einer Theorie der Quantengravitation wesentlich anders als das hier geschilderte, auf dem klassischen Raum-Zeit-Begriff beruhende Bild.

S.106

Hawking's Vorschlag

Da in der Nähe der Singularität sowohl die Einstein'sche Gravitationstheorie als auch die übliche Quantentheorie das Universum nicht mehr in konsistenter Weise beschreiben, müsste man abwarten, bis die korrekte übergeordnete Theorie der Quantengravitation gefunden ist. Wie erwähnt, ist eine derartige Theorie noch nicht erkennbar. So erscheint es legitim, verschiedene Tastversuche im unbekannten Neuland zu wagen und durch geschickte Definitionen eine Beschreibung des Quantenzustands des Universums zu versuchen. Stephen Hawking (1979 in Zusammenarbeit mit J. Hartle) hat vorgeschlagen, den Quantenkosmos in Analogie zu einer von Richard Feynman gefundenen Formulierung der Quantenmechanik zu charakterisieren. Ein typischer Aspekt der Quantenmechanik ist ja, dass Position und Geschwindigkeit eines Teilchens nicht beliebig genau festzulegen sind, sondern nur mit einer gewissen Unscharfe bestimmt werden können. Ebenso sind Voraussagen über die künftige Position eines Teilchens, das mit bestimmten Anfangsbedingungen gestartet ist, nur als Wahrscheinlichkeitsaussage möglich. Diesem Aspekt wird durch die Feynman'sche Methode der Aufsummierung von Möglichkeiten in sehr eleganter Weise Rechnung getragen: Für die Bewegung eines Teilchens bedeutet dies: Die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen an einem bestimmten Punkt anzutreffen, kann berechnet werden durch eine speziell definierte Summation über alle in der klassischen Mechanik möglichen Bahnen, die vom Anfangspunkt zu diesem Punkt führen.

Man kann nun versuchen, nicht nur die einfache Einteilchenbewegung⁸ sondern auch kompliziertere quantenmechanische Zustände zu berechnen durch eine Summation über alle möglichen klassischen Konfigurationen des Systems, die bestimmte Nebenbedingungen erfüllen. Ganz in Analogie dazu schlägt nun Hawking vor, die zeitliche Entwicklung eines Quantenzustandes des Universums zu charakte-

risieren durch eine Summation über alle möglichen Raumzeitmodelle und in ihnen definierte Felder. Natürlich kann man diese Summation nicht wirklich durchführen. Dazu benötigt man ja detaillierte Kenntnis nicht nur der Entwicklung unseres Universums, sondern aller möglichen denkbaren Weltmodelle.

Die mathematischen Verfahren ergeben im Allgemeinen unbestimmte, unendliche Ausdrücke. Um diese Divergenzen zu beseitigen oder abzumildern, bedient man sich verschiedener Methoden, die ziemlich willkürlich erscheinen.

Hawking stellt in diesem Dilemma ein Postulat auf, dass bei der Festlegung der zeitlichen Entwicklung des Quantenzustandes nur ganz bestimmte Klassen von Raumzeitgeometrien zu berücksichtigen sind, so genannte kompakte Metriken und Felder, die auf diesen Metriken regulär sind. Diese Hypothese könnte man anschaulich damit umschreiben, dass man den Quantenzustand durch klassische Lösungen festlegt, die keine Grenze haben, auch keinen singulären Rand.

Man konstruiert dazu einen euklidischen 4-dimensionalen Raum, in dem die imaginäre Zeit als imaginäre Zahl erscheint wie eine weitere räumliche Koordinate. Diese Art von Lösungen kann man als die gleichförmig gekrümmte 4-dimensionale Oberfläche einer 5-dimensionalen Kugel veranschaulichen (eine Kugeloberfläche im 3-dimensionalen Raum ist 2-dimensional und sphärisch gekrümmt; dazu muss man sich zwei weitere Dimensionen denken).

Unglücklicherweise ist weder klar, ob die Lösung im euklidischen Raum etwas mit dem Problem zu tun hat, noch wie die Singularitäten der Feynman'schen Methode beseitigt werden können.

Nur in stark vereinfachten Fällen ist bis jetzt auch eine Darstellung der Lösungen in der normalen Raumzeitgeometrie mit reeller Zeit gelungen. Diese deuten an, dass das Universum zwar in einem heißen Urknall entstanden sein könnte jedoch zu Beginn einen endlichen Radius hatte, der dem Kugelradius der euklidischen Lösung entspricht.

Die Frage, woher diese Anfangskonfiguration stammt, lässt sich nicht in normalen Raum- und Zeitkategorien stellen. In diesen Weltmodellen ist die Zeit einfach eine Größe, die den Ablauf der klassischen Welt beschreibt, die aber genauso wenig eine Abfolge von vorhergesehenen Quantenuniversen beschreiben kann wie das System der geographischen Längen und Breitenkreise einen Punkt außerhalb der Erde.

Hawking hat wichtige Beiträge geleistet, aber die Verbindung von allgemeiner Relativitätstheorie und Quantenfeldtheorie ist noch nicht gelungen. Dieses Programm wird die Physiker noch einige Zeit beschäftigen.

DAS ENDE?

Die immerwährende Expansion hat entscheidende Bedeutung für den Endzustand des Kosmos. Es gibt keine zeitliche Grenze der Zukunft und so kann jeder physikalische Prozess, auch der langsamste, bis zu seinem Ende ablaufen. Zunächst einmal wird es dunkel, wenn die Sterne ihren Kernbrennstoff verbraucht haben und die letzten Supernova-Explosionen verglüht sind. Die Biosphäre der Erde wird spätestens in 5 Milliarden Jahren vergehen, wenn die Sonne sich zum Roten Riesen aufblähen und bis über die Erdbahn hinaus ausdehnen wird.

Die Entwicklung gravitierender Systeme wird durch Einsteins Gravitationstheorie von 1915 bestimmt. Der Energieverlust durch die Aussendung von Gravitationswellen spielt danach eine wichtige Rolle für das endgültige Schicksal sich umkreisender Himmelskörper. Seit 1978 wissen wir aus den Beobachtungen des Pulsars 1913+16, dass sich seine Bahn im Doppelsternsystem exakt nach der Einstein'schen Formel für den Energieverlust durch Gravitationswellen ändert und er seinen Partnern immer näher kommt.

In phantastisch langen Zeiträumen, die das jetzige Weltalter von 15 Milliarden Jahren weit übersteigen, werden danach durch die Ab-

Strahlung von Gravitationswellen sich umkreisende Himmelskörper ineinander stürzen und in **Schwarzen Löchern** enden. Jedes von der Schwerkraft beeinflusste System wird letztendlich zu einem Schwarzen Loch. Riesige Schwarze Löcher, aus den Sternen ganzer Galaxien geformt, streben in einem dunklen Kosmos immer weiter auseinander. Dazu wird es immer »kälter«, denn die Temperatur der Hintergrundstrahlung fällt ebenfalls ständig. Dies ist das etwas trübselige Bild, das die Kosmologen vom Ende unseres Universums zeichnen. Das Bild ist aber noch nicht ganz vollständig, denn wenn Stephen Hawking mit seiner 1974 formulierten Hypothese von der Zerstrahlung Schwarzer Löcher Recht hat, so lösen sich nach 10^{40} Jahren auch die Schwarzen Löcher völlig in langwellige Strahlung auf. Wie zu Anfang, so besteht also auch am Ende das Universum aus Strahlung, allerdings mit Temperaturen, die nur unmerklich über dem absoluten Nullpunkt liegen.

Was ist der Sinn des Ganzen? Die Vorhersagen für das Ende des Kosmos sind Extrapolationen von unserem heutigen Wissensstand aus in eine sehr ferne Zukunft. Könnte alles auch ganz anders kommen? Wahrscheinlich nicht, denn die physikalischen Prozesse steuern unausweichlich auf den Kältetod und das Verschwinden aller Objekte in Schwarzen Löchern zu.

Diese Spekulation ist aber nicht ganz vollständig. Die dunkle Energie könnte sich mit der Zeit ändern und auch das im Kosmos entstandene intelligente Leben könnte die ferne Zukunft mitgestalten. Zunächst müssen unsere Nachkommen Mittel und Wege finden, um der Katastrophe zu entgehen, wenn die Sonne in 5 Milliarden Jahren zum Roten Riesen wird. Dies sollte kein großes Problem sein, denn Lösungen sind schon mit heutiger Technologie vorstellbar. Wie lange aber könnte sich intelligentes Leben an die Veränderungen im langsam erkaltenden Kosmos anpassen?

VERTIEFUNGEN

Einheiten

Meter, Kilogramm und Sekunde sind die üblichen Einheiten, in denen Längen, Massen und Zeiten gemessen werden. In der Kosmologie führt dies zu Zahlenwerten, die sehr groß sind.

Deshalb verwendet man hier das Licht zur Längenmessung und benennt die Längeneinheit als Lichtlaufzeit. Eine Lichtsekunde sind 300000 km. Von der Sonne zur Erde braucht das Licht 8 Minuten. Eine astronomische Einheit sind also 8 Lichtminuten. Die Abstände zwischen den Galaxien misst man in Millionen Lichtjahren. Speziell die Einheit »Megaparsec« ist in der Kosmologie sehr gebräuchlich. Ein Megeparsec sind 3,26 Millionen Lichtjahre (abgekürzt wird dies notiert als $1 \text{ Mpc} = 3,26 \cdot 10^6 \text{ Lichtjahre.}$) Astronomische Massen gibt man als Vielfache der Sonnenmasse an: $M_Q = 210^{13} \text{ Gramm.}$

Häufig werden in der Physik so genannte »natürliche« Einheiten benutzt: Die Planck'sche Konstante \hbar , die Lichtgeschwindigkeit c und die Boltzmannkonstante k_B erhalten definitionsgemäß den Wert 1. Massen, Energien und Temperaturen können dann stets in Energieeinheiten, in Elektronenvolt (eV) angegeben werden. $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$; $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$. Die Masse des Elektrons ist 511 keV , die des Protons $0,93826 \text{ GeV}$. Die Temperatur IK ist in diesen Einheiten $0,8621 \times 10^{-4} \text{ eV}$. Die Gravitationskonstante definiert eine Energieskala $G^{-1/2} = 1,22 \times 10^{19} \text{ GeV}$, die oft als Planckmasse M_{pl} oder als Planckenergie bezeichnet wird.

Man kann, wie Max Planck um die Wende zum 20. Jahrhundert vorgeschlagen hat, auch eine fundamentale Länge, nämlich den Kehrwert der Planckmasse, definieren - in Zentimetern wäre diese »Planck-Länge« 10^{-33} cm . Dazu noch eine Planck-Zeit t_{pl} , die einfach die Laufzeit des Lichts über die Planck-Länge ist - in Sekunden: 10^{-43} . Schließlich könnte man dann alle Massen als Vielfache der Planckmasse,

alle Zeiten und Längen als Vielfache der Planckzeit bzw. Plancklänge angeben. Die Zahlenwerte wären dann aber im Allgemeinen etwas unhandlich. Die Umkehrung der Definition der Plancklänge ergibt ja, dass ein Zentimeter den Zahlenwert 10^{33} erhält. Deshalb hat man die Übereinkunft getroffen bei den Einheiten Meter, Kilogramm und Sekunde zu bleiben.

Entfernungen

Die Bewegung der Erde um die Sonne lässt die Sterne in verschiedenen Stellungen am Himmel erscheinen, gemäß den unterschiedlichen Blickwinkeln von den verschiedenen Punkten der Erdbahn aus. Diese Winkelunterschiede, die so genannten Parallaxen, können also Informationen über die Entfernungen der Sterne geben, falls der Durchmesser der Erdbahn bekannt ist. Die griechischen Astronomen der Antike konnten keine Parallaxe beobachten und schlossen daraus, dass die Erde still stehen müsse in Bezug auf die Sterne. Der andere mögliche Schluss, dass die Sterne zu weit entfernt seien, um eine beobachtbare Parallaxe zu zeigen, erschien ihnen offenbar absurd. Tatsächlich beträgt der maximale Winkel (von gegenüberliegenden Punkten der Erdbahn aus gemessen) der nächsten Sterne etwa 0,8 Bogensekunden. Eine Bogensekunde ist eine alte babylonische Maßeinheit: Ein Kreis hat 360 Grad (360°), jeder Grad kann in 60 Bogenminuten ($60'$) und jede Minute in 60 Bogensekunden ($60''$) unterteilt werden. Eine Bogensekunde ist also $1/3600$ eines Grades. Der deutsche Mathematiker Friedrich Wilhelm Bessel (in Königsberg) war der erste, der eine Parallaxe messen konnte (1834, vom Stern 61 Cygni).

