

Kosmologie, einfach

Gerhard Graw¹

¹*Fakultät für Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München*

Astronomie und Kosmologie sind aktuelle Themen, die Fortschritte sind verblüffend. Vorstellungen, die vor zehn Jahren noch mit großer Zurückhaltung angesprochen wurden, gelten heute als gut begründet, oder zumindest doch als etablierte Arbeitshypothesen. Die Entwicklung des Kosmos von seinem Anfang her wird als ein physikalisch bestimmtes Geschehen diskutiert.

Dieser Sicht entspricht auch der Titel eines Forschungsprojekts >Origin and Structure of the Universe<, zu dem sich Kollegen der LMU, der TUM, der Max-Planck-Institute in München, und der ESO verabredet hatten. Es war eines der wenigen Projekte, die in der Begutachtung als >Exzellenzcluster< ausgezeichnet wurden. Gefeierte wurde dies in einem ambitionierten Festakt am 23.1.2007 im Deutschen Museum. Astrophysik ist nicht mein Fachgebiet, als experimenteller Kernphysiker hatte ich jedoch Berührungspunkte. Zu Fragen der nuklearen Astrophysik konnte ich mit Arbeiten am Münchener Tandem-Beschleuniger zumindest am Rande beitragen.

Der folgende Text ist ein Versuch, als Beobachter des Gebiets über Kosmologie als Ganzes zu schreiben, und dies in möglichst einfacher Weise. Als Adressaten stelle ich mir den eher allgemein interessierten Leser vor, der mit Physik und Astronomie weniger befasst ist und den man mit Zahlen und Formeln verschreckt. Dementsprechend soll der Text eine Art Spaziergang werden durch den Bereich des aktuellen Wissens. Es geht mir um die grundlegenden Phänomene und deren physikalische Beschreibung. Dabei wird der Kürze halber nicht gesprochen über experimentelle Techniken. Faszinierend sind insbesondere die Instrumente, mit denen der Sternenhimmel, ungestört durch die Erdatmosphäre, von Satelliten aus vermessen wird. Derzeit aktiven Forschern werde ich nicht mit Namen. Mir fehlt die Kompetenz Prioritäten zu werten.

Die Lichtquellen am Himmel werden im Lichte der Physik zu Objekten ganz unterschiedlicher Größe und Natur. Die physikalische Beschreibung vermittelt auch Vorstellungen davon, wie diese Objekte entstanden sind und welche Entwicklung sie nehmen werden. Von Kosmologie spricht man, wenn es um den inneren Zusammenhang von all diesem geht. Dementsprechend ist Kosmologie auch Geschichtsschreibung, und wir erwarten Aufschluß über den Ursprung unseres materiellen Umfelds.

In diesem Text stelle ich zunächst die verschiedenen kosmologisch relevanten Objekte vor, in der Reihenfolge ih-

rer Entfernung. Ihre Entstehung und Verteilung kann man als Strukturbildung im Kosmos bezeichnen. Danach wird die Expansion des Kosmos diskutiert und ihr Einfluss auf die Strukturbildung. Abschließend geht es um Überlegungen zu einem Anfang, um die beobachteten Zusammenhänge physikalisch zu begründen.

I. DIE GESCHICHTE VON ERDE UND SONNE

Die physikalisch korrekte Beschreibung der Bewegung von Sonne, Erde und Planeten begann mit Kopernikus, Galilei und Kepler. Eine Erklärung, warum die Bewegungen diese Eigenschaften zeigen, haben wir erst seit Newton. Durch seine von ihm erdachte Physik der Mechanik und durch sein Gesetz der Gravitation. Newton folgte dem selbstgesteckten, und für die damalige Zeit revolutionären Ziel, die Bewegung der Planeten um die Sonne und den Fall des Apfels vom Baum als Folge ein und derselben Physik zu beschreiben. So begründete er die Naturwissenschaften im heutigen Sinne.

Inzwischen haben wir Vorstellungen davon, wie dies System von Sonne, Erde und Planeten entstanden ist: Vor knapp 5 Milliarden Jahren kamen Wolken aus interstellarem Gas und aus Staub aus früherer Supernova-Explosionen eher zufällig zusammen. In wechselseitiger Anziehung auf Grund der Schwerkraft zog diese Gas-Staub Wolke sich zusammen. Mit der Dichte nahm auch die Temperatur zu. Die Erhöhung der Temperatur bei Kompression eines Gases kennen wir vom warmen Föhnwind und vom selbstzündenden Dieselmotor. Die Kontraktion der Gas-Staub Wolke endete, sobald sich ein Gleichgewicht einstellte zwischen dem Druck des Gases und der Schwerkraft. Temperatur und Druck reduzierten sich immer dann, wenn das Gas Wärme jedoch abstrahlen konnte. Anschließend konnte die Schwerkraft das Gas weiter komprimieren, das Gleichgewicht stellte sich bei entsprechend höheren Werten von Druck und Temperatur neu ein, und so fort. Wenn man fragt, wie schnell dies geschah, werden die Treibhausgase wichtig. Das sind alle molekularen Gase, die bereits bei niedrigen Temperaturen Wärme abstrahlen. Eher leichte Sterne wie unsere Sonne bilden sich bevorzugt, wenn die Kühlung durch Abstrahlung effektiv ist. Nach einigen zig Millionen Jahren erreichten im zentralen Bereich Dichte und Temperatur Werte, dass nukleare Brennprozesse zündeten. Somit wäre die Geburt der Sonne als Stern zunächst einmal verstanden. Warum aber gibt es die Planeten?

A. Die Planeten

Bei der Bildung der anfänglichen Gas-Staubwolke wäre es eher Zufall, hätten die Teilbereiche, aus verschiedenen Richtungen kommend, sich alle exakt auf ein gemeinsames Zentrum hin bewegt. Viel wahrscheinlicher haben Teilbereiche sich eher streifend getroffen, und sich anschließend vermengt. Dies gleicht der Situation zweier Eiskunstläufer, die versetzt aufeinander zukommen, an den Händen fassen und sich infolgedessen gemeinsam drehen. Sie drehen sich umso schneller, je näher sie sich kommen. Mit umso größerer Kraft haben sie sich dann aber auch zu halten. Im Fall der rotierenden Gas-Staubwolke wird diese Kraft durch die Gravitation bewirkt. Dementsprechend hielten die drehenden Bereiche der Gas-Staubwolke Abstand vom Zentrum der Rotation, so wie heute die umlaufenden Planeten Abstand halten von der Sonne. Eine Kompression der Gas-Staubwolke in Richtung parallel zur Drehachse jedoch stand nichts im Weg. So entstand eine flache, um ihre Achse rotierende Scheibe. Sie unterschied sich jedoch ganz wesentlich von der Rotation einer Diskus-scheibe, da sich die sonnennahen Bereiche wesentlich schneller drehten als die sonnenfernen. Dies ist auch die Aussage des dritten Keplerschen Gesetzes.

Wichtig ist die Wechselwirkung benachbarter, umlaufender Bereiche, sei es durch gravitative Anziehung, Reibungsprozesse oder turbulente Strömungen. Durch sie werden die schnelleren, sonnennahen Bereiche abgebremst und die langsameren, sonnenfernen Bereiche beschleunigt. Sie bewirkt, dass der Drehimpuls, eine Erhaltungsgröße der Physik, zunehmend von den äußeren Bereichen getragen wird. Insgesamt ergeben sich Trennungen, einige Bereiche bewegten sich auf das Zentrum zu, andere weg. Die Astronomen nennen diesen Vorgang Akkretion. Bei diesem Vorgang in einem zentralen Feld der Gravitation wird Energie freigesetzt. Man kann sie als Reibungsenergie bezeichnen, welche die Temperatur entsprechend erhöht. Der zeitliche Ablauf der Strukturbildung in radialer Richtung war bestimmt durch die Stärke der Reibungskräfte, die sich in diesem dynamisch ablaufenden Prozess einstellten.

So entstanden im Zentrum der Vorläufer der Sonne und in den äußeren Bereichen der Scheibe einige Ringe, ähnlich denen des Saturn. In diesen sammelten sich anschließend größere Einheiten und schließlich die Vorläufer der heutigen Planeten. Dementsprechend laufen alle diese Objekte mit einheitlichem Drehsinn in einer Ebene, der Ekliptik, um. Newton konnte für diese Beobachtung noch keinen Grund angeben, er verwies auf den Ratschluss Gottes.

Entscheidend für das Entstehen unseres Planetensystems war die Ausbildung einer Scheibe von Gas und Staub. Wird diese ausgeprägte Ordnung nicht erreicht, so erzwingt die Erhaltung des Drehimpulses die Bildung meh-

rerer Sternen. Häufig findet man zwei Sterne, Doppelsterne, die sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt bewegen.

B. Nukleares Brennen

Die Wärme, der wir unsere Existenz verdanken, liefert die Sonne seit 4,5 Milliarden Jahren, und dies wird noch weitere 5 Milliarden Jahre so andauern. Diese Energie wird erzeugt im Innern der Sonne durch nukleares Brennen. Bei einer Temperatur von etwas mehr als 15 Millionen Grad hat sich dort ein Gleichgewicht eingestellt von Druck und Gravitation, und auch von Energieerzeugung und Energietransport nach außen. Die Temperatur in der Sonne fällt zur Oberfläche hin ab. Von dieser aus strahlt sie die Wärmeenergie bei einer Temperatur von 5800 Grad Kelvin ab. Unser Auge ist empfindlich für diese Art von Strahlung, dementsprechend wird sie als sichtbares Licht bezeichnet. Der Transport der Wärmeenergie zur Oberfläche braucht lange, als typische Zeit werden hunderttausend Jahre genannt. Im inneren Bereich erfolgt sie allein durch Strahlung im heißen Medium. Aufgrund vielfacher Streuung ist dies ein sehr langsamer Prozess. Im Bereich der letzten 20 Prozent des Weges zur Oberfläche hin wird die Konvektion entscheidend. Dabei ist der Transport von Wärme mit dem Transport von Materie verbunden. In Strömungsmustern ähnlich denen, die man in einer Schicht von Olivenöl in einer heißen Bratpfanne sehen kann, steigt Material auf und ab. In der Sonne sind dies sehr engräumige Strukturen, sie werden als Selbstorganisation verstanden.

Beim nuklearen Brennen in der Sonne entstehen aus jeweils vier Wasserstoffatomen ein Heliumatom. Dies geschieht in einem mehrstufigem Prozess von Kernreaktionen. Die Bindung im Atomkern des Heliums ist stark: Die Masse der entstandenen Heliumatome ist um 0,7 Prozent kleiner als die Masse der vier Wasserstoffatome, aus denen diese gebildet wurden. Die Differenz entspricht der freigesetzten Wärmeenergie. Im Vergleich zu chemischen Reaktionen ist sie riesig, mehr als eine Million mal größer. Sie ist Folge einer fundamentalen Kraft, der Starken Wechselwirkung, welche nur im kurzen Bereich nuklearer Abstände wirksam ist.

Das Endprodukt der nuklearen Reaktionen, der Heliumkern, besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Diese im Kern gebundenen Neutronen waren im Ablauf der Reaktionskette entstanden. Dazu mussten sich jeweils ein Proton und ein Elektron in ein Neutron und ein Neutrino wandeln. Neutrinos sind elementare Teilchen, vergleichbar dem Elektron, jedoch elektrisch ungeladen und mit verschwindend kleiner Masse. Als nahezu masselose Teilchen ähneln sie den Lichtquanten und bewegen sich mit einer Geschwindigkeit, die sich von der des Lichts praktisch nicht unterscheidet. Ihre Energie hängt ab von der Energiebilanz bei der Erzeugung und kann beträcht-

lich sein. Die Umwandlung eines Elektrons in ein Neutrino und eines Protons in ein Neutron ist ein Prozess der Schwachen Wechselwirkung, einer weiteren fundamentalen Kraft. Nur sie kann Eigenschaften eines Teilchens auf ein anderes übertragen. Die Anzahl der Teilchen bleibt erhalten, es ändert sich nur die Zuordnung von Eigenschaften. Diese Wechselwirkung hat eine extrem kurze Reichweite. Dementsprechend sind bei niederen Energien Reaktionen auf Grund dieser Wechselwirkung sehr selten, deswegen wird sie als schwach bezeichnet. Da Neutrinos, neben der Gravitation, nur der Schwachen Wechselwirkung unterliegen, durchdringen sie größte Materiedichten. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit für den Stoß eines Neutrinos mit der Materie, einem gebundenem Elektron etwa, extrem gering. So sind riesige Detektoranlagen gebaut worden, um in jahrelangem Betrieb zumindest eine kleine Zahl solcher Stoßprozesse nachzuweisen. Dabei ist die Zahl der Neutrinos, die den Detektor passieren, riesig. Durch Messungen dieser Art sind unsere Vorstellungen von den Vorgängen im innersten Kern der Sonne im Detail bestätigt worden. Der Pionier dieser Physik war Raymond Davis Jr. (Nobelpreis 2002). Die nachgewiesenen Neutrinos waren jeweils erst 8 Minuten zuvor in der Sonne entstanden. Die erzeugte Wärme hingegen brauchte hunderttausend Jahre um vom Innern an die Oberfläche zu gelangen. Von dort aus erreicht sie uns dann, in Form von sichtbarem Licht, in ebenfalls 8 Minuten. Wäre die Schwache Wechselwirkung nur etwas stärker, wäre die Reaktionsrate im Brennprozess größer, und alles Leben auf der Erde versengt.

C. Erde und Mond

Der Mond entstand nach dem Aufprall eines planetenartigen Körpers auf die Erde, als diese noch keine 100 Millionen Jahre alt war. Der Stoß war streifend und die Drehachse der Erde wurde dabei kräftig verrückt. Deswegen haben wir statt ewigen Frühlings die wechselnden Jahreszeiten. Das explosionsartig verstreute Material des Himmelskörpers fiel zum größeren Teil auf die Erde, ein Rest blieb zurück als eine Art von planetarer Scheibe, aus der sich bald der Mond herausbildete. So versteht man, dass das Material der äußeren Erdkruste sich von dem des Erdkerns unterscheidet, jedoch dem des Mondes ähnlich ist.

Die Strahlungswärme der Sonne und der solare Wind - das ist der eruptive Ausstoß heißer Materie aus der Sonne - haben alle Reste der anfänglichen Gas-Staubwolke ins All verweht. Der solare Wind hindert auch heute das interstellare Gas daran, in den planetaren Bereich einzudringen. Ein interplanetarer Bereich mit einem Radius von etwa hundert Erd-Sonne-Abständen ist vergleichsweise frei von interstellarem Gas. Die Grenze (der >termination shock<) wurde im Jahre 2005 erstmals von der Raumsonde Voyager passiert.