Der Erdbahndurchmesser entspricht etwa dem doppelten Wert des mittleren Abstandes der Erde zur Sonne, d.h. zwei astronomischen Einheiten ($1AE = 1,496 \times 10^{13} \text{ cm}$). Diese Strecke erscheint im Abstand d unter dem Winkel α , mit $\alpha d = 2AE$. Einem Wert des Win-

kels α von 1 Bogensekunde (1'') schreibt man das Entfernungsmaß 1 parsec (pc) zu. Es ist also

$$1 \text{ parsec} = 3 \times 10^{18} \text{ cm} = 3,26 \text{ Lichtjahre}$$

Es ist nicht überraschend, dass die Astronomen der Antike die Parallaxe der Sterne nicht finden konnten. Diese Messung erfordert die sorgfältige Beobachtung mit einem Teleskop. Die Parallaxen werden mit zunehmender Entfernung rasch kleiner und gehen schließlich in den Ungenauigkeiten unter, die bei Messungen von der Erde aus doch recht beträchtlich sind. Der Satellit »Hipparcos« brachte wesentliche Verbesserungen. Parallaktische Messungen bis zu Entfernungen von 3000 Lichtjahren, d.h. bis zu 1kpc, sind nun möglich. In diesem Entfernungsreich befinden sich einige Cepheidensterne. Damit ist der Anschluss hergestellt von den geometrischen Methoden zur Entfernungsbestimmung mit Hilfe der pulsierenden Sterne, deren Pulsationsperiode von einem bis zu 50 Tagen direkt mit ihrer Leuchtkraft zusammenhängt. Die auf der Erde gemessene Helligkeit des Cepheiden erlaubt die Bestimmung der Entfernung aus der Perioden-Leuchtkraft-Beziehung.

Die Eichung dieser Beziehung hatte der amerikanische Astronom C. Howard Shapley zunächst nach variablen Sternen in den Kugelsternhaufen durchgeführt, so genannten RR Lyrae Sternen. Anfang der 50er Jahre fand Walter Baade, dass der Halo (zu dem die Kugelsternhaufen gehören) und die galaktische Scheibe verschiedene Sternpopulationen enthalten. Auch die pulsierenden Sterne folgen verschiedenen Periode-Leuchtkraft ($P-L$) Beziehungen. Die genaue Untersuchung ergab tatsächlich, dass ein pulsierender Stern der Scheibenpopulation viermal so hell ist wie ein pulsierender Stern gleicher Periode in der Halopopulation. Baade zeigte, wie man die $P-I$ -Beziehung der Scheibenpopulation neu eichen musste. Als Konsequenz ergab sich, dass alle Entfernungen zwischen den Galaxien verdoppelt werden mussten. Auch die Hubble-Konstante wurde schlagartig auf den halben Wert reduziert.

Die Cepheidenrelation ist von den Astronomen weiter verfeinert und die Farbe des Sterns als weitere Bestimmungsgröße hinzugenommen worden. Einflüsse von Staubwolken, die einen Teil des Sternlichts schlucken und den Stern röter erscheinen lassen, können so korrigiert werden. Damit besitzen die Astronomen in den Cepheidensternen einen sehr genauen Entfernungsanzeiger. Da die Beziehung in unserer Galaxie geeicht wird, spricht man von einem Entfernungskoeffizienten erster Ordnung.

Das tiefe theoretische Verständnis, das man inzwischen für diese Cepheidenphase gewonnen hat, verstärkt natürlich das Zutrauen zu diesen Relationen. Im Entwicklungsverlauf jedes Sterns kann sogar mehrmals eine Cepheidenphase auftreten, wenn die Sternhülle zwar gerade noch stabil ist, aber durch kleine Energiezufuhren zu Schwingungen angeregt werden kann (Ionisations- und Rekombinationsprozesse sind dafür verantwortlich, d.h. Prozesse, bei denen Elektronen die He-Atome in der Hülle verlassen bzw. wieder eingefangen werden).

Für noch größere Entfernungen fand man in den Supernovae vom Typ 1a sehr verlässliche Entfernungskoeffizienten. Aus dem zeitlichen Verlauf und der maximalen Helligkeit dieser Sternexplosionen kann man die Leuchtkraft sehr genau bestimmen.

Elementarteilchen

Die kleinsten Bausteine der Materie, die nicht weiter unterteilbar sind, werden Elementarteilchen genannt. Ob wirklich elementare Objekte, die keine weiteren Unterstrukturen aufweisen, vorliegen oder nicht, kann nur durch Experimente entschieden werden. Wir wissen, dass Moleküle nicht elementar sind, denn sie können durch chemische Prozesse oder etwa durch Erhitzen und Bestrahlen in Atome zerlegt werden. Atome wiederum können in ihre Bestandteile, in Elektronen und den Atomkern, durch den Beschuss mit anderen At-

men oder durch die Bestrahlung mit kurzwelligem Licht aufgespalten werden. Auch die Atomkerne sind nicht elementar: Durch den Zusammenstoß mit hochenergetischen Teilchen oder mit hochenergetischer Strahlung, den Gammastrahlen, können Atomkerne in Protonen und Neutronen zerlegt werden. Ungefähr 50 Jahre lang galten das Proton und das Neutron als Elementarteilchen, aber in den vergangenen zwei Jahrzehnten fanden die Hochenergiephysiker heraus, dass diese Teilchen sehr wahrscheinlich aus noch einfacheren Teilchen, den »Quarks« zusammengesetzt sind. Allerdings ist es bis jetzt noch nicht gelungen, Proton und Neutron wirklich aufzubrechen und die einzelnen Quarks freizusetzen. Das Elektron hat sich in allen Experimenten bisher als unzerbrechlich und ohne innere Struktur gezeigt. Deshalb wird es gegenwärtig, wie auch die Quarks, als Punktteilchen ohne Ausdehnung betrachtet. Sind wir da mit bei den Grundbausteinen angelangt, oder wird es weitergehen, wird jedes jetzt als elementar angesehene Teilchen sich wieder als zusammengesetzt erweisen? Die Frage kann nicht beantwortet werden, doch im Augenblick scheint es so, als könne ein so genanntes Standardmodell mit einer geringen Zahl von elementaren Teilchen die Experimente recht gut erklären.

Die Größe eines Atoms beträgt 10^{-8} cm, aber der Atomkern, der die Masse trägt, hat eine Ausdehnung von lediglich einigen 10^{-13} cm. Fast alles im Atom ist also leerer Raum. Proton und Neutron sind auch etwa 10^{-13} cm groß. Durch Streuexperimente fanden die Elementarteilchenphysiker heraus, dass Elektronen und Quarks kleiner als 10^{-16} cm sein müssen. Es gibt keine Anzeichen dafür, dass diese Teilchen überhaupt eine räumliche Ausdehnung haben. Die Elementarteilchenphysik spielt sich also auf Dimensionen von 10^{-13} cm und darunter ab. Um solche Skalen in Stoß- und Streuexperimenten zu erproben, muss man hohe Energien aufwenden. Hier spielt das quantenmechanische Prinzip der nach Heisenberg benannten »Unschärferelation« eine Rolle: Falls der Ort eines Teilchens bis auf Δx genau

gemessen werden soll, wird die Ungenauigkeit im Impuls Δp des Teilchens entsprechend größer:

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar$$

(\hbar ist das Planck'sche Wirkungsquantum $\hbar = 1,27 \times 10^{-27}$ erg s).

Man kann kleine Dimensionen erreichen, wenn der Anfangsimpuls des streuenden Teilchens genügend groß ist. Diese hohen Energien werden in Beschleunigern erzielt, die zu den teuersten Instrumenten und zu den bemerkenswerten technologischen Leistungen unserer Zeit gehören. Diese Maschinen beschleunigen die Teilchen in sehr starken elektrischen Feldern und führen sie mit raffinierten Magnetfeldanordnungen auf genau bestimmten Bahnen.

Fast alle Elementarteilchen sind instabil, d.h. sie zerfallen innerhalb kurzer Zeit (zwischen 10^{-22} und 10^{-6} Sekunden) in Teilchen mit kleinerer Masse. Nur wenige stabile Teilchen sind bekannt, wie etwa die Neutrinos, das Elektron, oder das Proton. In manchen Theorien wird sogar das Proton als instabil betrachtet, obwohl es natürlich eine lange Lebensdauer haben muss.

Alle Beobachtungen in der Elementarteilchenphysik können auf der Basis von vier fundamentalen Kräften und einer kleinen Zahl elementarer Teilchen, die sich in drei Klassen einteilen lassen, interpretiert werden.

Die Kräfte zwischen den Elementarteilchen können als Austausch virtueller Teilchen verstanden werden. Die realen Elementarteilchen, die diesen Austauschzuständen entsprechen, sind in einigen Fällen bereits experimentell identifiziert worden. Die elektromagnetische Wechselwirkung wird durch virtuelle Photonen übertragen. Die schwache Wechselwirkung wird von virtuellen W^+ -, W^- , Z^0 -Bosonen vermittelt. Die Entdeckung dieser Botenteilchen in Experimenten am europäischen Kernforschungszentrum CERN im Jahre 1984 war ein großer Erfolg dieses Konzepts der kraftübertragenden Teilchen.

Die Kräfte zwischen den Quarks werden durch masselose Bosonen, die so genannten Gluonen, übertragen; diese sind experimentell nicht

direkt nachgewiesen. Auch der Gravitation schreibt man ein hypothetisches Überträger teilchen zu, das »Graviton«, doch ist diese Vorstellung höchstens für die lineare Näherung der Theorie ein klar definiertes Konzept, da eine Quantentheorie der nichtlinearen Gravitation noch nicht gefunden wurde. Wegen der Schwäche der Wechselwirkung ist eine Entdeckung des Gravitons außerordentlich unwahrscheinlich.

Als Leptonen bezeichnet man leichte Elementarteilchen - leichter als das Proton: das Elektron, das μ on, das τ on und die entsprechenden Neutrinos. Dies sind die heute bekannten sechs Leptonen, die man zu drei Paaren mit je einem geladenen und einem ungeladenen Teilchen zusammenfasst.

Leptonen unterliegen der Gravitation, der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung, werden aber von den Kernkräften nicht beeinflusst. Die Gesamtzahl der Leptonen ist in allen Prozessen, soweit wir wissen, erhalten.

Zu jedem Elementarteilchen gibt es das entsprechende Antiteilchen.

Die subnuklearen Teilchen, die aus Quarks und Antiquarks zusammengesetzt sind, werden als Hadronen bezeichnet. Hadronen mit halbzahligem Spin werden Baryonen genannt. Die Quarks, Neutron und Proton sind prominente Vertreter (Abb. 23).

Die Theorie der »Supersaiten« (»Superstring Theory«) verspricht eine Vereinheitlichung aller Kräfte, aller Elementarteilchen mit der Theorie von Raum und Zeit, kurz eine gemeinsame Theorie für alles. Dieses stolze Unterfangen, eine TOE (Theory of Everything) zu finden, ist bestimmt aller Anstrengungen wert. Die grundlegende Annahme der Theorie, dass die kleinsten Bausteine der Welt nicht punktförmige Elementarteilchen, sondern kleine »Saiten« (*strings*) sind, mag ziemlich phantasievoll erscheinen. Doch die Theorie gründet auf einigen sehr eleganten mathematischen Ideen und wird von vielen Physikern eifrig betrieben.

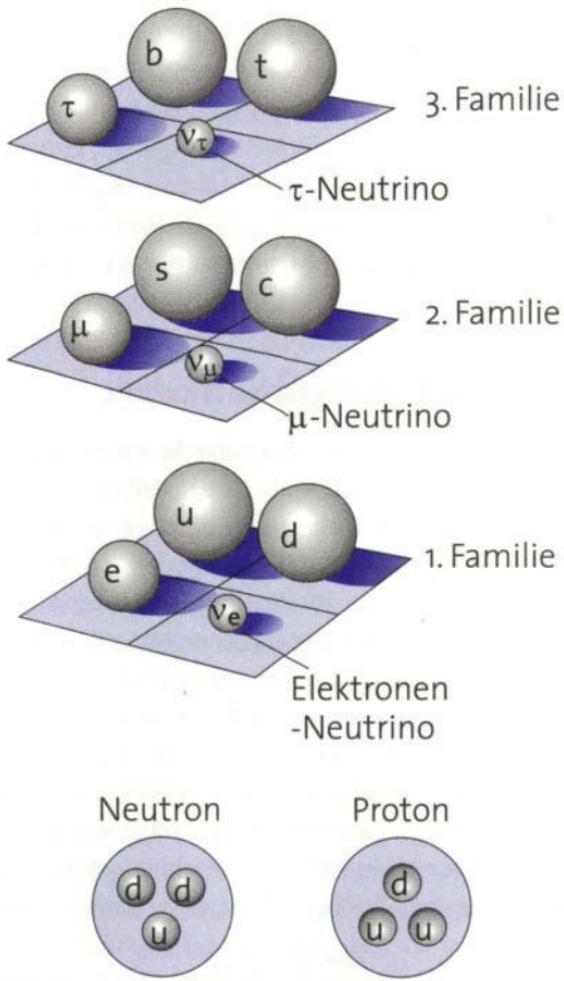


Abb.23: Die Elementarteilchen gehören zu 3 Familien, die jeweils aus Quarks und Leptonen bestehen. Die normale Materie - Protonen und Neutronen - ist aus den d(down) und u(up) Quarks der ersten Familie aufgebaut.

Im Augenblick ist jedoch noch nicht abzusehen, welche Konsequenzen diese Theorie für die normale Welt oder für das frühe Universum haben könnte. Deshalb bleibt es für uns ein intellektuelles Unternehmen, das wir noch nicht in unser Weltbild einordnen können. Es ist aber klar, dass die Superstring-Theorie experimentell nachprüfbare Aussagen nur liefern kann, wenn es gelingt, eine niederenergetische Näherung zu formulieren. »Niederenergetisch« bedeutet hier: zumindest im Energiebereich einer GUT-Theorie, denn eigentlich beschreiben die Superstrings die Welt oberhalb der Planck-Energie von 10^{19} GeV.