Die junge Erde hatte wegen der anfänglich sehr hohen Temperaturen alle leicht flüchtigen Stoffe verloren. Was wir heute davon auf der Erde finden, nämlich Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Wasser, ist mineralischen Ursprungs und wurde erst später freigesetzt. Die dargelegte Geschichte der Entstehung impliziert, dass alle Materie der Erde bereits vor der Bildung des Sonnensystems vorhanden war. Wegen des Verlusts der leicht flüchtigen Stoffe in der Frühzeit ist der Anteil der leichten Elemente jedoch stark reduziert. Im Laufe der Abkühlung und der Verfestigung der Erdkruste hatten sich die Elemente so geschichtet, sodass wir von den schweren Atomen, insbesondere vom Eisen im Erdkern, nur wenig merken.

D. Fraunhofers Linien

Die Zusammensetzung der ursprünglichen Gas-Staubwolke ist uns in der äußeren Atmosphäre der Sonne überliefert. In Benediktbeuern gelang es 1813 Joseph Fraunhofer erstmals, mit einem Prisma das Licht der Sonne so zu zerlegen, dass er nicht nur das Spektrum des Regenbogens sah, sondern darin auch sehr enge Bereiche, sogenannte Linien, die weniger hell sind. Das Spektrum des Regenbogens erzeugen heiße Körper, etwa der Draht einer Glühlampe. Falls man zwischen Lichtquelle und Beobachter freie Atome oder Moleküle einbringt, absorbieren diese das Licht bestimmter Wellenlängen, welche für die jeweilige Substanz charakteristisch sind. So entstehen die Linien im Spektrum. Chemiker nutzen diese Eigenschaft zur Identifikation unbekannter Stoffe. Entsprechend haben wir aus Fraunhofers Linien im Sonnenlicht quantitative Information über die Zusammensetzung der äußeren Sonnenatmosphäre. Nach Gewichtsanteilen besteht sie zu 75 Prozent aus Wasserstoff und zu 24 Prozent aus Helium. Alle weiteren Elemente machen nur etwa 1 Prozent aus. Dieses eine Prozent stammt aus dem im Gas gesammelten Material von vorausgegangenen Supernova-Explosionen, Wasserstoff und Helium hingegen waren >immer schon< da. Wir werden das noch besprechen. Deutlich weniger schwere Elemente zeigen Sterne, d.h. Sonnen, die viel älter sind. Sie stammen aus Zeiten, in denen das interstellare Gas noch weniger stark mit Supernova-Produkten angereichert war.

II. DIE MILCHSTRASSE

Unsere Sonne ist ein Stern unter anderen Sternen. Es gibt Sterne mit größerer Masse, bei denen sind Dichte und Temperatur im Innern größer sind. Sie brennen schneller und strahlen während dieser Zeit entsprechend heller im bläulichen Licht. Leichtere Sterne sind langlebiger und leuchten schwächer und rötlich.

Der uns am hellsten erscheinende Stern ist Sirius. Der

uns nächste Stern ist der erst 1913 beobachtete Proxima Centauri am Südhimmel, in einer Entfernung von 4 Lichtjahren, in der Nachbarschaft von Alpha Centauri, dem am dritthellsten erscheinenden Stern. Mit unbewaffnetem Auge sieht man am nächtlichen Himmel 3000 bis 6000 Sterne und als bandförmige Aufhellung die Milchstraße. Mit seinem Fernrohr beobachtete Galileo Galilei 1609 erstmals, dass sich die Milchstraße in eine Vielzahl einzelner Sterne auflöste. Bekannt ist das Bild in der Alten Pinakothek von Adam Elsheimer, das er im selben Jahr in Rom gemalt hatte: Die Milchstraße ist, in künstlerischer Freiheit, als Häufung von Einzelsternen dargestellt. Auf Grund von Sternzählungen erkannte Wilhelm Herschel 1785 die Scheibenform der Galaxis, mit der Sonne ziemlich weit außen in der Scheibe. Von dieser Information begeistert, folgerte Immanuel Kant, dass die mit astronomischen Fernrohren zu erkennenden elliptisch oder kreisförmig, neblig erscheinenden Objekte am Himmel Galaxien seien, ähnlich unserer Milchstraße. Inzwischen weiß man auch, dass alle 6000 einfach sichtbaren Sterne zur Milchstraße gehören.

A. Struktur der Milchstraße

Entsprechend der Einsicht von Immanuel Kant orientierte man sich zum Verständnis der Milchstraße, der Galaxis, lange Zeit an den Eigenschaften der anderen Galaxien, die man unter verschiedenen Blickwinkeln von außen sehen kann. So wie die Sonne ein Stern ist unter vielen, so ist unsere Galaxis eine unter vielen Galaxien. Es gibt größere und kleinere, wobei unsere eher groß ist. Die flache Scheibenform erinnert an das, was wir von der Frühzeit des Sonnensystems wissen. Die dazu dargestellten physikalischen Gesichtspunkte gelten auch hier.

Unsere Galaxis besteht aus etwa 300 Milliarden Sternen und aus interstellarem Gas. Von diesem hatten wir bei der Entstehung unseres Sonnensystems bereits gesprochen. Die galaktische Scheibe hat einen Durchmesser von 100.000 Lichtjahren. Im Zentrum ist sie ausgebaucht, weiter außen mit 3.000 Lichtjahren Dicke wesentlich flacher. Analysiert man nur die Leuchtkraft, so zeigt diese in einigem Abstand vom Zentrum die Form einer Spirale, im Bereich nahe dem Zentrum die eines Balkens. Diese auffällige Verteilung der Leuchtkraft beruht auf dem Beitrag weniger, schnell brennender und deshalb stärker leuchtender Sterne. Diese jungen Sterne zeigen einen hohen Anteil schwerer Elemente. Betrachtet man jedoch, unabhängig von der Leuchtkraft die Verteilung aller Sterne in der Galaxis, so verschwindet die Struktur der Spirale. Die Anzahldichte nimmt vom Zentrum aus ab.

Zur Galaxis gehört noch ein sie umgebender, kugelförmiger Außenbereich von etwa 160.000 Lichtjahren Durchmesser, der so genannte Halo. In dieser Kugel-

schale kennt man etwa 150 Kugelsternhaufen. Dies sind jeweils gravitativ gebundene Ansammlungen von etwa hunderttausend sehr alten Sternen mit entsprechend geringem Anteil von schweren Elementen. Dazu kommen weitere alte Sterne und Gas sehr geringer Dichte. Die Kugelsternhaufen laufen auf elliptischen Bahnen um das galaktische Zentrum, dabei zeigen sie jedoch keine einheitliche Richtung. Anders als die galaktische Scheibe ist der Halo weitgehend staubfrei.

B. Die Sonne in der Milchstraße

Die Sonne umkreist das Zentrum des Milchstraßensystems in einem Abstand von etwa 25.000 Lichtjahren. Sie befindet sich etwa 15 Lichtjahre nördlich der Mittelebene der galaktischen Scheibe, innerhalb des Orion-Arms, in einem weitgehend staubfreien Raumgebiet, der Lokalen Blase. Für einen Umlauf um das Zentrum der Galaxis, das sog. Galaktische Jahr, benötigt die Sonne ungefähr 230 Millionen Jahre, was einer Umlaufgeschwindigkeit von etwa 220 km/s entspricht.

C. Das nähere Umfeld der Milchstraße

Um das Milchstraßensystem herum gibt es Zwerggalaxien und irreguläre Galaxien. Die bekanntesten davon sind die Große und die Kleine Magellansche Wolke, mit denen die Milchstraße über eine etwa 300.000 Lichtjahre lange Wasserstoffgasbrücke, dem Magellanschen Strom, verbunden ist. Die am nächsten gelegene Zwerggalaxie ist der Canis-Major-Zwerg, mit einer Entfernung von nur 42.000 Lichtjahren vom Zentrum der Milchstraße und 25.000 Lichtjahren von unserem Sonnensystem. Diese Zwerggalaxie wird von den Gezeitenkräften der Milchstraße auseinandergerissen und ihr bald einverleibt sein. Ähnlich verlaufen die Prozesse bei der 50.000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum entfernten Sagittarius-Zwerggalaxie. Auf diese Weise wird die Masse der Milchstraße weiter anwachsen.

Mit zwei weiteren Spiral-Galaxien, dem Andromeda-Nebel, 2,5 Millionen Lichtjahren entfernt, und dem Dreiecksnebel, 3 Millionen Lichtjahren entfernt, sowie einigen kleineren Galaxien, bildet die Milchstraße die sog. Lokale Gruppe. Sie ist Bestandteil des Virgo-Superhaufens, und strebt mit anderen Großstrukturen dem Großen Attraktor entgegen. Die Andromeda-Galaxie ist mit unserer Galaxis vergleichbar. Sie ist jedoch etwas ausgedehnter und hat etwa 3 mal mehr Sterne. Der Dreiecksnebel hingegen ist deutlich kleiner. Beobachtungen und Computer-Simulationen zeigen, dass die Andromeda-Galaxie und die Milchstraße auf Kollisionskurs liegen. Sie nähern sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 200 km/s und werden in einigen Milliarden Jahren einander durchdringen und so zu

einem entsprechend größeren Sternensystem verschmelzen. Eine weitere Galaxie im Nahbereich ist Centaurus A am Südhimmel. Sie ist die nächstgelegene elliptische Galaxie und strahlt besonders hell im gesamten Bereich des elektromagnetischen Spektrums.

III. SUPERNOVAE

Für die moderne Astronomie erwies sich der 24. Februar 1987 als wichtiges Datum. Ein bis dahin wenig auffälliger Stern in der Großen Magellanschen Wolke, 170.000 Lichtjahre entfernt, leuchtete zunehmend heller auf, strahlte im Mai fast so hell wie der Polarstern und wurde dann wieder schwächer. Heute sieht man den Stern umgeben von einer expandierenden, leuchtenden Wolke. Man spricht von einer Supernova. Seit 1604, als Kepler und Galilei einen an Helligkeit alle anderen Fixsterne übertreffenden Stern sahen, war dies das am stärksten erscheinende Aufstrahlen eines Sterns. Nur Tycho Brahe hatte 1572 eine noch hellere Erscheinung beobachtet. In beiden Fällen waren dies Sterne in der Galaxis, die größere Helligkeit hatte ihren Grund in der geringeren Entfernung. Der Vorläuferstern der Supernova 1987 hatte etwa 17 Sonnenmassen und brannte entsprechend intensiv, er wurde nur 20 Millionen Jahre alt. Verglichen mit der Sonne verfeuerte er seinen wesentlich größeren Energievorrat 500 mal schneller. Als Supernova bezeichnet man die Explosion eines Sterns. Sie findet statt, wenn der zentrale Bereich nicht mehr genügend Energie nachliefert und deshalb dem hohen Druck der Gravitation nicht mehr standhält. Dies löst eine Implosion im Innern aus, der eine Explosion des äußeren Bereichs folgt. Im sichtbaren Licht sah man nur die Veränderungen an der äußersten Oberfläche, die zeitlich verzögert sind. Vom Geschehen im Sterninneren berichteten Neutrinos. Dies ist vergleichbar mit unseren Beobachtungen der Sonne, Allerdings brauchten die Neutrinos für die Reise zu uns nicht 8 Minuten, sondern 170.000 Jahre. Aus der Beobachtung der Neutrinos haben wir den Zeitpunkt des Ereignisses und eine vergleichsweise solide Grundlage, den Mechanismus dieser Supernova zu diskutieren.

A. Der Supernova Mechanismus

Die Entwicklung dieses Sterns begann, wie auch bei der Sonne, mit dem Verbrennen von Wasserstoff zu Helium im Zentrum. Dieser Prozess lieferte die meiste Energie. War der Wasserstoff im zentralen Bereich verbrannt, fehlte der dem gravitativen Druck standhaltende Energienachschub. Die äußeren Schichten des Sterns drückten den inneren Bereich zusammen. Entsprechend stiegen Temperatur, Dichte und Druck, bis im zentralen Bereich Helium zu Kohlenstoff verbrennen konnte, und in der benachbarten nächstäußeren Schicht Wasserstoff zu Helium. Heliumbrennen jedoch hat bei weitem

nicht die Heizkraft von Wasserstoffbrennen, deshalb ging das Zusammenpressen des Kerns rasch weiter. Auf das Heliumbrennen folgte das noch ineffektivere Kohlenstoffbrennen, entsprechend verlagerte sich das Heliumbrennen und das Wasserstoffbrennen in weiter außen liegende Bereiche. Man spricht von Schalen, wie bei einer Zwiebel, sollte dabei aber sehen, dass im Ablauf dieses Geschehens die Größen der Schalen gewaltig schrumpften. Das Brennen war zu Ende, als Atomkerne mit der Masse von Eisen gebildet waren. Bei schwereren Atomkernen ist der Effekt der elektrischen Abstoßung der Protonen im Atomkern größer als der Zugewinn an Bindungsenergie auf Grund der Nuklearen Kraft der Starken Wechselwirkung. Nach dem Ende des Brennens hielt das System von Elektronen und Atomkernen dem Druck der Gravitation nicht mehr Stand. Der weitere Ablauf wird auch durch die Quantenmechanik bestimmt:

Je dichter Elektronen gepackt sind, desto schneller bewegen sie sich. Dies ist eine zentrale Aussage der 1926 formulierten Quantenmechanik. Ist ein Körper auch noch heiß, so ist der quantenmechanisch begründeten Bewegung die thermische Bewegung überlagert. Falls bei abnehmender Temperatur der thermisch verursachte Druck unwichtig werden sollte, bleibt immer noch der quantenmechanisch begründete Druck. Er bewirkt die Festigkeit von Stoffen, so wie wir dies in der täglichen Erfahrung wahrnehmen. Die Elektronen tragen die Kompressionsenergie als Änderung der kinetischen Energie ihrer Bewegung. Im Fall eines dicht gepackten Sterns sind es also die Elektronen, welche die Kompressionsenergie aufnehmen und der Gravitationsenergie das Gleichgewicht halten. Erhält ein kompaktes System dieser Art Zuwachs von außen, sodass seine Masse zunimmt, so verkleinert es auf Grund der Gravitation sein Volumen, einer Verdoppelung der Masse entspricht eine Halbierung des Volumens. Hierbei kann die Energie der Elektronen Werte erreichen, bei denen die Zunahme ihrer Masse wichtig wird. Dies ist eine Aussage der von Einstein 1906 formulierten Speziellen Relativitätstheorie. So ergeben sich bei Volumenabnahme weniger große Werte des Drucks, als ansonsten zu erwarten wären. Auf diese Weise wird der kompakte Bereich instabil, sodass er kollabiert. Dies erfolgt bei einer Masse die etwa 40 Prozent größer ist als die der Sonne. Diese Einsicht hatten bereits um 1930 mehrere Physiker. Der kritische Wert der Masse wird mit dem Namen von Subrahmanyan Chandrasekhar verbunden (Nobelpreis 1983).

Auf Grund der hohen Temperaturen und auf Grund von Prozessen der Schwachen Wechselwirkung ist dies idealisierte Modell zu ergänzen: Mit der Kompression steigt die Temperatur, sodass die Gammaquanten des Strahlungsfelds Energien erreichen, mit denen sie die Bindungen der Atomkerne auflösen, und Neutronen, Protonen und Heliumkerne entstehen. Parallel dazu nimmt die Energie der Elektronen weiter zu, so dass diese Proto-

nen in Neutronen wandeln und dabei in Neutrinos übergehen. Bei diesen Prozessen der Schwachen Wechselwirkung sind die Reaktionsraten groß auf Grund der extrem hohen Dichten. Somit treibt das Verschwinden von Elektronen die gravitative Kontraktion weiter an. Der selbstverstärkende Prozess einer Implosion endet sobald alle Elektronen verschwunden sind und es zwischen den Neutronen keinen Platz mehr gibt. Es verbleibt eine Ansammlung von Neutronen mit einer Masse im Bereich der Chandrasekhar-Masse. Deren Dichte ist vergleichbar der im Innern großer Atomkerne, sodass Neutronensterne dieser Art Durchmesser von weniger als 30 km haben. Da bei der Freisetzung der Neutrinos die Bewegungsenergie der Protonen und Neutronen eine vergleichsweise geringe Rolle spielte, wird die Energie der Elektronen, d.h. die freigewordene Gravitationsenergie, von den Neutrinos getragen.

B. Neutrinoastronomie

Bei dem beschriebenen gravitativen Kollaps bis hin zum Neutronenstern wurde eine immense Energie frei, sehr viel mehr als bei allen vorher abgelaufenen Brennprozessen. Der größte Teil dieser Energie entweicht mit den Neutrinos ins All. Im Vergleich zur Sonne haben diese Neutrinos ungleich höhere Energie. Im extrem dichten, kernnahen Bereich sind sie an Streuprozessen und Kernreaktionen beteiligt, und somit auch Ursache für das Absprengen der äußeren Schale, die wir als Explosion wahrnehmen. Diese Prozesse bewirken Verzögerungen der Neutrinos im Sekundenbereich. Aus den genannten Werten zur kollabierenden Masse und zum Durchmesser des verbleibenden Kerns lässt sich die insgesamt freigesetzte Energie, wie auch Anzahl und mittlere Energie der erzeugten Neutrinos, abschätzen. Das absolut Beeindruckende ist nun, dass diese Neutrinos genau so, als sekundenkurzes Ereignis und in der richtigen Anzahl, beobachtet worden sind! Es gab zwei riesigen Apparaturen, eine davon in der Kamioka-Mine in Japan. Sie waren als Neutrinodetektoren zu einem anderen Zweck, dem Nachweis eines hypothetisch angenommenen Zerfalls des Protons, konzipiert. Registriert wurden damals 11 hochenergetische Neutrinos. Nach 170.000 Jahren Laufzeit trafen sie innerhalb einer Sekunde ein! Danach sprach man von Neutrinoastronomie. Leider ist das für Doktoranden wenig attraktiv, denn wann wird es die nächste Supernova ähnlich nahe bei uns geben? Und der Nobelpreis dafür ist auch bereits vergeben, er ging 2002 Chef der Gruppe, Masatoshi Koshiba.

In der Andreas-Gurski Foto-Ausstellung 2007 im Haus der Kunst wurde ein grandioses Photo vom Innern des inzwischen wesentlich vergrößerten Detektors in Kamioka gezeigt. Wartungsarbeiten, bei denen zwei Forscher Schlauchboot fahren in einem Wassertank. Das Wasser wird als Detektorflüssigkeit verwendet. Die riesige Höhle des Tanks ist ausgekleidet mit Photodetektoren, welche

Lichtblitze registrieren, die im Wasser durch Stöße mit Neutrinos ausgelöst werden. Physik und Astronomie haben die Kunstszene erreicht!

C. Supernovae, der weitere Ablauf

Bei der extrem schnellen Implosion wurde Raum frei in den dichten Materie der nächstäußeren Sternbereiche einstürzte. Diese wurde vom zentralen Kernbereich näherungsweise elastisch reflektiert. In der Konkurrenz von Einströmen und beginnender Ausdehnung ergab sich eine hochverdichtete Zone, die wohl für die kurze Zeit von einigen zehntel Sekunden im Abstand von einigen 100 km vom Zentrum zum Stillstand kam. Entscheidend ist, dass diese Materie durch Stöße mit Neutrinos aufgeheizt wurde und so die Energie gewann um über ihren Ausgangspunkt hinauszukommen und das Gravitationsfeld zu verlassen. Die Stoßfront dieser Explosion durchdrang die umgebende Materie. Der Ablauf wurde signifikant beeinflusst durch Akkretion auf Grund der Rotation und durch Turbulenz im Materietransport, dies bestimmte die räumliche Verteilung der abgesprengten Materie. Im Fall der Supernova von 1987 waren dies etwa 15 Sonnenmassen, die mit hoher Geschwindigkeit in das All expandierten. Neuere Aufnahmen zeigen dies sehr schön. In die äußere, von uns aus sichtbare Oberfläche des Sterns gelangte die Stoßfront und die damit verbundene Erwärmung erst nach Stunden oder Tagen. Entsprechend langsam steigerte sich die Helligkeit über Wochen hin.

Die weitere Entwicklung zeigt der Krebsnebel im Sternbild des Stiers. Dieser sogenannte Nebel zeigt die Überreste einer Supernova, die am 11. April 1054 heftig aufgeleuchtet hatte und Monate später sogar bei Tageslicht gesehen wurde. Es gibt dafür inzwischen 13 historisch gesicherte Quellen. Verglichen mit der Supernova von 1987 war die Masse dieses Vorläufersterns mit etwa 10 Sonnenmassen gerade ausreichend, einen Kollaps mit Neutrinoemission zu induzieren. Die etwa tausend mal größere Helligkeit damals folgt aus der geringen Entfernung von nur 6.300 Lichtjahren. Heute sieht man Fronten von Staub, die vom ultravioletten Licht des Zentralbereichs gut beleuchtet sind. Die starken Abweichungen von einer sphärischen Form sind Folge der diskutierten Turbulenz zu Beginn. Die Fronten expandieren mit einer Geschwindigkeit von einem halben Prozent der Lichtgeschwindigkeit, so dass der Krebsnebel heute in einer Ausdehnung von 11 Lichtjahren erscheint. Die Expansion wird direkt sichtbar, wenn man alte Photographien zum Vergleich heranzieht.

Man kann den Krebsnebel vergleichen mit dem Relikt einer Supernova mit einem deutlich schwererem Vorläuferstern von etwa 15 Sonnenmassen: Im Sternbild der Cassiopeia sieht man eine 325 Jahre alte Front, asymmetrisch und zerfasert, von etwa dem selben Durchmesser, im Abstand von 11.000 Lichtjahren. Wegen dichter Gas und

Staubwolken war 1680 die Erscheinung unauffällig. Auf Grund der höheren Masse des Vorläufersterns ist bei diesem Nebel die Expansionsgeschwindigkeit etwa drei mal größer, auch ist in der expandierenden Front der Anteil schwerer Elemente deutlich größer. Im Zentrum der Nebel befinden sich die jeweils verbliebenen Neutronensterne, beim Krebsnebel leuchtet dieser als Pulsar 30 mal in der Sekunde auf, in allen Bereichen der elektromagnetischer Strahlung, von Radiowellen bis zu harter Röntgenstrahlung.

D. Kosmologische Bedeutung der Supernovae

Der Ablauf und die Auswirkungen von Supernova-Prozessen hängen entscheidend ab von der Masse des Vorläufer-Sterns. Im abgesprengten Bereich bewirkte die beschriebene Aufheizung dass die vorhandenen schweren Atomkerne sich in Neutronen, Protonen und Heliumkerne auflösten. In der folgenden Phase der Expansion, mit abnehmender Dichte und Temperatur, liefen nun alle die Kernreaktionen ab, in denen die chemischen Elemente entstanden, die von der Supernova schließlich als Nebel abgestoßen wurden. Über ihre Spektrallinien kennen wir die Häufigkeiten der verschiedenen chemischen Elemente. Sie hängen davon ab, wie sich in den jeweiligen Bereichen Temperatur und Dichte zeitlichen entwickelt hatten. Wegen der Turbulenz des Vorgangs können sich benachbarte Bereiche wesentlich unterscheiden. Deswegen zeigen verschiedene Bereiche der sichtbaren Supernova-Fronten signifikant unterschiedliche Elementverteilungen. Bei massereichen Sternen ist die Erzeugung schwerer Elemente besonders effektiv. Die expandierenden Fronten bewirken im umgebenden interstellaren Gas Kompressionseffekte und unterstützen so die Bildung neuer Protosterne. So entstand die Materie aus der unsere Welt besteht. Zugespielt formuliert: Jeder von uns besteht aus Überresten von Supernovaprozessen.

E. Zoo der Supernovae

Auf signifikant andere Art können Sterne von weniger als etwa 8 Sonnenmassen als Supernovae zünden: Sterne dieser geringeren Masse beenden den nuklearen Brennprozess mit der Bildung von Kohlenstoff und Sauerstoff, die Materie der äußeren Schalen stoßen sie durch Strahlung ab, es verbleiben kompakte Weiße Zwerge. Diese können den so genannten Typ Ia Supernova-Prozesse auslösen, falls sie von einem benachbarten Stern Materie aufgenommen und so die Chandrasekhar-Masse erreichen. Mit dem einsetzenden gravitativen Kollaps steigt die Temperatur, sodass die abgebrochene Kette von Fusionsreaktionen wieder zündet: Aus Kohlenstoff und Sauerstoff entsteht Silizium, und aus diesem Nickel. Die dabei freigesetzten Energien verhindern den weiteren Kollaps. Vielmehr übertreffen sie die bisher insgesamt freigesetzte Gravitationsenergie, sodass die gesamte

Materie in einer Explosion verstreut wird. Die von Tycho Brahe 1572 beobachtete Supernova gehört zum Typ Ia. Im Röntgenlicht erscheint sie heute als riesiger Ball. Die Typ Ia-Supernovae unterscheiden sich also ganz wesentlich vom Typ der Supernova, die wir 1987 kennengelernt haben: Es fehlen die Neutrinos, und in dem verstreuten Material fehlt der Wasserstoff, es besteht überwiegend aus Nickel. Die hohe Temperatur ist Restwärme, insbesondere aus dem radioaktiven Zerfall der Nickel-Atomkerne zu Eisen.

Die Fachleute glauben die Typ Ia-Supernovae so gut zu verstehen, dass sie jeder beobachteten Supernova vom Typ Ia aus dem Spektrum und dem zeitlichen Verlauf der Lichtabstrahlung eine bekannte Leuchtkraft zuordnen. Sie sprechen von Standardkerzen. Man erkennt die Typ Ia-Supernovae im optischen Spektrum an den Linien von Silizium, und dem Fehlen von Wasserstoff und Helium. Sie leuchten besonders hell, da Absorption durch äußere Schichten keine Rolle spielt.

Ein großes Ziel von Kernphysik und Astronomie ist es, die heute beobachtete Elementhäufigkeit im Detail zu berechnen. Dies basiert auf der Modellierung von Supernovae und auf der Kenntnis von Kernreaktionsraten, die aus Labordaten folgen. In den Grundzügen ist dies verstanden. Der Pionier dieser Physik war William Fowler (Nobelpreis 1983).

F. Pulsare

Die verbleibenden Neutronensterne sind sehr kompakte Objekte. Beim Kollaps im Supernovaprozess bleibt der Drehimpuls erhalten, sodass ein Teil davon auf den Neutronenstern übergeht. Wegen des geringen Durchmessers haben sie extrem hohe Umlaufgeschwindigkeiten. Ein Tag auf einem derart kompakten Stern kann nur wenige Millisekunden dauern. Verbunden mit dem Kollaps ist auch eine Konzentration des Magnetfelds, sodass man zunächst auch extrem starke Magnetfeldern erwartet. Ist nun, wie bei der Erde, die Achse des Felds gegen die Drehachse geneigt, so bewirkt das umlaufende Feld im umgebenden Medium elektromagnetische Induktionseffekte und in deren Folge Abstrahlung elektromagnetischer Wellen. Diese umfasst alle Frequenzbereiche, auch den der Radiowellen. Sie sollten einem fernen Beobachter als eine im Takt des Umlaufs pulsierende Quelle erscheinen, wie der Strahl eines Leuchtturms. Der erste Pulsar wurde bei einer Suche nach Radioquellen 1967 von Jocelyn Bell entdeckt. Der Nobelpreis dafür ging 1974 jedoch nur an ihren Doktorvater, Antony Hewish. Inzwischen kennt man über 1000 Pulsare, darunter auch ein Doppelsternsystem von 2 Pulsaren. Aus den im Verlauf von 30 Jahren beobachteten kleinen Änderungen der Pulsfrequenzen erhält man Information über die Abstrahlung. Nach 10 Millionen Jahre sollten die Magnetfelder verbraucht sein. Im Fall des Doppelsterns zeigten Russell

Hulse und Joseph Taylor (Nobelpreis 1993), dass die beobachtete Abnahme der Umlauffrequenz der Erwartung auf Grund der Abstrahlung von Gravitationswellen entspricht. Dies war bis in jüngste Zeit die einzige experimentelle Evidenz für die Existenz von Gravitationswellen.

IV. SCHWARZE LÖCHER

Bei den bisher beschriebenen Supernovaprozessen bleiben Neutronensterne zurück, deren Masse die der Sonne etwas übertreffen. Was hätte man zu erwarten, wenn die Masse eines derart kompakten Systems noch größer wäre? Natürlich werden auf Grund des kleinen Durchmessers die Gravitationskräfte riesig. Was aber ist unser Maßstab dafür?

Zur Veranschaulichung möchte ich von der Erfahrung mit der Raumfahrt ausgehen. Um eine Sonde als Satelliten in einem erdnahen Orbit kreisen zu lassen, muss man sie zuvor auf eine Geschwindigkeit von 7,9 km/sec, das sind 28.000 km/h, gebracht haben. Soll sie stattdessen den Bereich der Erdanziehung verlassen, so muss sie von der Erdoberfläche mit 11.1 km/sec starten. Man bezeichnet diesen Wert als Entweichgeschwindigkeit. Die entsprechende kinetische Energie ist gerade doppelt so groß wie die für einen erdnahen Orbit. Wenn es nun darum geht, den Bereich der Anziehung der Sonne zu verlassen, und dies von der Erde aus, so muss die Energie der Sonde um einen weiteren Faktor 15 größer sein. Dies gilt allerdings nur, wenn die Bewegung und die Anziehung der anderen Planeten nicht berücksichtigt werden. Die 1977 gestartete Raumsonde Voyager, die etwa 2017 den interstellaren Raum erreichen wird, nutzte hingegen ein geschicktes Timing: Die Sonde näherte sich den jeweils entgegenkommenden Planeten Jupiter und dann Saturn gerade so, dass sie diese in einer hyperbolischen Bahn teilweise umflog. Das hatte zur Folge, dass die Sonde <wie ein Tennisball von einem schnell entgegenkommendem Tennisschläger> beschleunigt wurde.