Kosmologische Modelle

In den so genannten Friedmann-Lemaître-Modellen wird die Expansion als das Auseinanderfließen einer idealisierten, gleichmäßig verteilten Materie aufgefasst, die durch homogene Dichte $\rho(t)$ und Druck $p(t)$ beschrieben wird. Die Flüssigkeitsteilchen, die man sich in diesem Bild als repräsentativ für die Galaxien denken kann, schwimmen in der sich ausdehnenden kosmischen Materie; ihr Abstand vergrößert sich mit der Zeit, proportional zu einer Funktion der Zeit, dem so genannten Expansionsfaktor $R(t)$. Die Expansion kann ohne Ende immer weiter gehen, oder sie erreicht ein Maximum und kehrt sich danach um in eine Kontraktion. Das unterschiedliche Verhalten von $R(t)$ wird festgelegt durch die Energiedichte von Materie, Strahlung und anderen evtl. vorhandenen Komponenten. Die Rate der Expansion zum jetzigen Zeitpunkt t_0 ist die »Hubble«-Konstante

$$H_0 = \frac{1}{R} \left. \frac{dR}{dt} \right|_{t=t_0}$$

(allgemein werden physikalische Größen zum heutigen Zeitpunkt mit dem Index 0 gekennzeichnet). Die Lichtausbreitung in den FL-Modellen erfolgt so, dass das zum Zeitpunkt t_0 ausgesandte Signal beim Empfänger zur Zeit t_0 eine Rotverschiebung zerfahren hat, mit

der folgenden Beziehung zu den jeweiligen Expansionsfaktoren

$$1+z = \frac{R_o}{R(t_e)} .$$

Für kleine Zeitabstände ($t_o - t_e$) ergeben die linearen Entwicklungsglieder von $R(t)$ gerade die Hubble-Beziehung

$$z = \left[1 + \frac{\dot{R}_o}{R_o} (t_o - t_e) \right] - 1 = H_o \cdot d$$

falls für die Entfernung $d \equiv c(t_o - t_e)$ gesetzt wird. (Hier ist die Lichtgeschwindigkeit $c=1$ gesetzt, d. h. wir geben Geschwindigkeiten als Bruchteil der Lichtgeschwindigkeit an.)

Wir beschreiben die Dichte ρ_o durch eine dimensionslose Größe

$$\Omega_o \equiv \frac{8\pi G}{3H_o^2} \rho_o .$$

Der Dichteparameter n_o wird mit der Hubble-Konstanten H_o konstruiert.

$$\rho_c \equiv \frac{3H_o^2}{8\pi G}$$

ist ein Ausdruck mit der Dimension einer Massendichte, der auch als »kritische Dichte« bezeichnet wird. Zur Gesamtdichte tragen aber nicht nur die vorhandenen Massen bei, sondern auch jede andere Form von Energie. Insgesamt lassen sich diese verschiedenen Komponenten aufaddieren zu einer Gesamtdichte Q , wobei jede Komponente als Bruchteil der kritischen Dichte angegeben wird. Neben der normalen baryonischen Materie (Ω_B), aus der die Elemente, also wir und unsere Umgebung, bestehen, muss es - wie verschiedene Beobachtungen zeigen - auch einen beträchtlichen Anteil nichtbaryonischer, nichtleuchtender Materie geben (Ω_{CDM}) sowie eine Energiedichte, die praktisch konstant ist (Ω_Λ).

Zu einer festen Zeit t beschreiben die FL-Modelle einen dreidimensionalen Raum mit konstanter Gauss'scher Krümmung $\frac{K}{R_o^2}$, wobei es nur drei unterschiedliche Raumtypen $K = +1, -1, 0$ gibt. Zur jetzigen Epoche gilt $\frac{K}{R_o^2} = H_o^2(\Omega - 1)$. $\Omega = 1$ bedeutet also, dass die Raumkrümmung gleich null ist.

Nur für nicht zu weit entfernte Galaxien, oder entsprechend für kleine z , kann die Expansion als »Fluchtbewegung« der Galaxien interpretiert werden. Für Rotverschiebungen z , die größer als eins sind, muss dagegen das volle kosmologische Modell betrachtet werden. Die Energiedichte der Strahlung nimmt wie R^4 und die Temperatur wie R^{-1} ab. Dies kann man auch durch die Rotverschiebung z darstellen: $T = T_0 (1+z)$. Entsprechend ergibt sich für die Dichte kalter, nichtrelativistischer Materie $\rho - \rho_0 = (1+z)^3$, und für die Energiedichte des Strahlungsfeldes $\rho_\gamma = \rho_{\gamma 0} (1+z)^4$. Jetzt ist $\rho_{\gamma 0}$ viel kleiner als ρ_0 , aber ρ_γ wächst um einen Faktor $(1+z)$ rascher an, wenn man die Expansion in der Zeit zurückverfolgt zu anwachsender Rotverschiebung z . Bei $(1+z) = \frac{\rho_0}{\rho_{\gamma 0}} \approx 10^3$ bis 10^4 sind die Energiedichten von Materie und Strahlung gleich, und zu früheren Zeiten überwiegt das Strahlungsfeld. Das Universum wird strahlungsdominiert.

Ausgehend vom jetzigen Zustand lässt sich mit Hilfe dieser FL-Modelle die Geschichte des Kosmos theoretisch rekonstruieren. Es werden natürlich wegen der Homogenität der Modelle nur zeitliche Veränderungen erfasst, und schon aus diesem Grund können die FL-Modelle nur angenähert gültig sein.

Aus den Lösungen der FL-Gleichungen lässt sich entnehmen, dass $R(t)$ vor einer endlichen Zeit gleich null war. Bei Annäherung an diesen Zeitpunkt, beim Rückgang in die Vergangenheit, wachsen Dichte und Ausdehnungsrate über alle Grenzen. Man kann deshalb die Entwicklung nicht weiter theoretisch zurückverfolgen, weil die Begriffe und Gesetze der Theorie ihren Sinn verlieren. Diese Anfangssingularität kennzeichnet den Anfang der Welt.

Zur quantitativen Festlegung eines bestimmten kosmologischen Standardmodells benötigt man außer der Hubble-Konstanten H_0 noch zwei Parameter. Geeignet sind etwa der Dichteparameter Ω_0 und das Weltalter t_0 . Diese drei, zumindest im Prinzip, beobachtbaren Parameter legen das Weltmodell (einschließlich des Werts von Ω_Δ) eindeutig fest.

Innerhalb der FL-Modelle ist das Produkt $H_0 t_0$ gleich einer bestimmten Funktion von Ω_0 und Ω_Λ . Da man aber auch den Wert von Ω_Λ aus den Beobachtungen des Mikrowellenhintergrundes bestimmen kann, ist dies ein echter Test für das FL-Modell. Im Prinzip könnten die einfachen kosmologischen Modelle durch die bisher gewonnenen astronomischen Daten widerlegt werden. Tatsächlich aber, wie wir sehen werden, passt alles sehr schön zusammen.

Allgemeine Relativitätstheorie

Isaac Newton, der im 17. Jahrhundert die Gesetze der Schwerkraft entdeckte, nahm an, dass es einen absoluten Raum gebe. Diesem absoluten Raum schrieb Newton stillschweigend die geometrischen Eigenschaften zu, die bereits der Griechen Euklid 2000 Jahre zuvor aus »evidenten« Grundannahmen abgeleitet hatte. Diese Annahme galt ihm als so selbstverständlich, dass sie nicht besonders erwähnt werden musste. Newton ging zusätzlich davon aus, dass es eine universelle, für alle Vorgänge passende, durch Messungen bestimmmbare »absolute Zeit« gebe. Der absolute Raum mit seinen festen Messverhältnissen stellte die unveränderliche Arena dar, in der sich die Körper nach einem ebenfalls vorgegebenen unbeeinflussbaren Zeitmaß bewegten.

Die tatsächlich vorkommenden Bewegungen erklärte Newton damit, dass jeder Körper aufgrund seiner Trägheit (die durch seine Masse gemessen wird) bestrebt ist, sich geradlinig gleichförmig zu bewegen, und durch Kräfte aus dieser ungestörten Bewegung abgelenkt wird. Eine dieser Kräfte ist die Schwerkraft. Newton beschreibt sie als wechselseitige Anziehungskraft zweier Körper, proportional zum Produkt der beiden Massen, mit dem Quadrat des Abstands der Körper voneinander abnehmend.

Albert Einstein ersetzte die Newton'schen Annahmen über Raum und Zeit in zwei Schritten durch andere Annahmen, die der Wirklich-

keit noch besser angepasst sind. Der Wunsch nach einer besseren Theorie war aufgekommen, als durch die Versuche Michael Faradays und die Theorie James Clerk Maxwells elektromagnetische Felder als wirkliche physikalische Objekte erkannt wurden. Demnach breiten sich elektromagnetische Wellen auch im leeren Raum mit Lichtgeschwindigkeit aus und zwar unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle. Wie aber lässt sich dies mit der klassischen Physik Newtons in Einklang bringen? Müsste nicht die Lichtgeschwindigkeit erhöht oder vermindert erscheinen je nachdem, ob die Lichtquelle sich nähert oder weg bewegt? Diese Schwierigkeiten führten Einstein im Jahre 1905 zu der Einsicht, dass die Begriffe des absoluten Raumes und der absoluten Zeit zur Beschreibung solcher Vorgänge nicht geeignet sind.

Ausgangspunkt für ihn war die Überlegung, dass man im Allgemeinen nicht entscheiden kann, ob räumlich getrennte Ereignisse gleichzeitig sind oder nicht, denn dies hängt vom Bezugssystem des Beobachters ab. Nicht der Abstand zweier Raumpunkte oder zweier Zeitpunkte hat invariante Bedeutung, sondern nur der vierdimensionale Raumzeit-Abstand der Ereignisse.

Durch ein einzelnes Ereignis im Raumzeitpunkt O ist eindeutig festgelegt, welchen Verlauf alle möglichen Lichtstrahlen durch O haben können. Auf diese Weise wird jeder Raumzeitpunkt zur Spitze eines »Lichtkegels«, der aus allen Ereignissen besteht, die mit dem betrachteten Raumzeitpunkt durch ungestörte Lichtstrahlen verbunden werden können. Dies legt eine Struktur der Raumzeit fest und es spielt dabei keine Rolle, ob tatsächlich Licht durch O hindurchläuft oder nicht (Abb. 24). Auch dem Raum um einen Magneten schreibt man ein Kraftliniensystem zu, ob nun Eisenfeilspäne diese Linien anzeigen oder nicht. Durch jeden Punkt gibt es so einen Lichtkegel. Dies prägt der Raumzeit eine geometrische Struktur auf - ähnlich wie Geraden und Kugeln dem Raum, so hier Lichtkegel und die Bahnen kräftefreier Teilchen der Raumzeit.

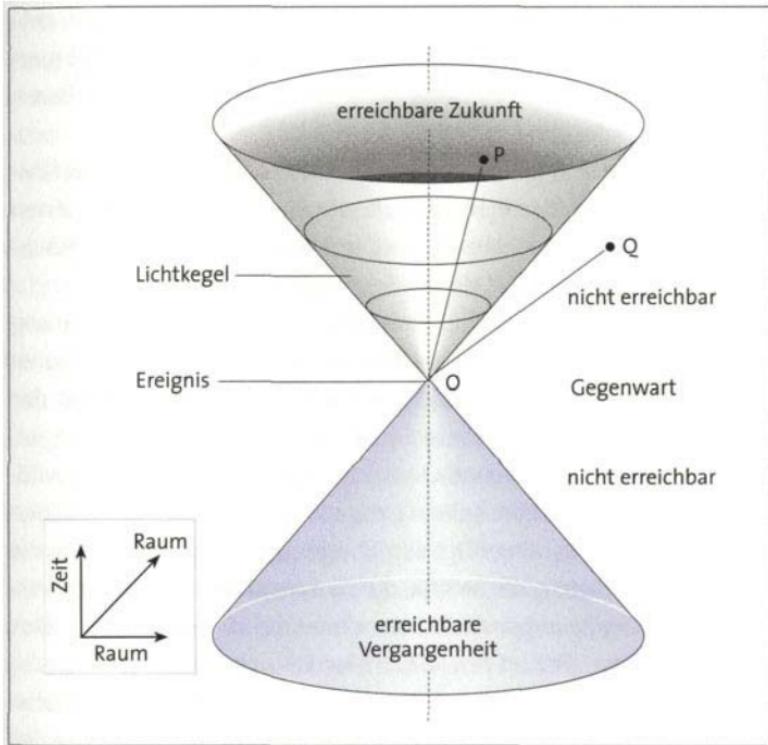


Abb.24: Die zeitliche und räumliche Entwicklung eines vom Punkt O ausgehenden Lichtsignals ist hier dargestellt (nur zwei räumliche Koordinaten sind gezeichnet). Die Zeit verläuft vertikal, die Raumachsen horizontal. Der raumzeitliche Abstand s , mit $s^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2$ ist größer als null für einen Punkt P innerhalb des Lichtkegels, kleiner als null für Q außerhalb, gleich null auf dem Lichtkegel. P kann von O aus mit Signalen erreicht werden, Q nicht.

Dieses Feld der Lichtkegel hat aber noch eine weitergehende physikalische Bedeutung: Unsere Erfahrungen sprechen dafür, dass kein Signal schneller läuft als das Licht. Somit ist der Zukunfts- oder Vorwärtslichtkegel von O, d.h. die Lichtstrahlen, die von O ausgehen, der Rand des Bereichs, der von e aus kausal beeinflusst werden kann. Der Vergangenheits- oder Rückwärtslichtkegel von O, gebildet aus allen

Lichtstrahlen, die O von anderen Ereignissen her erreichen, ist entsprechend der Rand des Bereichs, aus dem O kausale Wirkungen erfahren kann. Dies teilt die Umgebung von O in verschiedene Bereiche auf.