Sollte die Sonde von der Oberfläche der Sonne aus das Sonnensystem verlassen, so ergäbe sich ein weiterer Faktor 200, da vom Mittelpunkt der Sonne aus gesehen die Oberfläche der Sonne 200 mal näher ist als die Erde. Würde man nun die Sonne auf die Größe eines Neutronensterns schrumpfen lassen, wäre der Wert nochmal um einen Faktor 50.000 größer. Genug damit! Bereits die Energie von erdnahen Satelliten ist riesig. Sie verglühen beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre. Bei den Shuttles ist es die Kunst, die Bewegungsenergie so sorgfältig verzögert in Wärme umzusetzen, dass diese ohne Überhitzung des Fahrzeugs von der Atmosphäre aufgenommen werden kann.

Wie kann man die Stärke der Gravitationsenergie noch diskutieren? Man kann überlegen, ob es eine Situation

gibt, in der ein Körper grundsätzlich nicht mehr das Gravitationsfeld verlassen kann, wie groß auch immer seine Energie ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nach Einstein Energie und Masse eines Körpers in Beziehung stehen, sodass auch Energie gravitativ wirksam ist. Wendet man dies auf Lichtquanten an, so kann man fragen, wann Lichtquanten das Gravitationsfeld nicht mehr verlassen können. In einfachster Überlegung denkt man sich die Masse kugelsymmetrisch innerhalb eines Radius verteilt, für den diese Situation vorliegen soll, und bestimmt den entsprechenden Zusammenhang von Masse und Radius. In einer Überschlagsrechnung mit Newtons Gravitationsgesetz kann man eine Radius-Masse Beziehung abschätzen, bei der die Ruhe-Energie eines Objekts gleich seiner Gravitationsenergie wird. Verdoppelt man die Masse des Sterns, so verdoppelt sich auch dieser Radius. Starke Gravitation muss natürlich im Rahmen von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie behandelt werden. Für das hier diskutierte Problem gelang dies Karl Schwarzschild bereits 1916. Der von ihm berechnete Abstand, der so genannte Schwarzschildradius, unterscheidet sich von dem naiv abgeschätzten nur um einen Faktor 2. Die Allgemeine Relativitätstheorie vermittelt darüber hinaus die grundsätzliche Einsicht, dass ein Ereignis innerhalb des Schwarzschildradius in keiner Weise von außen wahrgenommen werden kann. Emittiertes Licht fällt wieder zurück, deswegen auch die Bezeichnung Schwarzes Loch.

A. Wie entstehen Schwarze Löcher?

Die frühe Sternentstehung fand statt in Bereichen besonders hoher Gasdichte. Entsprechend wirkungsvoll war der Akkretionsprozess, sodass sich schnell massereiche Sterne bildeten. Allerdings war die Bildung sehr großer Sterne durch deren eigene Strahlung behindert. Deswegen geht man davon aus, dass besonders große Sterne aus der Verschmelzung von Sternen hervorgingen. Alle diese Sterne brannten rasch, sprengten in Supernova-Prozessen ihre Schale mit den gebildeten schweren Atomkernen ab, im Zentrum verblieben Neutronensterne. Bei großen Sternen konnte auf diese aus der Schale so viel Materie zurückstürzen, dass statt eines Neutronensterns sofort ein Schwarzes Loch entstand.

Kommen zwei Neutronensterne oder ein Neutronenstern und ein Schwarzes Loch zusammen, und kollabiert dies schnell rotierende System unter Bildung eines Schwarzen Lochs, so kommt es, im Bereich von Sekunden oder Minuten, zur Abstrahlung kollimierter Gammastrahlung. Befindet sich die Erde in der Richtung dieser Abstrahlung, so erscheint dies als Gamma Ray Burst. Ereignisse dieser Art gelten als stärkste Strahlungsquellen, sie werden vor allem in großer Entfernung und damit in noch jungen Bereichen beobachtet.

Größere Schwarze Löcher entstanden durch nachfolgende Akkretion. Die auf Grund des Akkretionsprozesses freigesetzte Gravitationsenergie, eine Art von Reibungsenergie, führte zu sehr hohen Temperaturen und einer entsprechend intensiven Abstrahlung von Licht. Dementsprechend sind akkretierende Schwarze Löcher optisch aktiv. Ist alles Gas aus der Umgebung verbraucht, erscheint das Schwarze Loch als optisch inaktiv.

Sterne in der Nähe eines Schwarzen Lochs umkreisen dieses wie die Planeten die Sonne. Die Drehbewegung hindert den umlaufenden Stern, in das Zentrum zu fallen. Ein Stern wird nur dann zum >Futter< für ein Schwarzes Loch, falls er sich im Rahmen seiner Entwicklung aufbläht, sodass der Oberflächenbereich schwächer gebunden ist, und auf Grund von Gezeitenkräften zerreißt. Diese wirken besonders stark bei kleinem Abstand zum Zentrum. Anschließend wird sich eine Akkretionsscheibe bilden, und das Schwarze Loch wird für einige Zeit wieder als optisch aktiv sichtbar.

B. Quasare

Wohl alle Galaxien haben im Zentrum ein sehr großes Schwarzes Loch. Besonders spektakulär sind Quasare, extrem entfernte und damit noch sehr junge Galaxien. Quasare haben im Zentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch mit einer Masse von bis zu über 10 Milliarden Sonnen. Quasare strahlen in allen Bereichen der Wellenlänge: das supermassereiche Schwarze Loch verschlingt aus der Scheibe der umgebenden Galaxie Materie bis zu etwa 10 Sonnenmassen pro Jahr. Der Materiefluss ist limitiert durch den Druck der Strahlung. Dementsprechend hell strahlt die Akkretionsscheibe. Quasare gehören zu den fernsten beobachtbaren Objekten. Infolge der Eigenrotation des Schwarzen Lochs und dem damit verbundenen extrem starken Magnetfeld entsteht im Außenbereich eine besonders spektakuläre Situation: Mit dem Verschlingen von jährlich 10 Sonnenmassen aus der galaktischen Scheibe ist ein großräumiger Bewegungskreislauf verknüpft. Dabei entgeht der kleinere Teil der angezogenen Materie dem Fall in das Schwarze Loch, er wird vielmehr an diesem vorbeigeführt und als Plasma längs der Achse abgestoßen. In einem Abstand entsteht ein scharf gebündelter Strahl, eine Folge extrem schneller Rotation der Akkretionsscheibe. Diese wiederum resultiert aus der Größe der Masse des zentralen Schwarzen Lochs. Die intensiv leuchtenden Jets haben eine Länge von -zig Tausend Lichtjahren und mehr. Ein aktives, extrem schweres Schwarzes Loch von mehreren Milliarden Sonnenmassen befindet sich im Zentrum des Virgo Galaxienhaufens, nur etwa 50 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Die Bezeichnung Quasare ist heute etwas aus der Mode, man spricht lieber, den Vorgang beschreibend, von aktiven galaktischen Kernen.

C. Kosmische Strahlung

In den Jets der Quasare, und auch in den Stoßwellen der sich ausbreitenden Supernovaexplosionen, gibt es sehr starke elektromagnetische Felder. Elektrische Erscheinungen ergeben sich bei Transportprozessen, sofern Medien verschiedener Temperatur oder stofflicher Zusammensetzung aneinander streifen und dabei Elektronen übertragen. Durch Induktion können die Erscheinungen verstärkt werden. Auf diese Art verstehen wir auf der Erde die Entstehung ihres Magnetfelds und die Bildung von Gewittern.

In den Feldern der Jets oder der Supernovaexplosionen finden Beschleunigungen aller Art statt. Dabei können bei einigen Ionen diese Beschleunigungsprozesse sich eher zufällig gerade so aufaddieren, dass diese extrem hohe Energien erreichen. Man betrachtet diese Arten von Beschleunigung als Quellen der hochenergetischen Höhenstrahlung, die bereits 1912 von Victor Hess (Nobelpreis 1936) entdeckt wurde. In der Höhenstrahlung beobachtet man Protonen und Heliumkerne mit kinetischen Energien, welche die an den größten Beschleunigern um ein Vielfaches übertreffen. Allerdings sind solche hochenergetischen Ereignisse sehr selten. Der aktive galaktische Kern von Centaurus A mit einer Masse von einigen Hundert Millionen Sonnen wurde kürzlich als Quelle besonders energiereicher Höhenstrahlung identifiziert. Will man aus der beobachteten Richtung der einfallenden Höhenstrahlung auf die Position der kosmischen Quelle schließen, so darf die Bahnablenkung durch Magnetfelder keine Rolle spielen. Deswegen ist die Messung der höchstenergetischen Teilchen der Höhenstrahlung besonders interessant. Vorteilhaft dabei ist, dass diese uns nur aus relativ nahen Quellen erreichen kann. Denn auf Grund ihrer extrem hohen Energie wird für sie die Streuung an kosmischer Hintergrundstrahlung relevant. Dabei wird der Energieverlust so groß, dass nur Strahlung einer Quelle wie etwa Centaurus A die vergleichsweise kurze Strecke von 14 Millionen Lichtjahren ohne signifikanten Energieverlust passiert.

D. Gravitationswellen

Falls die supermassereichen Schwarzen Löcher in den Zentren von Galaxien mit ihren extrem starken Gravitationsfeldern sich beschleunigt bewegen, werden sie zu Quellen energiereicher Gravitationswellen. Diese Situation hat man, wenn nach der Vereinigung zweier Galaxien deren Kerne eine den Doppelsternsystemen analoge Struktur bilden. Bei ihrer Bewegung um den gemeinsamen Schwerpunkt strahlen die Schwarzen Löcher Gravitationswellen ab. Auf Grund des damit verbundenen Energieverlusts kommen sie sich dabei immer näher, bis sie schließlich verschmelzen. Zwei Beispiele dafür wurden kürzlich identifiziert:

In einer 3,5 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie im Sternbild Krebs umkreist mit einer Periode von nur zwölf Jahren ein Schwarzes Loch von 100 Millionen Sonnenmassen das zentrale Schwarze Loch von 18 Milliarden Sonnenmassen. Dies ist das massereichste, das wir derzeit kennen. Bei jedem Umlauf passiert es zwei mal die Akkretionsscheibe des Zentrums. Die entsprechende Änderung der Helligkeit macht den Vorgang sichtbar. Aus der Beobachtung während mehrerer Umläufe sieht man, dass Gravitationswellen abgestrahlt worden sind. Die Berechnungen im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie ergeben die genannten Massen und die Prognose, dass die beiden Schwarzen Löcher in etwa zehntausend Jahren vereinigt sein werden.

Bei Vorgängen dieser Art können einige Prozent der Ruhenergie abgestrahlt werden, wobei die Abstrahlung unmittelbar vor der Vereinigung besonders intensiv ist, es geht hier um eine Zeitskala von weniger als einem Umlauf. Entsprechend hat man dann nicht mehr die durch den Umlauf gegebene Symmetrie der Abstrahlung, es kann vielmehr eine Richtung bevorzugt werden. Berechnungen zeigen, dass diese einseitig gerichtete Gravitationsstrahlung einige Promille der insgesamt abgestrahlten Gravitationsenergie enthalten kann. Der Rückstoß auf den vereinigten galaktischen Kern ist dann so groß, dass dieser aus dem System der Galaxis herausgeschossen werden kann. Entsprechend sollte es kernlose Galaxien und sich davon rasch wegbewegende supermassereiche Schwarze Löcher geben. Eine entsprechende Beobachtung wurde im Mai 2008 (Pressemitteilung des Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik) berichtet: Zehn Milliarden Lichtjahre von uns entfernt bewegt sich ein Schwarzes Loch von einigen 100 Millionen Sonnenmassen mit einer Geschwindigkeit von etwa einem Prozent der Lichtgeschwindigkeit weg von seiner Muttergalaxie. Das Schwarze Loch ist sichtbar, da es etwas Materie aus dem zentralen Bereich der Galaxie mitgenommen hat.

E. Das Zentrum der Milchstraße, ein Schwarzes Loch

Das Zentrum der Milchstraße liegt im Sternbild des Schützen und ist hinter dunklen Gaswolken verborgen. Im Unterschied zum sichtbaren Licht ist es jedoch im Radiowellen-, Infrarot- und Röntgenstrahlungsbereich zu beobachten. Im Bereich des Zentrums kennt man seit 1932 eine starke Radioquelle, bezeichnet als Sagittarius A*. Diese strahlt aus einem sehr kleinen Gebiet. In den letzten Jahren wurden vom Zentrum wiederholt sehr gute Aufnahmen im Radiowellen-, Infrarot- und auch Röntgenstrahlungsbereich gemacht. In einer Doktorarbeit 2004 in München (ich war Mitglied der Prüfungskommission) wurde erstmals experimentell gezeigt, dass in einem sehr kleinen Bereich des Zentrums Masse von 3,7 Millionen Sonnen konzentriert ist. Sieht

man ab von völlig exotischen Formen der Materie, für die es keinerlei experimentelle Evidenz gibt, so erzwingt diese Beobachtung die Existenz eines Schwarzen Lochs mit eben dieser Masse von 3,7 Millionen Sonnen.

Entscheidend war die Beobachtung des nächstliegenden Sterns S2, der das supermassereiche zentrale Schwarze Loch im Abstand von nur etwa 17 Lichtstunden in nur 15,2 Jahren umläuft. Im Abstand von weniger als einem halben Lichtjahr umkreisen weitere beobachtete Sterne dieses Zentrum, und alles folgt den Gesetzen, die Kepler für die Planetenbahnen um die Sonne fand. Mit Newtons Gesetz der Gravitation ergab sich daraus die Masse des Zentrums zu den genannten 3,7 Millionen Sonnenmassen, und somit ein Schwarzschildradius zu 8 Millionen km. Das supermassereiche zentrale Schwarze Loch der Milchstraße ist optisch nicht aktiv, da derzeit ihm kein Stern nah genug kommt um einen Akkretionsprozess auszulösen.

Neueste Messungen mit Röntgenteleskopen weisen darauf hin, dass es im Bereich innerhalb von 100 Lichtjahren zum Zentrum hin tausende von Schwarzen Löchern mit wesentlich geringeren Massen, sogenannte Stellare Schwarze Löcher, geben sollte. Die Masse Stellarer Schwarzer Löcher erhält man aus der Beobachtung von Doppelsternen. So etwa wurde im Dreiecksnebel aus der Bahn des Partners, einem Blauen Riesenstern von 70 Sonnenmassen, ein relativ schweres Stellares Schwarze Loch von 16 Sonnenmassen identifiziert.

Zusammenfassend kann man sagen, dass etwa ein Zehntel der Materie in Sternen gebunden ist, während neun Zehntel als Gas von Wasserstoff und Helium den Raum erfüllen. Der Anteil der in Schwarzen Löchern gebundenen Materie soll bei mehreren Prozenten der insgesamt in Sternen gebundenen Materie liegen. Überwiegend sind dies Stellare Schwarze Löcher von typisch 10 Sonnenmassen. In den supermassereichen galaktischen Kernen befindet sich nur etwa 3 Prozent der insgesamt in Schwarzen Löchern gebundenen Materie.

V. VERTEILUNG DER GALAXIEN, DUNKLE MATERIE

Fast alle Sterne finden sich in Galaxien. In ihrem Zentrum haben diese wohl alle ein supermassereiches Schwarzes Loch von Millionen oder auch Milliarden Sonnenmassen, und darum umlaufend einige Millionen bis zu mehreren Hunderten von Milliarden Sterne. Im gesamten sichtbaren Universum gibt es etwa 100 Milliarden Galaxien. Man geht davon aus, dass ihre Anzahldichte konstant ist, sofern man Mittelwerte über sehr große Bereiche des Kosmos nimmt. Betrachtet man jedoch weniger große Bereiche, so ist die Verteilung der Galaxien im Raum alles andere als homogen. Eine aktuelle Durchmusterung von 30.000 Galaxien zeigt eine schwammartige Verteilung der

Galaxien: Leere Bereiche unterschiedlicher Größe, so genannte Leerräume (voids), sind durch Wände getrennt. Diese treffen zusammen und bilden Knotenlinien (Filamente) und Knotenpunkte. In dieser räumlichen Struktur beobachtet man Galaxiengruppen, -haufen (cluster) und -superhaufen. Man geht davon aus, dass der gesamte Kosmos in dieser Art strukturiert ist. Alle diese Strukturen bewegen sich relativ zueinander auf Grund ihrer gravitativen Anziehung.

A. Galaxiengruppen und Galaxienhaufen

Bei kleineren Ansammlungen von weniger als 50 Galaxien in einem Volumen mit einem Durchmesser von bis zu 10 Millionen Lichtjahren spricht man von Gruppen. Ihre Masse liegt bei 10 Billionen Sonnenmassen. Die Geschwindigkeiten ihrer Mitglieder variieren um etwa 150 km/s. Unser Milchstraßensystem ist Teil der oben beschriebenen Lokalen Gruppe. Zu ihr gehören der Andromeda-Nebel und die Magellanschen Wolken.

Unsere Lokale Gruppe ist Teil des Virgo-Superhaufens mit dem bereits angesprochenem Virgo-Galaxienhaufen im Zentrum. Dieser Galaxienhaufen besteht aus mindestens 1300, vermutlich aber über 2000 Galaxien in einem Bereich von 9 Millionen Lichtjahren Durchmesser. Der Virgo-Galaxienhaufen ist 65 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Galaxienhaufen gelten als die größten Unterstrukturen, die noch gravitativ gebunden sind: die Galaxien bewegen sich im gemeinsamen Schwerfeld des Haufens. In diesem gibt es ein dünnes 10 bis 100 Millionen Grad heißes Gas, das durch seine Röntgenstrahlung beobachtet wird. Dieses intergalaktische Gas von Wasserstoff und Helium hat etwa fünfmal mehr Masse als die Gesamtheit der Sterne des zugehörigen Galaxienhaufens. Die beobachtete hohe Temperatur ist eine Folge der gravitativen Konzentration. Wegen der geringen Dichte steht die Abstrahlung der Kompressionsenergie eher noch am Anfang. Ganz anders ist es in Bereichen innerhalb von Galaxien. Wegen der dort wesentlich höheren Dichten war die Abstrahlung so effizient, dass sich dort die kalten Wolken aus Gas und Staub gebildet hatten, in denen die Sternbildung erfolgen konnte. Die Beobachtung dieser Röntgenquellen identifiziert die Existenz von Galaxienhaufen eindeutig. Ein Pionier der Röntgenbeobachtung war Riccardo Giacconi (Nobelpreis 2002). Ihm gelangen mit Detektoren in Raketen 1962 die ersten Beobachtungen.

In der Mitte von Galaxienhaufen befindet sich oft eine riesige elliptische Galaxie. Beim Virgo-Galaxienhaufen etwa hat diese die 300-fache Masse unserer Milchstraße, während Galaxien am Rand meist Spiralgalaxien sind. Im Gegensatz zu den flachen Spiralgalaxien haben die Sterne in den elliptischen Galaxien keine einheitliche Umlaufrichtung. Das passt zu der Vorstellung, dass diese in sehr früher Zeit aus der Vereinigung mehrerer Spiral-

galaxien entstanden sind. In der entsprechend virulenten Situation wurde damals Gas in in einem Feuerwerk der Sternentstehung umgesetzt. Man spricht deshalb von Starburst-Galaxien. Sie gelten als die fernsten beobachtbaren galaktischen Objekte. Das danach verbliebene Gas wurde durch den Druck der vom aktiven supermassereichen Schwarzen Loch im Zentrum ausgehenden Strahlung weggeblasen. Deshalb bestehen die uns naheliegenden elliptischen Galaxien, die Spätformen dieser Starbursts, nur aus alten Sternen. Sie sind frei von interstellarem Gas, und die Sternentstehung ist schon lange zu Ende. Obwohl elliptische Galaxien auf Grund der Anzahl ihrer Sterne hell leuchten, handelt es sich bei ihnen sozusagen um große Friedhöfe von abgebrannten Sternen, die vorwiegend rotes Licht emittieren. Die Ursache dieser ausgeprägten Eigenschaften ist die Existenz des Schwarzen Lochs im Zentrum.

B. Dunkle Materie

Die Kenntnis der Astronomen von der Verteilung der Materie in Form von Sternen und Gas im Raum bringt die Frage auf, ob die beobachteten Geschwindigkeiten von Sternen oder Galaxien mit den beobachteten Verteilungen der Masse zusammenpassen. Die Newtonschen Gesetze geben ja einen eindeutigen Zusammenhang. Die Antwort heißt: bei kleinen Abständen geht das sehr gut, bei großen Abständen jedoch erscheinen die Bewegungen als zu schnell! Aus den Kugelsternhaufen am Rand von Galaxien wird auf deren Masse geschlossen. Bei unserer Galaxis folgt aus den Umlaufgeschwindigkeiten eine Masse von etwas über 1000 Milliarden Sonnenmassen. Es ist derzeit offen, ob dieser Wert aus der beobachteten Materie noch zu erklären ist.

Eindeutig wird die Situation, wenn man Bewegungen von Galaxien um Galaxienhaufen berechnet. Für den Coma-Galaxienhaufen, etwa 300 Millionen Lichtjahre entfernt, stellte schon 1933 Fritz Zwicky eine extreme Diskrepanz fest und postulierte, dass die fehlende Masse in Form Dunkler Materie vorliegen müsse. Damals wurde das natürlich nicht akzeptiert. Auf Grund seiner Daten vermisste Zwicky einen Faktor 400. Alle Beobachtungen heute passen zu der Aussage, dass in großskaligen Strukturen auf einen Teil gewöhnlicher Materie 5 bis 6 Teile Dunkler Materie kommen. Es ist Konvention, mit dem Begriff Materie alles zusammenzufassen, was der Gravitation unterliegt.

Dunkler Materie können wir, außer der Teilnahme an der Gravitation und vielleicht auch an der schwachen Wechselwirkung, keine der uns sonst bekannten Wechselwirkungen zuordnen. Die Frage, aus welcher Art von Teilchen Dunkle Materie besteht, bleibt bisher unbeantwortet. Sie motiviert natürlich die Suche nach einer Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik. Kandidaten sind Teilchen aus einem Modell der Supersymme-

trie. Es gibt aufwändige Apparaturen um hypothetisch angenommene Teilchen der Dunklen Materie in speziellen Detektoren nachzuweisen. Da Dunkle Materie nicht der Starken und der Elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegt, werden ihre Teilchen kaum an Streuprozessen beteiligt sein. Wenn im Laufe der kosmischen Entwicklung Bereiche von Dunkler Materie aus verschiedenen Richtungen einander durchdrungen haben, unterblieb wegen des Fehlens von Streuprozessen die Wandlung der kinetischen Energie in thermische Energie. Diese Wandlung aber war entscheidend, um kompakte Systeme zu bilden. Wir hatten dies am Beispiel der Entstehung der Sonne diskutiert. Die einzelnen räumlichen Bereiche der Dunklen Materie bewegen sich völlig ungebremst im Raum mit einer kinetischen Energie, die sich aus dem immerwährenden freien Fallen in dem jeweilig vorliegendem Gravitationsfeld ergibt. Dementsprechend spricht man von Kalter Dunkler Materie.

C. Gravitationslinsen, der Bullet-Cluster

Um gravitativ wirkende Massen, inklusive der Dunklen Materie, zu messen, ist der Gravitationslinsen-Effekt besonders interessant. Galaxienhaufen lenken auf Grund ihrer großen Masse Licht besonders effektiv ab. Wäre die Verteilung ihrer Masse ideal sphärisch, so würden wir Lichtquellen dahinter nicht als Punkte, sondern als konzentrische Ringe oder Ellipsen sehen. Tatsächlich sieht man eine Anzahl von kurzen Kreissegmenten, d.h., die Ringe oder Ellipsen erscheinen zerfleddert in eine Anzahl kurzer Kreissegmente. Ursache dafür sind Abweichungen von einer ideal sphärischen Verteilung. Gelingt es die beobachteten Segmente den verschiedenen Lichtquellen richtig zuzuordnen, so kann man für den Galaxienhaufen auf die Masse und näherungsweise auch auf deren Verteilung rückschließen.

Ein Ereignis einer spektakulären Situation am Südhimmel im Sternbild Carina wurde kürzlich publiziert: Ein Galaxienhaufen war fast frontal in einen zweiten, etwas größeren eingedrungen. Bei einer Geschwindigkeit von mehr als einem Prozent der Lichtgeschwindigkeit wirkte er wie ein Geschoss, daher der Name Bullet-Cluster. Wir sehen die Situation im Abstand von 4 Milliarden Lichtjahren. Der eigentliche Zusammenstoß geschah 150 Millionen Jahre früher. Es gelang, die Verteilungen der Galaxien, des Gases und der Dunklen Materie zu beobachten.

Dabei zeigen die Galaxien und die Dunkle Materie in etwa die gleichen Verteilungen. Sie erscheinen als zwei bereits getrennte, sphärische Bereiche, ganz so, als ob sie die wechselseitige Durchdringung weitgehend unbeschädigt überstanden hätten. Das entspricht den physikalischen Vorstellungen: Für fast alle der schnell und in einigem Abstand aneinander vorbeilaufenden Galaxien bewirkt die gravitative Wechselwirkung nur kleine

Ablenkungen. Für die Dunkle Materie ist, auf Grund der obigen Diskussion, Entsprechendes zu erwarten.

Anders stellt sich die Situation für das heiße Gas dar, aus dem die normale Materie in Galaxienhaufen überwiegend besteht. Der Stoß von Gasteilchen: das sind Atome, Moleküle oder Staub, beruht auf Kräften, die ihrer Natur nach elektromagnetisch und damit viel stärker sind als die gravitative Wechselwirkung. Die mit einer Geschwindigkeit von 1 Prozent der Lichtgeschwindigkeit eindringenden Gaswolken werden infolgedessen abgebremst, ihre kinetische Energie wird in thermische umgesetzt. Bei Temperaturen von nahezu 100 Millionen Grad leuchtet das Gas strahlend hell im Bereich des harten Röntgenlichts. In dem erhitzten Gas bewegt sich der Galaxienhaufen schneller als der Schall. Dementsprechend beobachtet man im Röntgenlicht das Bild einer Stoßwelle, den so genannten Machschen Kegel, wie man dies von Photographien des Schalldrucks von Überschallflugzeugen oder von Geschossen her kennt. Die Experten betrachten diese Daten, im Kontext mit anderen Beobachtungen, als schöne Visualisation der spezifischen Eigenschaften Dunkler Materie.

VI. DER EXPANDIERENDE KOSMOS

Beobachtet man die von Fraunhofer im Spektrum des Sonnenlichts entdeckten Spektrallinien an Sternen, so erhält man die bereits diskutierte Information über die chemische Zusammensetzung der äußeren Atmosphäre, aber auch über die Geschwindigkeit, mit der sich ein Stern bewegt. Bewegt sich der Stern von uns weg, so sind für alle beobachteten Spektrallinien die Wellenlängen um einen bestimmten Faktor vergrößert. Diesen Effekt bezeichnet man als Rotverschiebung. Im Rahmen der Elektrodynamik versteht man dies als Dopplereffekt einer Lichtquelle, die sich von uns fortbewegt. Der Begriff stammt aus der Akustik und beschreibt dort die 1842 von Christian Doppler gefundene Änderung der Tonhöhe auf Grund der Bewegung der Schallquelle. Je größer die Geschwindigkeit, desto größer der Effekt.

A. Hubbles Entdeckung

Eine entscheidende Entdeckung, die wir heute mit dem Namen von Edwin Hubble verbinden, gelang 1929. Hubble bestimmte damals, wenn auch noch sehr fehlerhaft, die Entfernungen von Sternen und Galaxien. Für die weiter entfernten Galaxien stellte er fest, dass deren Rotverschiebungen, die von Vesto Slipher und anderen gemessenen worden waren, mit der Entfernung zunehmen. Inzwischen hat sich dies als ein im Wortsinn universales Gesetz erwiesen. Heute kennt man Quasare in Galaxienhaufen, die ca. 13 Milliarden Lichtjahre entfernt sind. In ihrem Licht werden Spektrallinien identifiziert mit einer Rotverschiebung, die einer Dehnung

ihrer Wellenlängen um einen Faktor 7 entspricht.

Hubbles Entdeckung besagt, dass wir ein expandierendes Weltall sehen. Die Expansion des Kosmos wird gerne verglichen mit einem großen Panettone. Dieser Hefeteig mit Rosinen darin geht beim Backen kräftig auf, und zwar so, dass die Abstände zwischen je zwei Rosinen mit der Zeit zunehmen, egal welche Rosine man betrachtet. Die Rosinen entsprechen den Galaxien oder Galaxienhaufen und der Hefeteig dem Raum. Dieses Bild vom expandierenden Hefeteig soll auch ausdrücken, dass man an jeder Stelle des Kosmos die gleiche Situation hat. Man sagt, der expandierende Kosmos sei homogen und isotrop.