Diese »Spezielle Relativitätstheorie« Einsteins hat sich als tragfähige Grundlage für alle diejenigen Teile der Physik erwiesen, bei denen die Schwerkraft vernachlässigt werden kann. Vor allem für die Hochenergie-Teilchenphysik ist diese Theorie unentbehrlich.

Die Gravitation kann nach Einstein durch eine zweite Verfeinerung der Raumzeitstruktur berücksichtigt werden. Seiner Gravitationstheorie, der ART (Allgemeine Relativitätstheorie) von 1915 liegt der Gedanke zugrunde, dass diese Struktur nicht fest vorgegeben ist, sondern von den vorhandenen Massen und Energien bestimmt wird. Jeder Körper verzerrt in seiner Umgebung das räumlich-zeitliche Maßfeld, in das er eingefügt ist. Umgekehrt bestimmt auch die Raumzeit-Geometrie, die Metrik, die Dynamik. Dadurch wirken verschiedene Körper aufeinander ein - dies ist die Gravitation. Das metrische Feld zwischen den Körpern wirkt auch auf das Licht, das in der Nähe von Körpern abgelenkt wird. Die Lichtkegelstruktur ist also nicht fest vorgegeben, sondern sie ergibt sich aus der Verteilung der Massen. Diese enge Beziehung zwischen Raum, Zeit und Materie macht Berechnungen in der ART schwierig. Andererseits war mit dieser Theorie ein großer Schritt in Richtung auf die Einheit der Physik getan. Die Schwerkraft ist in die geometrischen Eigenschaften der Raumzeit verwoben, sie muss nicht wie bei Newton als zusätzliche unabhängige Struktur erfasst werden. In dieser Hinsicht ist die ART bislang das vollkommenste Teilstück der Physik.

Die Lichtkegel verändern sich in der Nähe einer Masse. Man spricht von der »Raumkrümmung«, die einer geradlinigen Lichtausbreitung entgegensteht. Wir können versuchen, uns diesen anschaulich etwas schwierigen Begriff zu verdeutlichen durch die Betrachtung der Bahnen kräftefreier Teilchen. In der vierdimensionalen flachen Raumzeit,

dem so genannten Minkowskiraum, laufen die Teilchen ohne Einwirkung äußerer Kräfte auf geraden Linien. Entsprechend dazu gibt es in einer gekrümmten Raumzeit die geodätschen Linien. Im euklidischen Raum sind dies die Kurven kürzester Verbindung, zwischen zwei Punkten, in einer gekrümmten Raumzeit wird längs dieser Kurven der vierdimensionale Abstand maximal. Dieser Abstand ist gleich der Eigenzeit, also dem Zeitintervall, das eine längs dieser Kurve geführte Uhr anzeigen würde. Im Falle positiver Krümmung laufen zwei benachbarte parallele Geodäten aufeinander zu, wie die Großkreise auf einer Kugeloberfläche, die am Äquator parallel sind und sich an den Polen schneiden. Bei negativer Krümmung laufen anfänglich parallele Geodäten auseinander.

Das Licht bewegt sich auf Geodäten, deren Eigenzeitintervalle null sind, auf »Nullgeodäten«. Für ein Lichtteilchen vergeht überhaupt keine Zeit, selbst wenn es kosmische Entfernungen von Milliarden Lichtjahren zwischen Aussendung und Empfang zurücklegt. Auch in einer gekrümmten Raumzeit formen die Nullgeodäten die Lichtkegel und damit die kausale Struktur. Da sich kein Signal schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann, liegen die Bahnkurven von Teilchen mit positiver Masse stets innerhalb der Lichtkegel, die zu den Punkten ihrer Bahnkurve gehören.

Die Gravitation

In Einsteins Theorie gibt es die Schwerkraft nicht mehr. Sie ist eingehäuft in das Raumzeit-Gefüge und ein Teil der Geometrie geworden. Wie kann sie dann aber die gegenseitige Anziehung von Massen und die Bewegung der Himmelskörper bestimmen?

Betrachten wir für einen Moment das Sonnensystem: Die Bahn der Erde um die Sonne wird bestimmt durch die Verformung der Raumzeit in der Sonnenumgebung. Stellen wir uns das Raumzeitgefüge wie ein Tuch aus elastischem Material vor, so produziert eine große

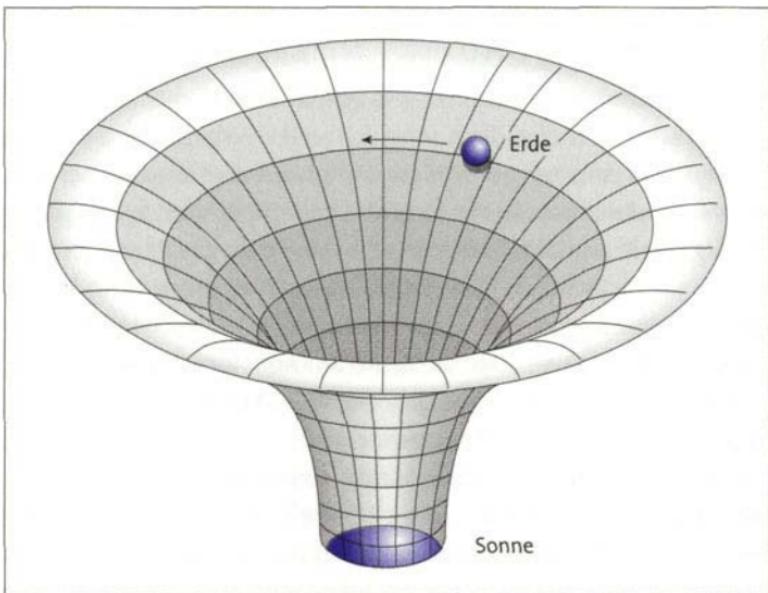


Abb.25: Der gekrümmte Raum um eine große Masse ist als trichterförmige Fläche dargestellt. Beim System Sonne-Erde würde die Erde an der Trichterwand entlang laufen, am Absturz gehindert durch ihre Bahngeschwindigkeit.

Masse wie die Sonne eine tiefe Delle. Körper, die zu weit in diesen Trichter geraten, fallen nach unten in die Sonne (Abb.25). Dies ist die Massenanziehung, die in diesem Fall etwas einseitig aussieht, weil die Sonnenmasse so überwiegend groß ist. An der Wand dieses Trichters kann sich die Erde halten und auf ihrer Bahn umlaufen, wenn ihre Geschwindigkeit genau zum Abstand von der Sonne passt, also gleich der Kepler-Geschwindigkeit ist. Die Erde bildet um sich auf Grund ihrer Masse einen kleineren Trichter aus, an deren Wänden etwa Satelliten umlaufen.

Da die Masse der Satelliten verschwindend gering ist, herrscht in ihnen die »Schwerelosigkeit«. Durch die Bewegung auf der Umlaufbahn wird die Schwerkraft der Erde kompensiert. Wohl jeder hat

schon die Übertragungen im Fernsehen gesehen, in denen dies eindrucksvoll demonstriert wurde. Dieser Effekt ist Beispiel für ein Grundprinzip der Einstein'schen Theorie, das so genannte »Äquivalenzprinzip«. Es besagt, dass die Gravitationswirkung an einem Punkt nicht von einer Beschleunigung unterschieden werden kann. Längs ihrer ellipsenförmigen Umlaufbahn führt die Erde eine derartige beschleunigte Bewegung aus.

Es ist ganz erstaunlich, dass trotz dieser recht andersartigen Formulierung die Einstein'sche Theorie in die Newton'sche Theorie übergeht, wenn schwache Gravitationsfelder und kleine Geschwindigkeiten betrachtet werden.

In einigen Punkten korrigiert die Allgemeine Relativitätstheorie die Vorhersagen der Newton'schen Theorie. Interessanterweise hat die ART im Gegensatz zu einer Reihe rivalisierender Gravitationstheorien bis jetzt allen experimentellen Prüfungen standgehalten. So erklärt sie die seit 185g bekannte anomale Drehung der Bahn des sonnennächsten Planeten Merkur, außerdem bestätigten die Beobachtungen Voraussagen wie die Lichtablenkung durch das Schwerefeld der Sonne, die 1919 erstmals nachgewiesen wurde, sowie den kombinierten Einfluss von Gravitationsfeldern und Bewegungen auf den Gang von Uhren und die damit verknüpfte Beeinflussung der Laufzeit von Radarstrahlen durch die Schwerefelder, die sie durchqueren. Aufgrund der bisherigen Beobachtungen und Messungen können die von Einstein behauptete Krümmung der Raumzeitmannigfaltigkeit und der dynamische Charakter der Metrik als erwiesen gelten.

Obwohl Newton und Einstein einfache und genaue Theorien für die Gravitation aufgestellt haben, ist sie als fundamentale Wechselwirkung nach wie vor rätselhaft. Die Schwerkraft ist völlig unbedeutend im Bereich der Atome, aber sie wird wichtig, wenn große Massen ins Spiel kommen, denn die Wirkung vieler kleiner Einzelmassen addiert sich einfach auf. Schließlich überwiegt die Schwerkraft alle anderen Kräfte.

Die andere langreichweitige Kraft, die elektromagnetische, wirkt verschieden auf positive und negative Ladungen. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, entgegengesetzt geladene Teilchen ziehen sich gegenseitig an. Dies führt zu einer Abschirmung der elektrischen Kraft in größeren Bereichen.

Masse und Energie

Im Allgemeinen muss man sehr vorsichtig mit den Begriffen »Gesamtenergie« und »Energiedichte« umgehen, wenn man die Energie des Gravitationsfeldes mit betrachten will. Das Äquivalenzprinzip besagt nämlich, dass an irgendeinem bestimmten Punkt das Gravitationsfeld wegtransformiert werden kann, sofern man ein geeignetes beschleunigtes Bezugssystem verwendet. Die Wurzel des Äquivalenzprinzips ist die Gleichheit von schwerer undträger Masse, die Einstein als Ausgangspunkt seiner Überlegungen postuliert hat. Durch die Eötvös-Experimente ist diese Gleichheit auch eine der experimentell am besten bestätigten Aussagen der Physik. Wir alle haben wohl schon eindrucksvolle Filme gesehen, bei denen Astronauten »schwerelos« an der Arbeit sind - der »freie Fall«, also die Kepler-Bewegung, des Satelliten im Schwerkraftfeld der Erde transformiert das Gravitationsfeld am Ort des Flugkörpers weg. Auf die Astronauten wirkt die Schwerkraft der Erde nicht mehr. Das bedeutet aber, dass mit dem Gravitationsfeld auch die Energiedichte der Gravitation - falls es so etwas gibt - an diesem Punkt wegtransformiert wird.

Die Versuche einiger Physiker, trotzdem eine gravitative Energiedichte über formale Manipulationen (Pseudotensoren etc.) zu definieren, sind relativ erfolglos geblieben, denn all diese neu definierten Begriffe zeigen zu starke Abhängigkeiten vom Bezugssystem, stärkere Abhängigkeiten als sie die Energiedichte der nicht-gravitativen Felder aufweist.

Die Gesamtenergie müsste also für jeden Punkt der Raumzeit gesondert bestimmt werden und es wäre im Allgemeinen auch nicht klar, wie die Werte an verschiedenen Punkten verknüpft sind. Dies läuft natürlich den Vorstellungen, die in der Physik mit dem Begriff der »Gesamtenergie« eines Systems verbunden sind, völlig zuwider. Selbst der Begriff der Gesamt-Ruhemasse ergibt nicht viel Sinn, falls er nicht auf ein entsprechendes Ruhesystem bezogen ist. So ist es etwa völlig unklar, was die Aussage, die Gesamtenergie des geschlossenen, endlichen kosmologischen Friedmann-Lemaître-Modells sei null, bedeuten soll.

Es gibt aber einen Spezialfall, in dem der Begriff der Gesamtenergie nützlich und sinnvoll ist. Dies ist der Fall der so genannten, »isolierten Systeme« in der Allgemeinen Relativitätstheorie. Ganz heuristisch betrachtet hat ein isoliertes System einen endlichen Radius und es ist die einzige Quelle des Gravitationsfeldes in der Raumzeit. Das Feld muss deshalb in charakteristischer Weise mit der Entfernung vom System abfallen; die Raumzeit im Unendlichen ist flach. Solche Raumzeiten werden »asymptotisch flach« genannt. Die Schwarzen Löcher sind Beispiele für derartige Raumzeiten.

In etwa lautet die Aussage dieser positiven Energie-Theoreme, dass es unmöglich ist, ein isoliertes Objekt aus »normaler klassischer Materie« zu bilden, das durch die Schwerkraft gebunden ist und dessen Gesamtenergie negativ ist, oder negativ wird nach der Abstrahlung von Energie.