Die Expansionsgeschwindigkeit ist proportional zum Abstand. Den Proportionalitätsfaktor, die Expansionskonstante, bezeichnet man nach Hubble als Hubble-Konstante. Wir sehen zunächst davon ab, dass diese Konstante auf Grund von physikalischen Prozessen im Laufe der Zeit den Wert ändern kann. Nähme man sie als zeitlich konstant an, so folgt aus Hubbles Gesetz, dass sich das ganze Weltall vor 14 Milliarden Jahren in einem sehr kleinen Volumen befunden haben sollte. Dies gibt zumindest eine Orientierung. Die Expansion selbst kann man nicht erklären, man hat sie als vorgegeben zu akzeptieren, indem man etwa von einem kosmischer Ursprung spricht. Physikalisch kann man nur das Verhalten in der Zeit diskutieren. Tatsächlich sollte die kinetische Energie der Expansion beeinflusst sein durch die Gravitation, die wechselseitigen Anziehung der Galaxien und aller sonstigen Materie. Dementsprechend erwartet man eine mit der Zeit verzögerte Expansion, beschrieben durch eine mit der Zeit abnehmende Hubble-Konstante. Der Effekt müsste bei sehr weit entfernten Objekten zu beobachten sein. Denkt man in die Zukunft, so folgt daraus auch die Frage, ob die Expansion irgendwann einmal zum Stillstand kommen wird.

Anders sieht es jedoch aus, wenn man den von Albert Einstein eingeführten Begriff einer Kosmologischen Konstante berücksichtigt und mit diesem im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie aktuelle Daten vergleicht.

B. Allgemeine Relativitätstheorie

Diese 1916 publizierte Theorie entstand aus Einsteins Einsicht, dass Newtons Gesetz der Gravitation und Einsteins 1905 veröffentlichte Spezielle Relativitätstheorie nicht zusammenpassen. Das Paradigma der Einsteinschen Relativitätstheorie ist die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, und verbunden damit ist die Aussage, dass Information sich nicht schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten kann. Deshalb suchte Einstein in Analogie zum elektrischen Feld eine Beschreibung, in der auch das Gravitationsfeld

sich in Abhängigkeit von der Zeit entwickeln kann. Als Ausgangspunkt seiner Überlegungen wird gerne genannt, dass Einstein die Situation in einem frei fallenden Fahrstuhl betrachtet habe. In diesem kann man nicht mehr beurteilen wie stark die Erdanziehung ist, die den Fall bewirkt. In seiner Theorie, an der er mit anderen volle 10 Jahre gearbeitet hatte, wird die Gravitation auf ein geometrisches Phänomen in einer gekrümmten 4-dimensionalen Raumzeit zurückgeführt. Diese mathematisch anspruchsvolle Theorie hat bis heute jeden Test bestanden. Der erste Erfolg war die Berechnung der sog. Periheldrehung des Planeten Merkur. Die korrekte Beschreibung von Schwarzen Löchern und die Abstrahlung von Gravitationswellen hatten wir bereits diskutiert. Besonders wichtig wird die Allgemeine Relativitätstheorie zur Beschreibung des Kosmos.

Im Rahmen dieser Theorie gelang Alexander Friedmann 1922 die mathematische Beschreibung des Verhaltens eines isotropen, homogen mit Materie erfüllten Universums unter dem Einfluss der Gravitation. Das Friedmann-Modell besagt, dass unbewegte Objekte im Raum weiterhin unbewegt bleiben, der Raum als Ganzes sich jedoch ausdehnt, und weiterhin, dass es einen Zeitpunkt gab, zu dem der Raum unendlich klein war. Dies definiert einen Anfang. Diese absolut extreme Vorstellung von einem Anfang wird etwas pauschal als Urknall oder Big Bang bezeichnet. Das Friedmann-Modell impliziert, dass man physikalisch sinnvoll nur über Zeiten nach dem Anfang sprechen kann. Die Gravitation nimmt von den Eigenschaften der Materie nur ihre Masse zur Kenntnis. Da in der Speziellen Relativitätstheorie Masse und Energie äquivalent sind, wird Materie durch ihre Energiedichte beschrieben. Dies schließt ein die Ruhe-Energie der materiellen Teilchen, deren thermische Energie, und die Energie von Strahlungsfeldern. Um die Expansion des Kosmos zu beschreiben, muss man für die zum jeweiligen Zeitpunkt vorliegende Energiedichte wissen, wie diese sich mit der Expansion ändert. Betrachtet man einen expandierenden Bereich, so bleibt in diesem die Anzahl der Atomkerne und Elektronen konstant, und somit auch die eingeschlossene Ruhenergie. Anders ist es mit der kinetischen oder thermischen Energie. Diese wird abnehmen. Die Begriffsbildung der Thermodynamik bezeichnet das Verhältnis von Energieabnahme und Volumenvergrößerung als Druck. In den Friedmann-Gleichungen wird der Kosmos beschrieben durch die Energiedichte und den damit verbundenen Druck.

Als Grenzfälle kann man Kalte Materie, hochrelativistische Materie und eine Kosmologische Konstante unterscheiden: Man spricht von Kalter Materie, wenn die thermische Energie gering ist im Vergleich zur Ruhenergie. Dann bleibt bei der Kosmischen Expansion die im expandierenden Volumen eingeschlossene Energie konstant, der Druck ist sehr klein. Hochrelativistische Materie verhält sich wie das elektromagnetische Strah-

lungsfeld. Bei diesem nimmt die im expandierenden Volumen eingeschlossene Energie ab, dementsprechend ist der Druck positiv und gleich einem Drittel der Energiedichte. Die Kosmologische Konstante entspricht einer Energiedichte die während der Expansion konstant bleibt. Diese Größe verknüpft man in neuester Zeit mit dem Begriff einer Dunklen Energie. Diese nimmt im expandierenden Volumen zu, sie ist proportional zum Volumen. Diesem ungewöhnlichen Verhalten entspricht formal ein Druck mit negativem Vorzeichen, wobei der Betrag des Drucks gleich ist dem der Energiedichte. Bei der Dunklen Energie handelt es sich um einen formalen Ansatz zur Beschreibung eines bestimmten Verhaltens der Expansion. Dabei bleibt offen woraus die Dunkle Energie physikalisch besteht. Die durch die Kosmologische Konstante bzw. Dunkle Energie implizierte Zunahme des Energieinhalts des Kosmos ist nicht etwa eine wunderbare Erzeugung von Energie aus dem Nichts, sondern die Expansion eines Felds, dessen zunehmender Energieinhalt zu Lasten der Gravitation entstanden ist. Die Allgemeine Relativitätstheorie erlaubt diese Art von Nullsummenspiel.

Der Begriff einer Krümmung des Raums spielt in der Allgemeinen Relativitätstheorie eine wichtige Rolle. Ein Beispiel ist die Ablenkung von Lichtstrahlen in starken Gravitationsfeldern (Gravitationslinsen-Effekt), die auf eine lokale Krümmung des Raums zurückgeführt wird. Im Fall der kosmischen Expansion verschwindet die Krümmung nur dann, wenn die kinetische Energie der Kosmischen Expansion und die potentiellen Energie der Gravitation in einem vorgegebenem Verhältnis stehen. Seit kurzem ist man davon überzeugt dass genau diese sehr spezielle Situation vorliegt. Dann besagen die Friedmann-Gleichungen, dass der jeweils aktuelle Wert der Energiedichte - inklusive einer dunklen Energie - proportional ist zum Quadrat der Hubble-Konstanten. Dementsprechend kann die Hubble-Konstante von der Zeit abhängig sein, und ihre tradierte Bezeichnung als Konstante ist eher verwirrend. Kennt man die Abhängigkeit der Energie von der Expansion des Raums, so folgt aus der Friedmann-Gleichung der zeitliche Verlauf der Expansion. Sie ist verzögert für Kalte und für relativistische Materie, die Gravitation bremst die Expansion und die Hubble-Konstante wird mit der Zeit kleiner. Für Dunkle Energie jedoch ist die Expansion beschleunigt. Ausdehnung, Expansionsgeschwindigkeit und Beschleunigung nehmen exponentiell zu. Dies liegt an ihrer spezifischen Eigenschaft, die mit dem Kennwort negativer Druck verknüpft ist.

Da mit der Expansion des Kosmos die Dichte der Materie abnimmt, wird irgendwann nur noch die Kosmologische Konstante, d.h. die Dunkle Energie, übrig bleiben, sofern es diese Größe in der Natur gibt. Dementsprechend sollte einer Phase verzögerter Expansion der Übergang in eine Phase beschleunigter Expansion folgen, dazwischen hätte man einen Bereich weitgehend konstanter Expansion zu

erwarten.

Dies lässt sich experimentell nur verifizieren durch Messungen von Entfernungen und von zugehörigen Rotverschiebungen in einem sehr weiten Bereich. Große Entfernungen erhält man aus den gemessenen Helligkeiten nur dann, wenn die Leuchtkraft der jeweiligen Quelle bekannt ist. Hier spielen Supernovae, insbesondere die beschriebenen vom Typ-Ia, eine entscheidende Rolle. In einer kürzlich publizierten Arbeit wurden 21 solcher Typ-Ia Supernovae in Entfernungen von bis zu 9 Milliarden Lichtjahren vermessen. Aus diesen und anderen Daten folgt, dass wir uns gegenwärtig bereits in der Phase der beschleunigten Expansion befinden, dass wir aber vor mehr als 7 Milliarden Jahren noch eine verzögerte Expansion hatten.

Wir werden noch weitere Beobachtungen zur kosmischen Expansion kennenlernen. Alles passt zusammen, wenn man davon ausgeht, dass der Raum flach ist und dass die Dunkle Energie gegenwärtig mit 70 Prozent zur gesamten Energiedichte beiträgt. Wir dürfen beim Kosmos als Ganzem bei den bereits von Euklid definierten Vorstellungen vom Raum bleiben. Wäre der Raum gekrümmt, so würden sich in einem großen Dreieck die Winkel nicht mehr zu 180 Grad addieren. Weiterhin folgt aus der Existenz der Dunklen Energie, dass die Expansion des Raums kein Ende haben wird. Denkt man an die ferne Zukunft, so wird das Hubble-Verhältnis von Expansionsgeschwindigkeit und Abstand auf einen festen Wert zustreben, der durch die Dunkle Energie gegeben ist. Denkt man an die Vergangenheit, so gibt es aus Beobachtungen zur Sternentwicklung ziemlich gut begründete Mindestwerte für ein Alter des Kosmos. Rechnet man nun vom aktuellen Wert der Hubble-Konstanten rückwärts, so erhält man ein entsprechend hohes Alter nur unter Berücksichtigung eines Beitrags von Dunkler Energie.

C. Die kosmische Rotverschiebung

Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Expansion des Kosmos als Expansion des Raums. In dem Bild von den Rosinen im Hefeteig stellt der expandierende Hefeteig den expandierenden Raum dar, in welchem die Rosinen, das sind die lokalen Anhäufungen von Galaxien, ruhen. In diesem Sinn hat man auch die kosmologische Rotverschiebung von Spektrallinien zu verstehen. Wir hatten die Rotverschiebung zunächst vorgestellt als Dopplereffekt einer Quelle, die sich im Raum vom Beobachter weg bewegt. Bewegt sich die Quelle auf den Beobachter hin, so wie etwa der Andromeda-Nebel auf die Milchstraße, so hat man eine Blauverschiebung. Die entsprechenden Verschiebungen der Spektrallinien liegen im Bereich von einigen Promille oder weniger. Überlagert jedoch wird dieser Effekt von einem weiteren, der aus der Expansion des Raums folgt. Wir haben also einmal die individuellen Effekte auf Grund der Bewegung der Ga-

laxien relativ zueinander im Raum, und zusätzlich den kosmischen Effekt auf Grund der Expansion des Raums. Bei letzterem werden Quelle und Empfänger als im Raum ruhend betrachtet, der sich jedoch dehnt. Wir haben also Rotverschiebung. Der beobachtete Faktor, um den dabei die Wellenlänge des Lichtes zugenommen hat, ist exakt gleich dem Faktor, um den die Längenausdehnung des Raums in der Zeit seit der Emission des Lichts zugenommen hat.

VII. DIE KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG

Die zweite experimentelle Beobachtung, die in allen Details zur Physik eines expandierenden Universums passt, ist die Beobachtung einer Kosmischen Hintergrundstrahlung. Wir diskutierten bei der Sternentstehung Vorgänge der Kompression über viele Größenordnungen und die damit jeweils verbunden extremen Anstiege der Temperatur. Bei der Expansion des Kosmos haben wir im Vergleich dazu einen in der Zeit umgekehrten Vorgang und dementsprechend eine fortlaufende Erniedrigung der Temperatur. Geht man jedoch gedanklich in der Zeit immer weiter zurück, lässt man also den Raum schrumpfen, so werden die Temperaturen steigen. Dementsprechend lässt sich das Entstehen strukturierter Materie nur als Folge der Abkühlung und einer damit verknüpften Zeitskala denken. Dieser Annahme folgend wurde erwartet, dass bei den hohen Temperaturen einer frühen Zeit Atomkerne und Atomhülle getrennt waren: Im Plasma, einem Gas aus Ionen, Elektronen und Lichtquanten (Photonen) im thermodynamischen Gleichgewicht, wirkte der Druck dieses elektrisch wechselwirkenden Mediums jeder lokalen Konzentration von Materie entgegen. Signifikante lokale Konzentrationen sollten sich erst entwickelt haben nach dem Verschwinden des Plasmas. Auf Grund der uns labormäßig bekannten Gesetze erwartet man dies bei einer Temperatur von etwa 3000 Grad. Dann hatten sich die Atomkerne mit den Elektronen erstmals zu neutralen Atomen von Wasserstoff und Helium verbunden. Bei den nachfolgend tieferen Temperaturen hatten die Lichtquanten des Strahlungsfelds nicht mehr die Energie, diese zu ionisieren.

Mit dem Verschwinden des Plasmas wurde das Universum erstmals optisch transparent. Dementsprechend müssten wir heute die Orte der letztmaligen Freisetzung von Lichtquanten aus dem Plasma nach einer Laufzeit von knapp 14 Milliarden Jahren in dem entsprechendem Abstand von knapp 14 Milliarden Lichtjahren beobachten können. Zeitlich früher freigesetzte Lichtquanten wurden durch die vorhandenen Reste des Plasmas absorbiert, sodass wir nur die Endphase beobachten können. Die nachfolgende Expansion lässt eine kräftige Rotverschiebung des Spektrums erwarten. Dies war bereits um 1940 die Einsicht derjenigen Physiker, die

sich damit beschäftigt hatten. Allerdings scheuten sie sich dies entsprechend zu publizieren. So kam es, dass 1964 Penzias und Wilson (Nobelpreis 1978), ohne Wissen von dieser Vorhersage, beim Test einer Antenne für Mikrowellenstrahlung, diese Kosmische Hintergrundstrahlung eher zufällig entdeckten.

Inzwischen ist diese Kosmische Hintergrundstrahlung von mehreren speziell konzipierten Satelliten mit extremer Präzision vermessen worden. Ihr Spektrum folgt exakt dem einer berechneten Strahlung bei 2.72 Kelvin. Ordnet man diesem Spektrum als Quelle das 3000 Grad heiße Plasma zu, so folgt daraus unmittelbar eine Rotverschiebung um etwas mehr als einen Faktor 1000. Mit dem heutigen Wissen zur kosmischen Expansion entspricht das einem Zeitpunkt von etwa 380.000 Jahren nach dem Urknall.