Ein neues Problem entsteht durch den quantenmechanischen Verdampfungsprozess Schwarzer Löcher, den Hawking als Erster berechnet hat. In der Endphase der Auflösung eines Schwarzen Lochs sind die Theoreme über die Positivität der Energie vermutlich nicht mehr anwendbar. Es ist klar, dass hier die Quantengravitation benötigt wird, um verlässliche Aussagen zu gewinnen. Das Ende dieses Vorgangs kommt aber erst, nachdem sehr viel Zeit vergangen ist. Ein Schwarzes Loch mit der Masse M strahlt wie ein schwarzer Körper

mit der Temperatur in Einheiten von

$$T_H = 10^{-7} \frac{M_\odot}{M} K$$

Falls sich das Schwarze Loch im Vakuum befindet, dann dauert der Prozess etwa

$$t = 10^{66} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^3$$

Falls die Temperatur der Umgebung größer ist als T_H (etwa durch die 3K kosmische Hintergrundstrahlung), dann wird das Schwarze Loch wachsen. Sobald aber die Temperatur des Hintergrundes unterhalb von T_H liegt, beginnt die Evaporation. Das Energieproblem wird nur verzögert, nicht gelöst.

Schwarze Löcher und Raumzeitsingularität

Zwei Monate nachdem Albert Einstein seine grundlegende Arbeit zur ART veröffentlicht hatte, fand Karl Schwarzschild zum Ende des Jahres 1915 die nach ihm benannte Lösung der Feldgleichungen. Diese »Schwarzschild-Geometrie« ist als Prototyp eines »Schwarzen Lochs« bekannt geworden, doch sie beschreibt ganz allgemein die gekrümmte Raumzeit außerhalb einer kugelsymmetrischen Massenverteilung. Auch im Außenraum der Sonne z. B. wird die Raumzeit durch die Schwarzschild-Lösung dargestellt, soweit eben die Sonne als kugelförmig betrachtet werden kann. Versuchen wir in Gedanken eine Massenkugel, wie etwa die Sonne, in einem immer kleineren Radius zu konzentrieren, so wie dies ja in der Newton'schen Theorie bis hin zur Idealisierung der punktförmigen Masse möglich ist. Stets gilt im Außenraum die Schwarzschild-Lösung. Doch für Radien kleiner als $r_s = \frac{2GM}{c^2}$ (M ist die Masse innerhalb r_s , c die Lichtgeschwindigkeit, G die Gravitationskonstante) verlieren die statischen, d.h. nicht von der Zeit abhängigen Koordinaten, die Karl Schwarzschild benutzt hat, ihre Gültigkeit. Wir erreichen also in diesem Gedanken-

experiment nicht das Äquivalent der Newton'schen Punktmasse, die bis $r=0$ konzentriert ist, sondern wir kommen nur bis zum so genannten »Schwarzschildradius« r_s und wissen zunächst nicht, was sich im Inneren von r_s abspielt. Zur Beschreibung des inneren Bereichs, d.h. für Radien kleiner als r_s , haben die Theoretiker im Laufe der Zeit besser geeignete Koordinaten gefunden. Am einfachsten können wir die Struktur dieser Raumzeit analysieren, wenn wir die Lichtausbreitung studieren. Weit entfernt vom Schwarzschild-Radius sind die Verhältnisse wie im flachen Raum, aber bei Annäherung an den Schwarzschild-Radius werden die Lichtkegel verformt. Ein am Schwarzschild-Radius ausgesandter Lichtstrahl, gleich in welche Richtung, wird so stark verbogen, dass er nicht nach außen entweichen kann, sondern in dieser Kugel vom Radius r_s gefangen bleibt. Lichtstrahlen, die innerhalb dieses Radius emittiert werden, können der Raumzeitkrümmung nicht mehr entgehen, sondern enden in der Singularität bei r_s .

Licht aus dem Außenraum kann in den Schwarzschildradius ohne weiteres eindringen, aber kein Lichtstrahl kann herauskommen.

Der Schwarzschild-Radius legt eine Struktur in der Raumzeit fest, einen Horizont, der Außen und Innen unausweichlich trennt. Da jede Art von Informationen höchstens mit Lichtgeschwindigkeit übermittelt werden kann, wirkt der Horizont wie eine Membran, die nur in einer Richtung - nach Innen - Energie und Information durchlässt. Im Inneren befindet sich die Singularität bei r_s , wie bei der Newton'schen Punktmasse. Tatsächlich muss - zumindest nach der ART - jede Masse innerhalb des Horizonts als singuläre Punktmasse bei $r=0$ enden. Innerhalb des Horizonts drehen sich die Lichtkegel um 90° . Dies kann man so verstehen, dass Raum und Zeit ihre Funktion vertauschen. Im Inneren des Horizonts »vergeht« der Raum, so wie in der wirklichen Welt die Zeit. Nichts kann das Aufzehren der Entfernung bis zu Singularität bei $r=0$ aufhalten, alles endet in dieser Singularität.

Die Raumzeit der Schwarzschild-Lösung ist also leer - außerhalb und innerhalb des Horizonts befindet sich keine Materie - bis auf die Punktmasse M bei $r=0$. Ein Beobachter außerhalb misst eine Gravitationswirkung, die einer Masse M entspricht. Dieses Gebilde, die Punktmasse M , die von einem Horizont $r_s = \frac{2GM}{c^2}$ umgeben ist, nennen die Astrophysiker »Schwarzes Loch«, ein Name, den John Wheeler 1968 in einem Vortrag erfand. (Allerdings gibt es bereits von 1905 eine Geschichte von Hubert von Meyrinck mit dem Titel »Das Schwarze Loch«, in der das Auftauchen dieses alles verschlingenden Nichts geschildert wird.) Ein Schwarzes Loch ist also weder ein materieller Körper noch besteht es aus Strahlung; es ist buchstäblich ein Loch in der Raumzeit. Die Existenz von Horizonten oder Kausalitätsgrenzen ist ein bemerkenswertes Ergebnis der ART. Die Singularität befindet sich auf der einen Seite des Horizonts und hat keine kausale Verbindung zu einem Beobachter auf der anderen. Diese Eigenschaft könnte für alle realistischen Singularitäten typisch sein; eine »kosmische Zensur« verhüllt Singularitäten vor dem Auge des Beobachters.

Sterne, Planeten, oder andere Alltagsdinge sind natürlich weit außerhalb ihres Schwarzschild-Radius. Die Sonne hat einen Schwarzschild-Radius von 3km, die Erde von 0,9cm. Die Tatsache, dass der wirkliche Radius weit größer ist, zeigt an, dass die Abweichung von der flachen Raumzeit in der Umgebung dieser Himmelskörper sehr klein ist. Subatomare Teilchen, wie etwa Nukleonen, sind um den Faktor 10^{39} ausgedehnter als ihr Schwarzschild-Radius. In der Elementarteilchenwelt spielt die Gravitation eben keine Rolle. Anders sieht es schon bei einem Neutronenstern aus, einem Himmelskörper etwa von der Masse der Sonne, aber nur mit einem Radius von 10 km, also nur dreimal so groß wie sein Schwarzschild-Radius. Für die Struktur der Neutronensterne ist die ART sehr wichtig. Einen Neutronenstern muss man nur auf ein Drittel seiner Größe zusammendrücken, um ihn in ein Schwarzes Loch zu verwandeln.

Ein Stern großer Masse, der den Kernbrennstoff in seinem Inneren verbraucht hat, zieht sich unter dem Einfluss seiner Schwerkraft immer weiter zusammen und verschwindet schließlich durch den Horizont in der Singularität. Für einen Beobachter auf der Sternoberfläche geschieht dies in der Zeit, die er im freien Fall für diese Strecke braucht, also für einen Stern von einigen Sonnenmassen in ein paar Sekunden. Für einen Beobachter im Außenraum dagegen nähert sich die Sternoberfläche dem Horizont immer langsamer und erreicht ihn nicht in endlicher Zeit. Der Stern scheint am Schwarzschild-Radius »einzufrieren«. Dies hängt natürlich mit der Ausbreitung der Strahlung in der Nähe des Horizonts zusammen. Sendet der kühne Forscher beim Fall ins Schwarze Loch in regelmäßigen Abständen Strahlungsblitze aus, so empfängt der vorsichtige Beobachter im Außenraum diese Pulse in immer größeren Zeitabständen. Schließlich erreicht ihn der am Horizont ausgesandte Lichtblitz nicht mehr »er erreicht ihn erst nach unendlich langer Zeit«, wie die Relativisten das gerne ausdrücken. Die Verhältnisse sind schematisch in Abb.24 zu sehen. All dies ist im Prinzip so richtig, praktisch aber wird der Stern ganz plötzlich unsichtbar, denn die Wellenlänge des in der Nähe des Horizonts ausgesandten Lichts wird vom Beobachter mit großer Rotverschiebung (d.h. Verschiebung zu längeren Wellenlängen) empfangen, exponentiell anwachsend mit der Annäherung der Quelle an den Horizont. Dementsprechend fällt auch die Leuchtkraft schnell ab. In der Zeitspanne von einer Hunderttausendstel Sekunde für einen Stern von Sonnenmasse (das ist die Zeit, die das Licht braucht um die Distanz des Schwarzschild-Radius zu durchlaufen) wird also ein »Schwarzes Loch« entstanden sein.

Die Schwarzschild-Lösung ist allein durch ihre Masse festgelegt, doch fast alle Sterne rotieren, und deshalb ist auch das aus dem Kollaps entstehende Schwarze Loch ein rotierendes. Die Raumzeit dieser rotierender Schwarzen Löcher weist im Vergleich zur Schwarzschild-Lösung eine recht vielfältige Horizontstruktur auf. Es gibt

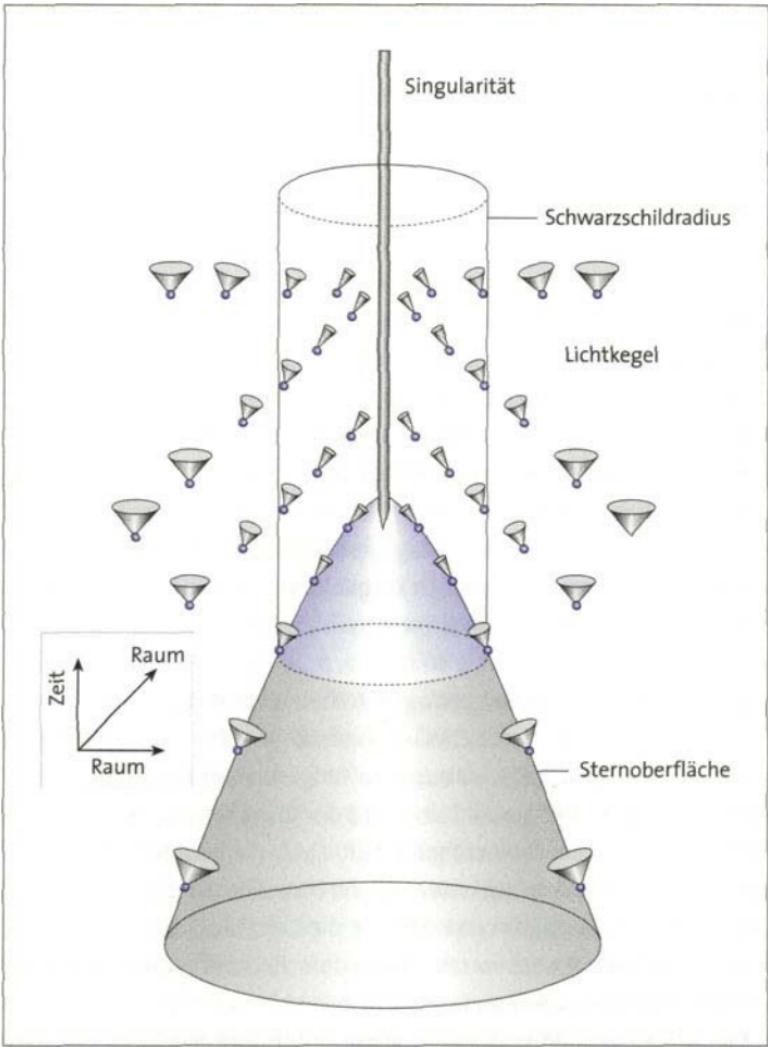


Abb. 26: Beim Kollaps in ein Schwarzes Loch verschwindet die Sternoberfläche hinter einem Horizont, dem Schwarzschild-Radius. Die Lichtkegel zeigen an, wie sich die Ausbreitung von Signalen in der Nähe des Horizontes ändert.

auch noch zumindest im Prinzip die Möglichkeit, dass Schwarze Löcher eine elektrische Ladung besitzen. Masse, Drehimpuls und Ladung kennzeichnen Schwarze Löcher vollständig für die Außenwelt. Es ist erstaunlich, dass Sterne trotz ihrer reichhaltigen Formen und Strukturen ein derart einfaches Endstadium erreichen. Ein wenig fühlt man sich an Platos Vorstellung von den »idealen Körpern« erinnert.

Schwarze Löcher sind auch für Kosmologen interessant, die ihre apokalyptischen Neigungen ausleben wollen und die Umgebung des Urknalls erleben möchten. Der Fall in ein Schwarzes Loch ist quasi ein zeitverkehrt ablaufender Urknall - leider kann über die Erfahrungen dabei nichts publiziert werden.

Beim Gravitationskollaps stürzt im Inneren des Horizonts die gesamte Masse unaufhaltsam weiter zusammen, bis sie in einem Punkt konzentriert ist. Diese Singularität von unendlicher Dichte entsteht zwangsläufig als Konsequenz der ART. Sie zeigt unmittelbar die Grenzen der Gültigkeit dieser Theorie auf.

Wie könnte der Kollaps aufgehalten werden? Bei der Kompression zu immer größeren Dichten wird irgendwann die klassische Beschreibung ungültig, denn jeder anfangs große ausgedehnte Stern wird dann in gewissem Sinne zu einem Quantenobjekt. Auch das glatte Kontinuum der klassischen Raumzeit muss irgendwann in eine quantisierte Struktur übergehen. Die Theorie, die diese Verknüpfung von Einstein'scher Gravitationstheorie und Quantentheorie enthält, hat zwar schon einen Namen - »Quantengravitation«, ist aber noch nicht in Sicht, trotz großer Aktivität auf diesem Forschungsgebiet.

Anhänger der Stringtheorie vermuten, dass diese, oder die zugrunde liegende, noch etwas rätselhafte M-Theorie, Lösungen hat, die einer Quantengravitation entsprechen. Grundbausteine dieser Theorie sind *strings* oder Membrane, subatomar kleine Saitenstücke oder Flächen, deren Schwingungen aus dem Vakuum die Welt erzeugen. Diese Schwingungen finden in wenigstens 10-dimensionalen Räu-

men statt, doch in der wirklichen 4-dimensionalen Raumzeit sind 6 dieser Dimensionen irgendwie in winzig kleinen Bereichen eingerollt und bleiben unbemerkt. Bei der Annäherung an eine Singularität, etwa beim Gravitationskollaps, kommen die aufgewickelten Dimensionen wieder zum Vorschein und an Stelle der Singularität entfaltet sich der schwingende 10-dimensionale *string*. So könnte es sein, und recht viel mehr kann man dazu jetzt nicht sagen. Die M-Theorie hat Millionen von Lösungen und bis jetzt sind diejenigen, die der wirklichen Welt entsprechen, noch nicht gefunden worden.

Gleichgewicht

Der Begriff des Gleichgewichts ist ein einfaches Konzept, aber auch ein enorm wichtiges für die Beschreibung von großen Mengen einzelner Teilchen. Betrachten wir ein Gemisch aus Strahlung und Materie, wie etwa das kosmische Plasma des frühen Universums. Wir können es als ein System aus sehr vielen Teilchen und verschiedenen Teilchensorten ansehen und auch die Strahlung als ein Gas aus Photonen (Strahlungsquanten) in dieses Bild mit einbeziehen.

Wenn nun die Zusammenstöße zwischen den Teilchen, wie auch die Streuung, Emission und Absorption der Photonen sehr häufig sind, so findet ein ständiger, reger Austausch von Energie und Impuls statt: Teilchen mit höherer Energie und Geschwindigkeit kollidieren mit weniger schnellen und energieärmeren und geben diesen etwas von ihrem Überschuss ab. Die Unterschiede gleichen sich allmählich an und schließlich wird sich das System einpendeln auf ein Gleichgewicht, einen Zustand mit einer mittleren Energie und Geschwindigkeit der Teilchen. Nur noch kleine Schwankungen um diesen Mittelwert finden statt, aber größere Abweichungen werden sofort wieder ausgeglichen. Auch die Photonen beteiligen sich über Streu-, Emissions- und Absorptionsprozesse an diesem Ausgleich. Einen derartigen Zustand bezeichnet man als statistisches oder thermi-

sches Gleichgewicht, manchmal auch als Wärmegleichgewicht. Im Gleichgewicht haben Photonen und Materieteilchen dieselbe mittlere Energie und daher auch dieselbe mittlere Temperatur.

Im expandierenden Universum verschiebt sich der Gleichgewichtszustand, denn die Temperatur fällt mit zunehmendem Weltradius proportional zum Kehrwert $R^{-1}(t)$. Hier zeigt sich noch ein interessanter Aspekt: Mit sinkender Temperatur und abnehmender Dichte werden auch die Reaktionen der Teilchen reduziert und manche Teilchensorten fallen aus dem Gleichgewicht heraus, weil sie nicht mehr aktiv am Energieaustausch beteiligt sind. So lösen sich etwa eine halbe Sekunde nach dem Urknall Protonen und Neutronen aus dem thermischen Gleichgewicht des kosmischen Substrats und folgen für sich allein der Entwicklung bis zur Synthese der leichten Elemente. Etwa 400 000 Jahre nach dem Urknall waren noch Photonen und Elektronen im thermischen Gleichgewicht, aber in jener Epoche fiel die Temperatur so weit, dass sich Atome bilden konnten. Die Elektronen wurden durch ihre Bindung an den Atomkern aus dem Verkehr gezogen und die Strahlung breitete sich ungestört aus, behielt aber die thermische Verteilung des Gleichgewichtszustandes. Allein die Temperatur sank weiter - wegen der Expansion - bis auf den heute gemessenen Wert von 2,728 Kelvin. Das Konzept des thermischen Gleichgewichts macht es den Kosmologen möglich, die Geschichte des Universums bis zu den ersten Anfängen zumindest in Modellen zurück zu verfolgen.

Das Vakuum

Als quantenmechanische Objekte haben die Elementarteilchen auch Eigenschaften, die der Vorstellung von sehr kleinen Körpern total widersprechen. Sie besitzen nämlich auch Wellencharakter, der zum Beispiel in vielen interferometrischen Experimenten mit Elektronen und Neutronen demonstriert wurde. Einem Teilchen der Masse m

kann man eine charakteristische Wellenlänge, seine »Comptonwellenlänge«

$$\lambda = \frac{\hbar}{mc}$$

zuordnen, und diese Entsprechung ist nicht nur formal. Bei der Streuung an Gittern mit einem Spaltabstand kleiner als λ verhalten die Teilchen sich wie Wellen mit der Wellenlänge λ .

Andererseits stellte sich heraus, beginnend mit den Arbeiten von Max Planck um die Jahrhundertwende, dass die elektromagnetische Strahlung, also auch die Lichtwellen, aus diskreten Energiequanten aufgebaut sind, die man Photonen nannte. Diese Welle-Teilchen-Dualität ist eine der paradox erscheinenden Grundtatsachen der Quantenmechanik. Sie deutet an, dass weder der klassische Teilchenbegriff noch die Vorstellung einer Welle der Realität dieser quantenmechanischen Objekte gerecht werden.

In der Quantenfeldtheorie charakterisiert man diese Objekte durch ein Feld, dem die charakteristischen Quantenzahlen zukommen, das den Bewegungsgleichungen und bestimmten »Quantisierungsvorschriften« unterliegt, das aber beobachtbare Eigenschaften erst zeigt in seiner Wirkung auf bestimmte Zustände. Der Zustand, der keine Teilchen enthält, ist auch im Allgemeinen der Zustand niedrigster Energie des Feldes. Er wird als Vakuum oder Grundzustand bezeichnet. In vielen Zuständen besitzt das Feld Teilchencharakter. Es gibt aber auch Konfigurationen, die zwar sämtliche Quantenzahlen des entsprechenden Teilchens aufweisen, jedoch nicht als reale Teilchen gelten können, da sie nicht die Beziehung $E = \sqrt{k^2 + m^2}$ zwischen Energie E , Masse m und Impuls k erfüllen, die ein wirklich existierendes Teilchen besitzen muss. Die Physiker sprechen etwas verkürzend von »virtuellen« Teilchen, wenn sie derartige Zustände beschreiben. So wird z.B. die Kraftwirkung zwischen Teilchen häufig als Austausch bestimmter »virtueller« Teilchen dargestellt. Das Vakuum einer Quantenfeldtheorie, der Zustand ohne Teilchen, wird in dieser Be-

Schreibung zu einem stark strukturierten Medium, angefüllt mit virtuellen Teilchen. Das klassische elektromagnetische Feld wiederum entspricht in dieser Interpretation dem Quantenfeld in einem Zustand mit großer Photonenzahl.

Das Vakuumkonzept gewann enorm an Bedeutung, als die theoretischen Physiker Ende der 60er Jahre nach Vereinheitlichungen der Elementarteilchentheorien suchten. Sie entwickelten ein Schema, das es ermöglichte, die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung als ein und dieselbe zu verstehen, sobald die Energien der Teilchen und Felder genügend groß waren. Die starke Wechselwirkung wurde in einem ähnlichen Schema mit der elektroschwachen Wechselwirkung vereinigt. Man hofft insgeheim, eine fundamentale Theorie zu finden, die alle Wechselwirkungen, auch die Gravitation umfasst - manche Physiker glauben, mit der Theorie der Superstrings sei dies bereits geschehen.

Ein grundlegender Aspekt all dieser theoretischen Modellierungen ist der stufenweise Übergang von der ultimativen vereinheitlichten Theorie zu der weniger umfassenden. Dabei verliert das System von Feldern und Teilchen in jeder Stufe an Symmetrie. Man sagt, dass die höhere Symmetrie »gebrochen« wird. So erscheinen durch die Brechung der Symmetrien der elektroschwachen Theorie die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung als etwas Verschiedenes.

Die Physiker sprechen hiervon Eichsymmetrien und meinen damit eine gewisse Mehrdeutigkeit in der mathematischen Beschreibung: Die fundamentalen Feldgrößen können in einer genau definierten Weise abgeändert werden, z.B. durch Multiplikation mit einer Funktion. Diese von Punkt zu Punkt verschiedenen Transformationen kann man sich veranschaulichen mit dem Beispiel einer Maßstabsänderung. Man kann etwa das Ausmessen eines Zimmers mit den darin befindlichen Möbelstücken in Metern oder in Zoll oder in irgend-einem anderen Maßsystem durchführen. Eine Theorie ist eichsym-

metrisch, wenn die Beziehungen zwischen den fundamentalen Feldern bei diesen Transformationen ungeändert bleiben.

Falls nur die Feldgleichungen diese Symmetrie aufweisen, nicht aber der Grundzustand, spricht man von »spontaner Symmetriebrechung«.

Die Theoretiker beschreiben nun den Übergang von der fundamentalen, hochsymmetrischen Theorie in die wirkliche Welt als eine Abfolge von Symmetriebrechungen. Interessanterweise wird dabei die Masse der Teilchen nicht explizit als elementare Größe in die Bewegungsgleichungen eingeführt, sondern sie soll sich aus den »spontanen« Symmetriebrechungen ergeben. Die Verabredung, die man hier trifft, ist zunächst völlig ad hoc. Man führt nämlich ein zusätzliches elementares Feld, das so genannte »Higgs-Feld« (nach Peter Higgs, der als Erster ein einfaches Modell dieser Art betrachtete) in die Theorie ein. Im Zustand tiefster Energie (dem »wahren« Vakuumzustand) soll dieses Higgs-Feld einen von null verschiedenen Wert v_H besitzen. Diese Festsetzung bricht die lokale Eichinvarianz der Theorie, denn in einem eichinvarianten Vakuumzustand (dem »falschen« Vakuum der höhersymmetrischen Theorie) hätte das Higgs-Feld den Wert null. Die verschiedenen Wechselwirkungen des Higgs-Felds mit den anderen Feldgrößen der Theorie bestimmen dann die Massen der Teilchen in Abhängigkeit von v . Die Entstehung der Massen ist damit ein Effekt der speziellen Zustände, die man mit Hilfe des Vakuumzustandes konstruiert, während die Dynamik selbst, d.h. die Bewegungsgleichungen, ungeändert bleiben. Die spontane Symmetriebrechung besteht also darin, dass das falsche Vakuum sich als instabiler Zustand herausstellt, der bei niedrigen Energien in das richtige Vakuum übergeht. Die alte Frage »Warum ist Etwas und nicht Nichts?« können die Physiker heute beantworten: »Nichts ist instabil und deshalb wird Etwas daraus.«

Dieser Aspekt des Übergangs vom falschen in das richtige Vakuum lässt sich sehr schön an Analogien in anderen Gebieten der Physik

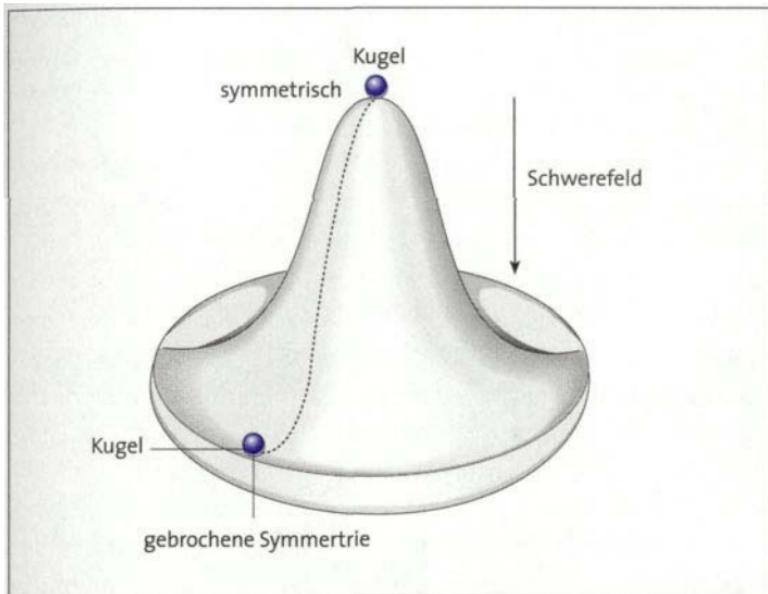


Abb. 27: Kugel und mexikanischer Hut im Schwerkfeld können als Beispiel für Symmetriebrechung durch den Grundzustand dienen: Auf der Spitze des Hutes bewahrt die Kugel die Drehsymmetrie um die Hutachse, liegt die Kugel irgendwo im Hutrand, so ist diese Symmetrie zerstört.