A. Das Gesetz von Planck

Die Kosmische Hintergrundstrahlung ist wie das Licht der Sonne thermischen Ursprungs. Von der Oberfläche der Sonne emittiert ein Plasma der Temperatur von 5800 Kelvin Licht, welches in der spektralen Zerlegung die Farben des Regenbogens zeigt. Sowohl die absolute Strahlungsstärke als auch die Verteilung der Intensität auf die verschiedenen Wellenlängen, die so genannte spektrale Intensitätsverteilung, werden durch das von Max Planck 1900 formulierte Strahlungsgesetz verstanden. In dieses grundlegende Gesetz gehen neben der Temperatur nur fundamentale Naturkonstanten wie Lichtgeschwindigkeit und Plancksches Wirkungsquantum ein. Das Gesetz ist abgeleitet aus den Vorstellungen eines thermodynamischen Gleichgewichts von Materie mit Strahlung und einer Quantisierung des elektromagnetischen Strahlungsfelds.

Einstein erkannte, dass im Planckschen Strahlungsgesetz ein Produkt dargestellt wird aus einer Anzahldichte von Photonen (Lichtquanten) und der mittleren Energie der einzelnen Photonen. Dabei ist die mittlere Energie eines Photons proportional der Temperatur. Verknüpft man dies mit dem Gedanken der Kosmischen Expansion und der damit verbundenen Rotverschiebung, so folgt, dass in einem expandierenden Bereich die Anzahl der Photonen konstant bleibt, deren Energie jedoch entsprechend der Rotverschiebung abnimmt. Nach den Regeln der Thermodynamik besagt dies dass die Expansion des Strahlungsfelds im Gleichgewicht mit seinem Strahlungsdruck erfolgt. Die Wechselwirkung der vielen Photonen mit Materie erfolgt durch Streuung an Elektronen, dabei bleibt die Anzahl der Photonen erhalten. Man kann sich also auf mehr als eine Weise klar machen, dass im expandierenden Strahlungsfeld Temperatur und Durchmesser umgekehrt proportional sind.

Vergleicht man heute die Anzahldichte der Photonen der Kosmischen Hintergrundstrahlung mit der über große Skalen gemittelten Anzahldichte von Nukleonen, d.h. aller Protonen und Neutronen, einschließlich der in Atomkernen gebundenen, so kommen etwas mehr als eine Milliarde Photonen auf ein Proton! Geht man nun in der Zeit immer weiter zurück, so steigt die Energie der Photonen ins Grenzenlose. Demnach hatte in der frühen Zeit das Strahlungsfeld vollständig dominiert. Daraus folgt, dass die Größe des Kosmos und die Temperatur zueinander reziprok sind. Demnach ist zur Diskussion physikalischer Prozesse in der Frühphase die Temperatur als relevante Größe anzusehen. Auch ist das zeitliche Verhalten des frühen, von Strahlung dominierten Universums übersichtlich. Einer Abnahme der Temperatur um einen Faktor 2 entspricht eine Zunahme des Alters um einen Faktor 4. Dazu kann man sich noch merken, dass bei einem Alter des Kosmos von einer Sekunde die Lichtquanten eine mittlere Energie von 1 MeV hatten.

B. Strukturbildung im expandierenden Kosmos

Die Kosmische Hintergrundstrahlung zeigt uns, wie der Kosmos im Alter von 380.000 Jahren aussah. Die Messungen von Satelliten erfassen alle Richtungen des Raums. Sie ergeben das sehr wichtige Resultat, dass in allen Himmelsrichtungen die Intensität gleich ist. Abweichungen liegen im Bereich unterhalb von hundertstel Prozenten. Dies ist die experimentelle Basis für die Vorstellung von einer homogenen Verteilung der Materie im Kosmos zum damaligen Zeitpunkt.

Wie hängen nun die Eigenschaften der beobachteten Hintergrundstrahlung mit der beobachteten Verteilung der Galaxien zusammen? Mittelt man großräumig, so erscheint auch die Verteilung der Galaxien in den verschiedenen Richtungen am Himmel als homogen, das passt zur Homogenität der Hintergrundstrahlung. In kleineren Skalen jedoch sind Galaxien, wie wir diskutiert haben, extrem inhomogen im Raum verteilt. Es gibt lokale und flächige Häufungen und riesige Leerräume, man spricht von einer schwammartigen Verteilung, welche offensichtlich der Verteilung der Dunklen Materie folgt.

Mit der Wandlung des heißen Plasmas in ein elektrisch neutrales Gas verschwand auch der Druck des Strahlungsfelds auf die Materie. Dieser hatte bis dahin allen lokalen Konzentrationen auf Grund der Gravitation entgegen gewirkt. Das gilt natürlich nur für solche Bereiche, die durch die Wirkung des Drucks auch physikalisch verbunden waren.

Im Plasma breiteten sich lokale Dichteänderungen wie Schall aus. Man hat also einen Laufzeiteffekt über eine Zeitspanne von bis zu 380.000 Jahren zu erwarten. Da im Plasma der Beitrag des Strahlungsfelds dominierte,

kennt man den Wert der Schallgeschwindigkeit. Sie war gleich der Lichtgeschwindigkeit, dividiert durch die Quadratwurzel von 3. Die Strecken, welche der Schall in den ersten 380.000 Jahren zurückgelegt hatte, erscheinen heute als Abstand von nur einem Bogengrad. Nur innerhalb dieser engen Bereiche kann man Ausgleichsvorgänge diskutieren, alle weiter getrennten Bereiche sind davon nicht beeinflusst. Die beobachtete Gleichverteilung der Materie über größere Winkelabstände kann also nicht als Folge eines Ausgleichsvorgangs verstanden werden. Sie muss vom Anfang her vorgegeben sein.

In der Kosmischen Hintergrundstrahlung zeigen sich Abweichungen von der Gleichverteilung als Temperaturschwankungen im Bereich von einigen Tausendstel Prozenten. Das beobachtete Muster ihrer Verteilung auf der Himmelskugel wirkt wie zufällig. Bei kleinen Abständen im Beobachtungswinkel findet man jedoch eine statistische Korrelationen der Intensität. Die erste und besonders starke Korrelation wird bei einem Winkelabstand von knapp 1 Bogengrad beobachtet, zwei weitere Maxima der Korrelationen folgen für kleinere Winkel. Durch gesteigerte Messgenauigkeit erwartet man Information über noch kleinere Winkelabstände. Diese Ergebnisse großer wissenschaftlicher Teams unter Leitung von George Smoot und John Mather (Nobelpreis 2006) ermöglichten weitreichende Aussagen über Struktur und Entwicklung des Kosmos.

Diese beobachteten Verteilungen reproduzieren Fachleute in modellmäßigen Rechnungen, welche ausgehen von sehr kleinen Dichteschwankungen, die in der Physik des Urknalls begründet sind. Sie erzeugten lokale Gravitationsfelder, welche Materie, und hier insbesondere die Dunkle Materie, beschleunigten. Die Dunkle Materie spielt eine eigene Rolle, da sie im Gegensatz zum Plasma der normalen Materie auf eine Änderung der Konzentration nicht mit einer Änderung des Drucks reagiert. Diese bewegten Bereiche liefen aufeinander zu und vergrößerten so lokal die Dichte und damit auch das Gravitationsfeld. Man hatte also selbstverstärkende Prozesse. Andererseits war in der durch Strahlung dominierten Phase der Beitrag der Dunklen Materie vergleichsweise schwach, da der Energieinhalt des Strahlungsfelds dominierte.

An dem in den Korrelationen der Intensitäten beobachteten Maximum bei 1 Bogengrad - dem akustische Peak - ist wichtig, dass dieses die Messung einer Winkelsumme in einem Dreieck von kosmischer Dimension beinhaltet. Aus einer entsprechenden Analyse wird geschlossen, dass der Raum flach ist im Sinne der Euklidischen Geometrie. Diese Beobachtung gilt als experimentell überzeugend. Aus den Stärken der beobachteten Maxima der Korrelation haben wir darüber hinaus Information über den Anteil der normalen sowie der Dunklen Materie relativ zur Anzahl der Photonen des Strahlungsfelds, der wichtigsten Konstanten des kosmischen Systems.

Nach der Auflösung des Plasmas folgte die Materie den lokalen Gravitationsfeldern, so wie diese sich auf Grund der immer stärker konzentrierenden Materie einstellten. Auf Grund der gegenseitigen Abhängigkeit war diese Strukturbildung ein sich selbst verstärkendes Geschehen, das zunehmend größere Bereiche erfasste. Dabei war entscheidend, dass dies in einem expandierenden Kosmos geschah. In der Konkurrenz von Auseinanderlaufen auf Grund der Expansion des Raums und von Zusammenziehen auf Grund der lokalen Felder gab es für bestimmte Bereiche jeweils den Zeitpunkt, ab dem das Zusammenziehen die Expansion überwog. Das bedeutete, dass diese Bereiche von der kosmischen Expansion abgekoppelten. Die Materie innerhalb dieser Bereiche konzentrierte sich durch wechselseitige Anziehung lokal weiter, während die außerhalb dieser Bereiche verbleibende Materie sich auf das immer weiter expandierende Volumen verteilte und so entsprechend ausdünnte. Je früher das Abkoppeln erfolgte, desto geringer ist heute die Materiedichte in den verbleibenden Außenbereichen.

Für die Dunkle Materie ist der Spielraum zu einer weiteren Konzentration eingeschränkt: potentielle Energie wird in kinetische Energie gewandelt. Bei normaler Materie folgt dann die Wandlung kinetischer Energie in thermische Energie. Wurde diese durch Strahlung abgegeben, schritt der Konzentrationsprozess weiter fort bis sich die hochkompakten sphärischen Verteilungen bildeten, aus denen die Sterne entstanden. Bei der Dunklen Materie hingegen bleibt es bis heute beim Wechselspiel von potentieller Energie und kinetischer Energie, wie bei einem Pendel ohne Dämpfung. Dementsprechend ergeben sich für die Dunkle Materie nicht die extrem hohen Konzentrationen der normalen Materie in Bereichen der Größe etwa eines Sterns. Für Dunkle Materie liegt die relevante Skala der Konzentration eher im Bereich der Ausdehnungen von Galaxien oder Galaxienhaufen. Spannend ist, wie weit sich Dunkle Materie zu kleinen Bereichen hin strukturiert. Aufgrund des bleibend dynamischen Verhaltens der Dunklen Materie hat man einen Prozess der fortlaufenden Verschmelzung der anfangs sehr vielen, aber eher massearmen Bereiche zu wesentlich wenigeren, doch viel massereicheren Bereichen. In den lokalen Konzentrationen der Dunklen Materie strukturierte sich die normale Materie. Dies wird in Modellrechnungen, etwa der sogenannten Millenniums-Simulation der Garching Astrophysiker, im Detail nachvollzogen.

In den Verteilungen der Galaxien wird eine Signatur der Schallausbreitung im anfänglichen Plasma sichtbar. Die Auflösung des Plasmas beendete die Ausbreitung einer Dichteänderung als Schall. Demnach sind Bereiche stark erhöhter Dichte, die ursprünglichen Zentren der Schallausbreitung, jeweils umgeben von einem Bereich geringfügig erhöhter Dichte. Dieser liegt auf einer Kugelschale mit einem Radius welcher der Laufstrecke des

Schalls entspricht. Da nun alle diese Bereiche erhöhter Dichte Ausgangspunkt der Galaxienbildung waren, erhält man für die Anzahldichte von Galaxien als Funktion des Abstands eine Korrelation. Analog zum akustische Peak in der Kosmologischen Hintergrundstrahlung gibt es auch einen akustische Peak in der Anzahldichte der Galaxienverteilung. Auf Grund der kosmischen Expansion liegt der Radius dieser Korrelation heute bei knapp 400 Millionen Lichtjahren. Erhoffte Beobachtungen dieser Strukturen, auch in großem Abstand von uns, wären eine unabhängige, experimentelle Information über den Ablauf der Expansion des Raums.

C. Die ersten Sterne

Die ersten Sterne sollten bereits nach etwa 200 Millionen Jahren in Bereichen besonders hoher Gasdichte entstanden sein. Für den gravitativen Konzentrationsprozess war entscheidend, dass ihr Ausgangsmaterial, Wasserstoff und Helium, erst bei vergleichsweise hohen Temperaturen Wärme abstrahlt. Um diese zu erreichen, bedurfte es der Gravitation kompakter Systeme von etwa 500 Sonnenmassen. Diese Riesensterne brannten in wenigen Millionen Jahren ab und endeten als gigantische Supernovae, im Jargon Hypernovae. Es verblieben jeweils ein massereiches Schwarzes Loch und eine abgesprengte Hülle. In dieser gab es, erstmals im Universum, die schweren Elemente.

Diese erste Sternbildung erfolgte in den Bereichen besonders hoher Dichte von Dunkler Materie. Wegen der beschriebenen gravitativen Selbstverstärkung dieser Konzentrationsprozesse ist die Bildung dieser ersten Sterne mit der Entstehung von Galaxien und Galaxienhaufen verknüpft. Dies war ein dauernder Zufluss von Materie, anfangs in der Form von Gas, dann in der Form von Sternen und Galaxien. Dabei nahmen diese ersten Schwarzen Löcher durch Kollisionen und Akkretion an Masse zu und wuchsen so zu den supermassereichen Schwarzen Löchern der jeweiligen galaktischen Zentren.

Mit dem verstreuten Material der Hüllen bildeten sich, etwa 700 Millionen Jahre nach dem Urknall, die ersten Sterne der zweiten Generation, der sogenannten Population II. Die dem Gas beigemischten schweren Elemente ermöglichten die Wärmeabstrahlung bei niederen Temperaturen, und damit die Bildung kleinerer Sterne. Diese reicherten im interstellaren Gas schwere Elemente an. Zu den wesentlich höheren Konzentrationen haben mehrere Supernova-Zyklen beigetragen. Aus diesem Gas entstanden dann, etwa im Bereich der Spiralarme unserer Galaxis, die jüngeren Sternen der Population I, zu der auch unsere Sonne gehört. In alten Bereichen, insbesondere im Zentralbereich der Galaxis, dominieren Sterne der Population II.

Mit dem Hubble Satelliten-Teleskop gelangen, in drei

ausgewählten Bereichen, sogenannte Deep Field Aufnahmen. In diesen schaut man bis in Tiefen von 12 bzw. 13 Milliarden Lichtjahre zurück. Sie zeigen das Entstehen der Population II-Sterne in Galaxien, ein Anwachsen der Sternentstehung in den ersten 3 Milliarden Jahren, eine maximale Sternentstehung vor 8 bis 10 Milliarden Jahren und einen etwa 10 mal geringeren Zuwachs an Sternen heute. Die Bildung der ersten Galaxien kann mit den gegenwärtigen Teleskopen noch nicht beobachtet werden.