demonstrieren. Ein einfaches Beispiel aus der klassischen Mechanik wäre etwa eine Kugel auf der Spitze einer »mexikanischen Hut«-Fläche (Abb. 27). Der Zustand des Systems ist offensichtlich stets gleich, wenn man Drehungen um die vertikale Achse durch die Kugel und die Spitze des Hutes ausführt. Die Schwerkraft soll nur in vertikaler Richtung wirken, besitzt also ebenfalls diese Symmetrie unter Rotationen. Dieser Zustand ist jedoch nicht stabil. Eine kleine Auslenkung der Kugel lässt sie abrollen und nach der Dissipation ihrer Bewegungsenergie durch Reibung irgendwo in der »Hutkrempe« zur Ruhe kommen. Diese neue Konfiguration ist stabil, aber die Drehsymmetrie besteht nicht länger. Obwohl die tatsächliche Lage der Kugel auf

der Hutkrempe keine spezielle Bedeutung hat, wird durch jeden derartigen Zustand die ursprüngliche Symmetrie gebrochen. Die Gravitation besitzt immer noch die ursprüngliche Rotationssymmetrie, nicht aber der Zustand - eine Situation, die der »spontanen Symmetriebrechung« entspricht. Für die möglichen Zustände verschiedener Energie eines Higgs-Feldes stellt man sich eine analog geformte »hutförmige Fläche« vor. Der Zustand im Maximum entspricht einer eichinvarianten Konfiguration des Systems, kleine Störungen bewirken aber ein Absinken des Feldes in den Zustand mit der tiefsten Energie v_H in der »Hutkrempe«. Ein wesentlicher Aspekt des Higgs-Modells besteht in der Tatsache, dass sich die Form dieser Fläche selbst mit der Temperatur der Umgebung, oder auch mit dem Energiebereich, in dem die Wechselwirkungen der Elementarteilchen ablaufen, verändert. Bei sehr hohen Temperaturen wäre dann der symmetrische Zustand stabil, während bei niedrigen Temperaturen der neue stabile Grundzustand zugänglich wird. Im frühen Universum könnte auf diese Weise ein Higgs-Feld einen »Phasenübergang« bewirken, bei dem die ursprünglich bei hohen Temperaturen vorhandene Symmetrie wegen der Abkühlung durch die Expansion des Universums zu einer niedrigeren wird, und das symmetrische »falsche« Vakuum durch das »richtige« mit niedrigerer Energie ersetzt wird.

GLOSSAR

Allgemeine Relativitätstheorie - Albert Einstein formulierte eine geometrische Theorie der Schwerkraft, die Allgemeine Relativitätstheorie (1915). Die Wirkung der Gravitation wird in dieser Theorie durch Verformungen der Struktur der Raumzeit beschrieben. Im Grenzfall schwacher Gravitationsfelder wurde die ART durch eine Reihe von Experimenten glänzend bestätigt. s. S. 28, 97ff., 103

Astronomische Entfernungseinheiten - Die Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt, etwa 10^{18} cm, wird als astronomische Entfernungseinheit verwendet. Neben dem Lichtjahr wird häufig die Einheit parsec benutzt. 1 parsec = 1 pc = 3,26 Lichtjahre. Ursprünglich war 1 parsec definiert als die Entfernung, aus der die Erdbahn um die Sonne unter dem Winkel von einer Bogensekunde erscheint. Typische Entfernungen zwischen den Galaxien werden in Megaparsec angegeben. 1 Megaparsec = 10^6 parsec. s. S. 9, 12ff., 87ff.

Baryon - Teilchen, die der so genannten Starken Wechselwirkung unterliegen, bezeichnen die Physiker als Baryonen. Die einzigen, im heutigen Universum frei existierenden Baryonen sind die Protonen und die Neutronen. s. S. 40ff., 63,92

Cepheiden - In einer bestimmten Entwicklungsphase blähen sich zuvor normale Sterne zu Roten Riesen auf. Einige von ihnen pulsieren, indem sie periodisch ihren Radius verändern. Je massereicher solch ein Cepheiden-Stern ist, desto langsamer pulsiert er. Die typischen Perioden reichen von einem Tag bis zu 50 Tagen. s. S. 9, 15ff., 88f.

COBE (COsmic Background Explorer) - Am 18. November 1989 wurde der Satellit COBE von der NASA gestartet. Er umkreiste in 900km

Höhe die Erde auf einer polaren Umlaufbahn. COBE vermaß die kosmische Hintergrundstrahlung im Mikrowellenbereich mit Wellenlängen zwischen 0,5 mm und einigen cm.s. S. 26/, 46/

Eichbosonen - Die ► kraftübertragenden Teilchen in Feldtheorien, die ► Eichsymmetrien aufweisen, werden Eichbosonen genannt. Sie haben Spin 1 mit Ausnahme des (hypothetischen) Gravitons, das Spin 2 haben sollte. s. S. 115

Eichsymmetrien - Im Gegensatz zu geometrischen Symmetrien, wie den Drehungen oder Verschiebungen im Raum, die eine bestimmte Konfiguration unverändert lassen, sind Eichsymmetrien ein Ausdruck für eine gewisse Mehrdeutigkeit in der mathematischen Beschreibung einer Theorie: Die fundamentalen Feldgrößen können in einer genau definierten Weise abgeändert werden, z.B. durch Multiplikation mit einer Funktion. s. S. 775

Galaxie - Gebilde aus typischerweise 10 Millionen bis 100 Milliarden Sternen, die kugelförmig oder als flache Scheibe angeordnet sind. Die Zahl der Galaxien im beobachtbaren Universum beträgt etwa 10 Milliarden. Der mittlere Abstand zwischen den Galaxien ist etwa das Hundertfache ihres Durchmessers. s. S. 4ff., 35ff., 52ff.

Galaxis – Das griechische Wort für Milchstraße; wird heute ausschließlich als Bezeichnung für unsere Milchstraße verwendet. s. S. 20, 77

Gluonen - Teilchen, die zwischen den Quarks als Botenteilchen der starken Kraft wirken. s. S. *gi*

Gravitationslinse - Massereiche Himmelskörper lenken das Licht so stark ab, dass dieser »Gravitationslinseneffekt« beobachtet werden kann. Eine große elliptische Galaxie oder ein Galaxienhaufen kön-

nen das Licht weit dahinter liegender Galaxien so stark ablenken, dass deformierte Bilder erscheinen. Galaxien erscheinen als Teil eines leuchtenden Rings, in mehrfachen Bildern, oder nur etwas verformt als elliptisches Scheibchen. Aus der Messung der Verzerrung kann man auf die Masse der Gravitationslinse zurücksließen. s. S. 39

Hadronen - Als Hadronen bezeichnet man die stark wechselwirkenden, aus Quarks zusammengesetzten Teilchen, wie Proton, Neutron oder Pi-Meson. s. S. 92

Halo - Die Sterne unseres Milchstraßensystems bewegen sich in einer flachen Scheibe, welche auch die Spiralarme enthält. Aus der Messung der Rotationsgeschwindigkeit, die mit wachsendem Abstand vom Zentrum konstant bleibt und nicht gemäß dem Kepler'schen Gesetz außerhalb der zentralen leuchtenden Scheibe abfällt, muss man schließen, dass es nichtleuchtende Materie gibt, die in einem kugelförmigen Halo die Scheibe umgibt. Dieser Halo enthält auch einige wenige alte Sterne und die Kugelsternhaufen. Im Wesentlichen aber enthält er dunkle Materie, etwa zehnmal so viel wie die leuchtende Materie. Aus den Modellen zur Galaxienentstehung folgert man, dass alle Galaxien von einem Halo aus dunkler Materie umgeben sind. s. S. 20, 54ff., 88

Hubble-Gesetz (Hubble-Konstante) - Die Linien in den Spektren der Galaxien weisen, mit Ausnahme derjenigen weniger naher Sternsysteme, eine Verschiebung nach der roten Seite des Spektrums auf. Sie ist umso größer je lichtschwächer, d.h. je entfernter die Galaxien sind. Interpretiert als (durch die Allgemeine Relativitätstheorie modifizierter) Dopplereffekt, deutet diese Rotverschiebung eine Expansion des Systems der Galaxien an. Die Radialgeschwindigkeit wächst nach Hubble (1929) direkt proportional mit dem Abstand. s. S. 9ff., 52, 94ff.

Kosmologische Konstante - Eine von Albert Einstein 1917 im Zusammenhang mit einer Verallgemeinerung seiner Gravitations-Feldgleichung eingeführte, hypothetische Naturkonstante der Dimension eines reziproken Längenquadrats, die wegen ihrer Kleinheit höchstens in der Kosmologie von Bedeutung sein könnte. Ihr Wert konnte jetzt aus astronomischen Beobachtungen bestimmt werden. s. S. 50, 49, 56

Kräfte (kraftübertragende Teilchen) - Die Kräfte zwischen den Elementarteilchen werden in der modernen Quantentheorie als Austausch virtueller Teilchen (► Vakuum) verstanden. Diese kraftübertragenden Teilchen sind Bosonen mit dem Spin 1. Die realen Elementarteilchen, die diesen Austauschzuständen entsprechen, sind in einigen Fällen bereits identifiziert worden. s. S. 59ff., 74ff., 91f.

Leptonen - Die leichten Teilchen wie Elektronen, Neutrinos, die nicht der starken Wechselwirkung unterliegen, werden Leptonen genannt. Sie haben den Spin 1/2, sind also Fermionen wie die »Quarks. s. S. 92

Lokale Gruppe - Unsere Milchstraße ist Teil eines kleineren Galaxien-Haufens, der »Lokalen Gruppe«. Auch die beiden Magellan'schen Wolken und die Andromeda-Galaxie gehören dazu. s. S. 3ff., 15, 19ff.

Mikrolinseneffekt - Kleine Körper im Halo unserer Galaxie können das Licht ferner Sterne ablenken. Der Effekt ist von der Größenordnung von einigen Tausendstel Bogensekunden. Deshalb wird er als Mikrolinseneffekt bezeichnet. s. S. 58

NASA - Abkürzung für »National Aeronautics and Space Administration«, die Weltraumbehörde der USA. s. S. 26, 46, 119

Parsec - Der astronomische Entfernungsmaßstab benutzt parsec, bzw. Megaparsec, d.h. eine Million Parsec, als Einheit. 1 parsec ent-

spricht 3,26 Lichtjahren. Der Name kommt daher, dass die Erdbahn in dieser Entfernung unter dem Winkel von einer Bogensekunde erscheint. s. S. 14, 86ff., 119

Photon - Die Quantennatur des Lichts führt zu dem Bild, es bestehe aus einem Strom kleiner Teilchen, den Photonen, die den Spin 1 und verschwindende Masse haben. s. S. 44ff., 63, 112ff.

Planck'sches Spektrum - Ein idealer Körper, der Strahlung jeder Wellenlänge vollkommen absorbiert (Schwarzer Körper), sendet eine Wärmestrahlung aus, die nur von seiner Temperatur abhängt. Max Planck begründete das Spektrum dieser Schwarzkörper-Strahlung theoretisch. Das Universum ist offensichtlich von einer Strahlung dieser Art mit einer Temperatur von 3 K durchdrungen. s. S. 27,45

Plasma - Ein nahezu vollständig ionisiertes Gas, das aus gleich vielen freien Elektronen und positiven Ionen besteht, die sich unabhängig voneinander bewegen. Auch »vierter Aggregatzustand« (nach dem festen, flüssigen und gasförmigen) genannt. s. S. 47,44ff.,59

Quarks - Die Quarks sind die Elementarteilchen, die man als die fundamentalen Bausteine der Materie ansieht. Alle schweren Kernteilchen wie Protonen, Neutronen oder Pi-Mesonen sind aus Quarks zusammengesetzt. In diesen Teilchen sind die Quarks aber so stark gebunden, dass sie als freie Teilchen nicht auftreten. Deshalb gibt es keinen direkten experimentellen Nachweis einzelner freier Quarks, s. S. 60, 90ff., 120f.

Quasare - Auf Photoaufnahmen sternartig ausgehende Objekte großer Rotverschiebung, die häufig auch Radio- und/oder Röntgenstrahlung aussenden. Nach heutiger Auffassung handelt es sich um

Galaxienkerne in extrem »aktiven«, sehr viel Strahlungsenergie erzeugenden Jugendstadien. s. S. 13

Rotverschiebung - Durch den Einfluss von Gravitationsfeldern oder durch die Bewegung der Strahlungsquelle (Dopplereffekt) wird die Wellenlänge der ausgesandten Strahlung verschoben. Die Expansion des Universums hat eine Verschiebung der Spektrallinien ferner Galaxien zum längerwelligen, roten Ende des Spektrums hin zur Folge (► Hubble-Gesetz). s. S. 10ff., 35f., 96

Spektrum - Die elektromagnetische Strahlung zeigt eine Verteilung der Intensität auf alle verschiedenen Wellenlängen, die durch die speziellen Eigenschaften der Strahlungsquelle bestimmt wird. Das Sonnenlicht kann mit Prismen oder Beugungsgittern in seine Spektralfarben von Rot (langwellig) bis Violett (kurzwellig) zerlegt werden. Die Atome der chemischen Elemente senden Strahlung nur bei einzelnen Wellenlängen aus. Diese Spektrallinien sind der Fingerabdruck des jeweiligen Elements. Häufig wird das Sternenlicht aus dem Inneren in äußeren, kühleren Materieschichten absorbiert, und es entstehen dunkle Linien im Spektrum, Absorptionslinien. So erscheinen etwa im Sonnenlicht Fraunhofer-Linien. s. S. 10, 16, 27

Spin - Die Elementarteilchen besitzen eine Eigenrotation, den Spin, vergleichbar mit dem Drehimpuls eines rotierenden Kreisels. Der Spin ist eine fundamentale Eigenschaft des Teilchens wie seine Masse. Er wird in ganz oder halbzahligen Vielfachen der Planck'schen Konstanten \hbar gemessen ($\hbar = 1,27 \cdot 10^{-27}$ ergs). Teilchen mit halbzahligem Spin werden Fermionen genannt. Teilchen mit ganzzahligem Spin bezeichnet man als Bosonen. Bis heute wurden keine fundamentalen, unzusammengesetzten Teilchen mit dem Spin 0 entdeckt. s. S. 92, 120, 122

Sterntyp - Sterne unterscheiden sich durch Farbe und Leuchtkraft. Leuchtkräftige Sterne heißen Riesen, schwache Sterne Zwerge. So gibt es Rote und Blaue Riesen sowie Zwerge der Farben Weiß, Gelb, Rot, Braun und Schwarz. Die Farbe eines Sterns ist allein von seiner Oberflächentemperatur bestimmt. Die Sonne, ein gelber Zwerg, hat eine Oberflächentemperatur von 6000 Grad. s. S. 16ff.

Supernova - Sterne, deren Masse größer ist als die achtfache Masse der Sonne, beenden ihre Existenz in einer gewaltigen Explosion. Die im Inneren gebrauten Elemente werden dabei in das interstellare Medium verstreut. Typ Ia Supernovae sind explodierende Sterne in deren Spektrum keine Wasserstofflinien gefunden werden. Sie entstehen offenbar bei der Explosion eines Weißen Zwerges, also eines weit entwickelten Sterns, der hauptsächlich Elemente schwerer als Helium enthält. Typ II Supernovae sind Explosionen massereicher Sterne mit dicken Hälften aus Wasserstoff. s. S. 7, 16ff., 89

Symmetriebrechung, spontane - Falls nur die Feldgleichungen, nicht aber der Grundzustand (► Vakuum) einer Quantentheorie eine bestimmte Symmetrie aufweisen, bezeichnet man diese Symmetrie als spontan gebrochen. Um diese Situation darzustellen, führt man zusätzliche Felder, so genannte Higgs-Felder, die den Spin 0 haben, in die Theorie ein. Im Vakuumzustand haben diese Felder einen von null verschiedenen Wert. Die Massen und Wechselwirkungskonstanten der Theorie lassen sich aus den Vakuum-Erwartungswerten der Higgs-Felder berechnen. s. S. 71, 116f.

Urknall (Anfangssingularität) - Verbindet man die Annahmen, dass (1.) die Allgemeine Relativitätstheorie gilt und (2.) die Materie im Großen zu jeder kosmischen Zeit homogen verteilt war, d.h. konstante Dichte hatte, mit Messungen der Rotverschiebung und der mittleren Dichte des Universums, so folgt, dass in den resultieren-

den Modellen des Kosmos die Massendichte und die Temperaturen über alle Grenzen wachsen bei Annäherung an einen Zeitpunkt, der etwa 10 bis 20 Milliarden Jahre zurückliegt; das Modell hat mathematisch zu diesem Zeitpunkt eine Singularität. Dies bedeutet, dass vor Erreichen dieses Zeitpunktes bzw. dieses singulären Zustands, genannt Urknall, die Gesetze der Allgemeinen Relativitätstheorie ungültig werden. Vermutlich benötigt man eine Quantentheorie, die auch die Gravitation umfasst, um über diese extreme Frühzeit etwas aussagen zu können. s. S. 6ff., 40ff., 64ff.

Vakuum - Dieser Begriff, der ursprünglich das Leere oder den leeren Raum bezeichnete, hat in der Quantentheorie die spezifische Bedeutung des Zustandes ohne (reale) Teilchen, des Grundzustandes. Die Elementarteilchen werden in der Quantentheorie durch die Wirkung von »Feldern« auf den Grundzustand erzeugt. Das Vakuum ist im Allgemeinen auch der Zustand niedrigster Energie des Feldes. s. S. 49, 60ff., 113ff.

Wechselwirkung - Die Art der gegenseitigen Beeinflussung zwischen physikalischen Objekten bezeichnet man als Wechselwirkung. Der Bewegungszustand, die Vernichtung und Erzeugung von Elementarteilchen werden durch ihre Wechselwirkung bestimmt. Das Wort wird oft synonym mit »Kraft« verwendet. Die Physiker kennen vier fundamentale Wechselwirkungen, die starke, schwache, elektromagnetische und die gravitative Wechselwirkung. s. S. 59ff., 75, 91f.

Weiße Zwerge - Weiße Zwerge stellen die Endphase der Entwicklung sonnenähnlicher Sterne dar. Sobald die Sonne den Wasserstoff im Zentrum aufgebraucht hat, verdichtet sich die Kernzone und die Fusion des Wasserstoffs findet in einer Schale um den Kern statt. Der Stern sucht ein neues Gleichgewicht zwischen Strahlungsdruck im Inneren und Gravitationskraft und bläht seine äußere Hülle enorm

auf. Er wird zum Roten Riesen. Die Kernfusion im Inneren erfasst nun auch Helium und allmählich reichern sich schwerere Elemente wie Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, oder Neon an. Der Kern zieht sich dabei immer weiter zusammen und erreicht immer höhere Dichten. Die äußereren Schichten werden schließlich weggeblasen durch die im Inneren entstehende Strahlung und zurück bleibt ein kompakter Kern, der Weiße Zwerg. Sein Radius ist gleich dem Erdradius und seine Masse gleich der Sonnenmasse, d.h. in seinem Kern herrschen Dichten von einer Million Gramm pro Kubikzentimeter. s. S. 16, 124, 125

Weltalter (Expansionsalter) - Die Zeit, die bei Zugrundelegung des Standardmodells seit dem ► Urknall vergangen ist. s. S. 34, 84, 96

Weltraumteleskop Hubble - Ein Fernrohr mit einem Spiegel von 2,40 Metern Durchmesser, das in 600 Kilometern Höhe alle 90 Minuten die Erde umkreist. Es hat verschiedene Empfänger, die Licht des infraroten, des normalen und des ultravioletten Spektralbereichs registrieren können. s. S. 5,75

Literaturhinweise

UMFASSENDE DARSTELLUNGEN

- Hogan, Craig J.: Das kleine Buch vom Big Bang.
Eine Kosmos-Fibel. München 2000.
- Lesch, Harald und Müller, Jörn: Kosmologie für
Fußgänger. Eine Reise durch das Universum.
München 2001.
- Livio, Mario: Das beschleunigte Universum. Die
Expansion des Alls und die Schönheit der Wis-
senschaft. Stuttgart 2001.
- Longair, Malcolm S.: Das erklärte Universum.
Berlin 1998.
- Silk, Joseph: Vom Urknall bis zum Universum der
Zukunft. Heidelberg 1999.

MATHEMATISCHE LEHRBÜCHER

- Bömer, Gerhard: The Early Universe - Facts and
Fiction. Berlin 1993.
- Liebscher, Dierck-Ekkehard: Kosmologie.
Leipzig 1994.
- Peacock, John A.: Cosmological
Physics.
Cambridge 1999.
- Peebles, P. J. E.: Principles of Physical Cosmology.
Princeton 1993.

PHILOSOPHISCHE GRUNDLAGEN

- Kanitscheider, Bernulf: Kosmologie.
Stuttgart 1984.

ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE

- Sexl, Roman U. und Urbantke, Helmut K.:
Gravitation und Kosmologie. Eine Einführung
in die Allgemeine Relativitätstheorie.
Heidelberg 1995.

FRÜHES UNIVERSUM

- Barrow, John: Der Ursprung des Universums.
München 1998.
- Guth, Alan: Die Geburt des Kosmos aus dem
Nichts. München 2000.
- Hawking, Stephen W.: Eine kurze Geschichte der
Zeit. Retzbek 1988.
- Rees, Martin: Vor dem Anfang. Eine Geschichte
des Universums. Frankfurt am Main 1999.
- Weinberg, Steven: Die ersten drei Minuten. Mün-
chen 1978.

ELEMENTARTEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

- Fritzsch, Harald: Vom Urknall zum Zerfall. Mün-
chen 1999.
- Green, Brian: Das elegante Universum.
Berlin 2001.
- Treichel, Michael: Teilchenphysik und Kosmologie.
Berlin 2000.

ANTHROPISCHES PRINZIP

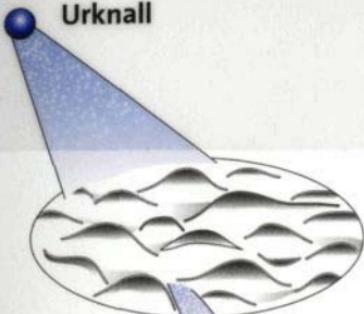
- Barrow, John und Tipler, Frank: The Anthropic
Principle. Oxford 1986.
- Breuer, Reinhard: Das anthropische Prinzip,
München 1981.

SONDERHEFTE

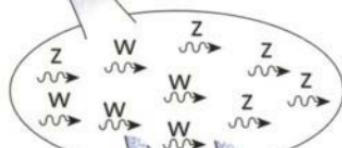
- Physik in unserer Zeit, Sonderheft, Mai 2002:
Kosmologie.
- Spektrum der Wissenschaft (Verständliche For-
schung), 1989: Gravitation.
- Spektrum der Wissenschaft, Spezial 1/2001:
Das Unendliche.

Abbildungsnachweise: Grafiken: von Solodkoff, Neckargemünd; Abb. 1, 2, 5, 6, 8, 13: Weltraumteleskop Hubble Space Telescope Science Institute; Abb. 10: COBE team; Abb. 16, 17: Boomerang team; Abb. 18: Las Campanas Survey team; Abb. 7: nach A. Riess et 31, 1998, *Astrophys. J.*; Abb. 9: nach A. Weiss et al., 1997 *Astron. Astrophys.*; Abb. 3: nach Bild 3 aus L.M. Krauss (S.164) in »Gravitation« Sonderheft Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 1989; Abb. 4: nach Bild 2 aus P.S. Osmer (S.92) in »Kosmologie«, Sonderheft Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg 1986; Abb. 14: nach R. Kayser (S.ii2) in »Schöpfung ohne Ende«, Sonderheft »Sterne und Weltraum«, Heidelberg 1997. Da mehrere Rechteinhaber trotz aller Bemühun-
gen nicht feststellbar oder erreichbar waren, verpflichtet sich der Verlag, nachträglich geltend gemachte
rechtmäßige Ansprüche nach den üblichen Honorarsätzen zu vergüten.

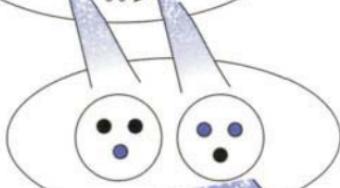
Urknall



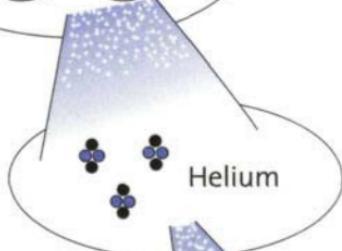
Urknall plus 10^{-43} Sekunden



Inflation (10^{-35} Sekunden)



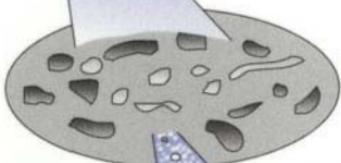
Elektroschwacher
Übergang
(10^{-11} Sekunden)



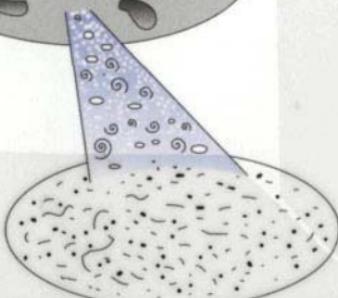
Quark \rightarrow Hadronen
(10^{-4} Sekunden)

(2 bis 1000
Sekunden)

Kosmische
Hintergrund-
strahlung
(400 000 Jahre)



Licht der ersten
Galaxien



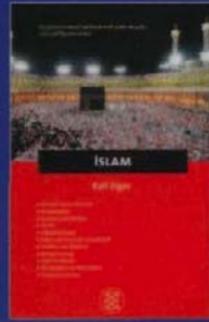
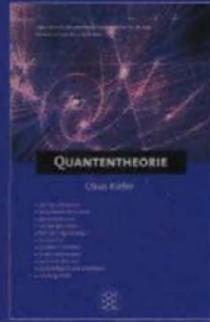
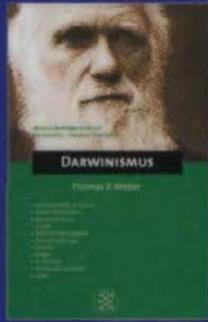
heute:
15 Milliarden Jahre

GERHARD BÖRNER ist Professor für Physik an der Universität München und Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching. Zahlreiche Veröffentlichungen zur Relativistischen Astrophysik und Kosmologie, unter anderem *The Early Universe – Facts and Fiction*.

FISCHER KOMPAKT Verlässliches Wissen kompetent, übersichtlich und bündig dargestellt. Hinweise der Autoren auf neueste Entwicklungen, interessante Literatur und empfehlenswerte Links zu jedem Band finden sich im Internet:

www.fischer-kompakt.de

WEITERE TITEL ► Darwinismus ► Europa ► Europäische Geldpolitik ► Das Genom ► Islam ► Klassische Mechanik ► Komplexe Systeme ► Quantentheorie ► Viren



www.fischer-tb.de € 8,90 (D)

ISBN 3-596-15355-7



9 783596 153558