VIII. DIE ERSTE HALBE STUNDE

Eine dritte Beobachtung, die das kosmischen Expansionsmodell stützt, ist die Verteilung der Häufigkeit der Elemente. In Bereichen, die durch Sternentstehung noch nicht beeinflusst sind, beobachtet man nur Wasserstoff und Helium, sowie Spuren von Lithium, pauschal gesagt, 75 Prozent Wasserstoff und 25 Prozent Helium, in Gewichtsanteilen. Diese Verteilung existiert so seit der ersten halben Stunde des Universums und wird deshalb auch gerne primordial genannt. Man versteht sie quantitativ im Rahmen der kosmischen Expansion eines sehr heißen Plasmas. Dieses durchlief in einem Prozess der Abkühlung eine Skala von Temperaturen, deren Beginn weit oberhalb der Physik liegt, die an Teilchenbeschleunigern zugänglich ist. In jeder Phase der Expansion war thermodynamisches Gleichgewicht weitgehend realisiert. Konkret bedeutet dies, dass die Temperatur jeweils bestimmte, in welcher Form die Materie vorlag. Systeme mit Bindungsenergien kleiner als die jeweilige thermische Energie waren dissoziiert. Die Dissoziation der Atome in Elektronen und Atomkerne haben wir bereits besprochen. Bei höheren Temperaturen waren die Atomkerne nicht mehr stabil, Protonen und Neutronen waren nicht mehr gebunden. Bei weiter ansteigenden Temperaturen wurden die Quarks, die elementaren Bausteine von Protonen und Neutronen, frei. Damit kam zum Feld der Elektromagnetischen Wechselwirkung, dem von Planck beschriebenen Strahlungsfeld, nun auch das Feld der Starke Wechselwirkung, das Gluonenfeld, dazu. Man spricht von einem Quark-Gluon-Plasma. Bei sehr hohen Temperaturen waren auch die Feldquanten der Schwachen Wechselwirkung mit ins Spiel. Sie haben die wichtige Eigenschaft, zwischen den verschiedenen Arten von Quarks ein Gleichgewicht herzustellen. Das hatte zur Folge, dass bei der Abkühlung des Plasmas, und dem damit verbundenem Verschwinden der freien Quarks, diese sich gleich wahrscheinlich zu Protonen und Neutronen vereinen sollten. Da Neutronen jedoch etwa ein Promille schwerer sind als Protonen, verschiebt die Schwache Wechselwirkung diese Symmetrie der Erzeugung zugunsten der Protonen, weiterhin bewirkt sie den radioaktiven Zerfall in Protonen, dabei werden jeweils ein Elektron und ein (Anti)Neutrino emittiert. Die Neutronen verschwinden mit einer Halbwertszeit von etwa 10 Minuten. Diese Physik versteht man, sodass man das Verhältnis von freien Neutronen zu Protonen zuverlässig in eine, in Einheiten von

Sekunden definierte, Zeitskala umrechnen kann.

A. Die primordiale Elementsynthese

Die Starke Wechselwirkung bindet die freien Protonen und Neutronen, bevorzugt sind dabei die Kerne des Heliums, da in diesen zwei Protonen und zwei Neutronen besonders fest gebunden sind. Diese Reaktion erfolgt jedoch in Schritten. Dabei erweist sich bereits der erste, die Bildung der Atomkerne des schweren Wasserstoffs, des Deuteriums, aus je einem Proton und einem Neutron als ein Flaschenhals, der den ganzen zeitlichen Ablauf bestimmt. Weil die Bindung von Deuterium besonders gering ist, wurde es bei Temperaturen oberhalb von 1 Milliarde Grad so schnell thermisch dissoziiert, dass weiter Reaktionsschritte hin zum Drei- und Vier-Nukleonensystem verhindert waren. Sank jedoch die Temperatur unter diesen Wert, so wurden in einer sehr kurzen Zeitspanne aus Deuterium durch Anlagerung von Protonen und Neutronen die Kerne des Heliums erzeugt. Dabei werden alle Neutronen verbraucht. Somit entspricht der Anteil des erzeugten Heliums dem Verhältnis von freien Neutronen zu Protonen zu dem Zeitpunkt, als die Temperatur von 1 Milliarde Grad unterschritten wurde. Dieser Zeitpunkt, die viel zitierten 3 Minuten, ist aus der Messung des Helium-Anteils bestimmt. Er ist konsistent mit unseren Vorstellungen über den kosmologischen Zusammenhang von Temperatur und Zeit.

Die Bildung der Heliumkerne erfolgte durch das Zusammenfügen der elektrischen Ladungen von zwei Protonen gegen ihre elektrische Abstoßung. Deswegen war auf Grund der rasch sinkenden Temperatur die Bildung von Helium bald nicht mehr möglich. Es verblieben Reste von Deuterium und des radioaktiven Tritium im Promille Bereich und darunter. Aus deren Anteil lässt sich berechnen die Dichte der Materie damals. Sie passt zu dem, was man aus der Kosmischen Hintergrundstrahlung ermittelt hat. Wegen der sinkenden Temperatur war die Bildung der nächst schwereren Kerne stark unterdrückt. Dazu trug auch bei, dass einige der schwereren Kerne instabil sind. Somit hatte sich nach etwa 30 Minuten die primordiale Elementhäufigkeit eingestellt.

Die primordiale Elementsynthese lässt sich sehr gut unter Verwendung von Labordaten für jeden einzelnen Prozessschritt rechnerisch nachvollziehen. Mit den Daten zur Materie- und Photonendichte aus der Kosmischen Hintergrundstrahlung und mit unseren Vorstellungen über das zeitliche Verhalten der Expansion folgen Messgrößen: relativ zu Wasserstoff die Häufigkeiten des schweren Wasserstoff-Isotops Deuterium, der beiden Helium-Isotope und einer extrem niedrigen Beimengung von Lithium-Isotopen. Die hervorragende Übereinstimmung gilt als überzeugender Beweis für das Urknallmodell.

IX. ÜBERLEGUNGEN ZUM ANFANG

Der Ablauf nach den ersten 3 Minuten gilt seit langem als gesichert. Wollen wir die Zeit davor physikalisch diskutieren, so kommen bei den nun viel höheren Temperaturen die Antiteilchen ins Spiel. Im thermodynamischen Gleichgewicht entstehen aus zwei Photonen entsprechend hoher Energie ein elementares Teilchen und sein Antiteilchen, zum Beispiel ein Elektron und sein Antiteilchen, das Positron. Bei noch höheren Temperaturen entstehen ein Quark und sein Antiquark. Thermodynamisches Gleichgewicht bedeutet, dass es auch den Umkehrprozess gibt: ein Elektron und ein Positron vernichten sich gegenseitig und zwei Photonen in Form harter Gammastrahlung werden freigesetzt. Entsprechendes gilt für die Quarks. Pauschal gesagt wird Strahlungsenergie in Materie umgesetzt und umgekehrt. Da es mehrere Milliarden mehr Photonen als Atome gibt, bestand die Materie der Frühphase hauptsächlich aus Photonen extrem hoher Energien und aus Paaren von Teilchen und Antiteilchen in vergleichbarer Anzahl.

Die Physik der Elementarteilchen kennen wir aus Beschleunigerexperimenten. Entsprechend der maximalen Energie des LEP-Beschleunigers am CERN gelten die Vorgänge bis zu Energien von 200 GeV als verstanden. Übersetzt in Temperaturen und Zeit führt uns dies zurück in ein Alter des Universums von nur einer zehntel Milliardstel Sekunde. Das thermodynamische Gleichgewicht bedingte, dass die Zahl der Teilchen-Antiteilchen-Paare die Zahl der Teilchen in der Materie vorhandenen Quarks und Leptonen um viele Größenordnungen übertraf, schätzungsweise ein Faktor von einer Milliarde. Dies zeigt die immense Energiedichte des alles beherrschenden Strahlungsfelds.

Der Energieinhalt des Kosmos war umso größer, je weiter wir in der Zeit zurück denken. Dieser Energieinhalt und die potentielle Energie der Gravitation hielten sich das Gleichgewicht. Sie addierten sich näherungsweise zu Null. Dementsprechend kann man die potentielle Energie der Gravitation als Quelle des Energieinhalts des Universums ansehen.

Damals war die Energie der Teilchen und Photonen im Strahlungsfeld um vieles größer als die Ruhe-Energie der Elementarteilchen, aus denen die Materie heute besteht. Weiterhin lässt die riesige Zahl der Teilchen-Antiteilchen-Paare die Zahl der Teilchen, die nach der Vernichtung übrig geblieben sind, als minimal erscheinen, und somit als nahezu vernachlässigbar.

Dies ist nun ein weiterer ganz wichtiger Punkt. Die von den Kosmologen diskutierten Konzepte gehen aus von einer völlig symmetrischen Anfangssituation, entsprechend der des Strahlungsfelds. Dementsprechend fordern sie, dass der minimale Überschuss an Teilchen sich als ein dynamischer Effekt ergeben haben sollte

im Rahmen der kosmischen Evolution, auf Grund einer diese Symmetrie brechenden Wechselwirkung. Das ist natürlich eine heikle Frage. Physik verstehen wir als die Summe einiger weniger Erhaltungsgesetze und den damit verknüpften einfachen strukturellen Aussagen. Die Materie, technisch gesprochen die Baryonenzahl und die Leptonenzahl, kann letztlich nicht einfach aus dem Nichts entstanden sein. Ein aktuelles Ziel der Forschung von Teilchenphysikern und Kosmologen ist, Eigenschaften des Systems so zu identifizieren, dass die uns bekannte Materie, welche ja offensichtlich nur ein kleiner Teil eines einst größeren Ganzen darstellt, in konsistenter Weise verstanden wird.

Bei diesen Überlegungen bewegen wir uns im Bereich der physikalischen Vermutungen. Man geht aus von der Allgemeinen Relativitätstheorie und möchte die Entstehung beschreiben als einen kontinuierlichen Prozess, auch wenn die Zeitskala dafür extrem eng ist. Auf diese Weise sollen Zusammenhänge in den beobachteten Eigenschaften als kausal bedingt identifiziert werden. Zu diesem Konzept gehört auch, dass die uns heute bekannten Wechselwirkungen, die starke, die schwache, und die elektromagnetische, aus einer ihr zu Grunde liegenden allgemeineren Form der Wechselwirkung entstanden sind. Für die Schwache und die Elektromagnetische Wechselwirkungen ist der Zusammenhang verstanden. Seitdem ist Symmetriebrechung eines der großen Konzepte der Teilchenphysik. Eine Vereinigung dieser Wechselwirkungen sollte vor einem Alter von einer Zehntel Milliardstel Sekunde vorgelegen haben, in einer Energieskala, in der die uns bekannten Elementarteilchen auf Grund ihrer vergleichsweise viel zu geringen Masse noch keine Rolle gespielt hatten.

A. Symmetriebrechungen

Man geht aus von extrem großen Energiedichten und folgt der Vorstellung, dass aus anfänglich Einfachem das Kompliziertere entstanden ist durch Symmetriebrechung.

Um das Konzept der Symmetriebrechung zu veranschaulichen kann man, in einem sehr naiven Vergleich, etwa an Wasser denken. Bei hohen Temperaturen genügt die Kenntnis der Masse der Moleküle, um in der Gasphase den Druck zu berechnen. Bei abnehmenden Temperaturen und zur Beschreibung der Kondensation zu flüssigem Wasser muss man zusätzlich das Molekülvolumen und die Stärke eines Anziehungspotentials kennen. Daraus ergibt sich eine wohldefinierte kritische Temperatur, unterhalb der man flüssiges Wasser und Wasserdampf zu unterscheiden hat. Interessiert man sich für die Kristallstruktur von Eis oder die Form von Schneeflocken, so wird die geometrische und elektrische Struktur des Moleküls wichtig. Bei den Schritten von Gas zu flüssigem Wasser und dann zur Schneeflocke haben wir eine Folge von Symmetriebrechungen: Im Gas

ist jeder Ort und jede Richtung gleichberechtigt. Dies gilt nicht mehr an der Oberfläche einer Flüssigkeit und noch weniger für eine Schneeflocke. Verbunden sind mit dieser zunehmenden Symmetriebrechung der Beitrag energetisch immer kleinerer Wechselwirkungen. Geht man aber aus von den beobachteten Phänomenen im Bereich hoher Symmetriebrechung, so ist es nicht so einfach, daraus auf die Situation bei hoher Symmetrie zu schließen. Wie soll sich jemand, der nur Eis und Schneeflocken kennt, die Eigenschaften von heißem Wasserdampf vorstellen?

Im Beispiel geht es um den Übergang von der gasförmigen Phase zur flüssigen Phase und dann zur festen. Es zeigt den engen Zusammenhang von Phasenübergängen und Symmetriebrechungen. Bei der Kondensation von Wasserdampf zu flüssigem Wasser wird Energie freigesetzt, die Kondensationswärme. Diese Freisetzung von thermischer Energie bei Phasenübergängen ist wesentlich verbunden mit dem Konzept der Symmetriebrechung.

Die Symmetriebrechungen im Beispiel hängen ab von der Temperatur, die zu Grunde liegenden Wechselwirkungen jedoch nicht. Dies ist anders bei den Symmetriebrechungen der Teilchenphysik. Da geht es um die Änderungen der Stärke von Wechselwirkungen und der Massen von Teilchen.

B. Das Horizontproblem

Jede Überlegung zum Beginn des Universums muss erklären, warum der Kosmos in seinem großskaligen Verhalten homogen ist. Dem entspricht auch die Frage: woher kommt die Isotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung? Man versteht diese nur, wenn man zeigen kann, dass sich alle diese Bereiche einmal in physikalisch bedingter Wechselwirkung befunden hatten. Vom anfänglichen Plasma, das wir über die Kosmische Hintergrundstrahlung beobachten, wissen wir jedoch bereits, dass die akustischen Wellen jeweils Strecken zurückgelegt hatten, die wir heute unter einem Abstand von nur einem Bogengrad sehen. Demnach sind alle größeren Bereiche unverbunden. Da die Geschwindigkeit der akustischen Wellen von der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit war, kann man dies als Aussage für jede Art von Wechselwirkungen nehmen.

Im expandierenden Universum entfernen sich alle Bereiche des Raums voneinander, und die Geschwindigkeiten sind proportional zu den Entfernungen. Das gilt für jeden Teilbereich des Raums. Somit ist im expandierenden Raum jedem Punkt ein umgebender Bereich zugeordnet, der innerhalb eines Horizonts liegt. Von diesem Punkt entfernt sich der Raum innerhalb des Horizonts mit Geschwindigkeiten, die kleiner sind als die des Lichts. Dementsprechend sind Ereignisse in diesem Raum sichtbar, zumindest im Prinzip. Ausserhalb des Horizonts

hingegen entfernt sich der Raum mit Geschwindigkeiten größer als der des Lichts, damit sind diese Bereiche grundsätzlich nicht sichtbar. Je schneller die Expansion, desto kleiner der Raum innerhalb des Horizonts. Würde mit der Expansion des Raums sich die Energiedichte des Universums gerade so ändern, dass die Geschwindigkeiten der Expansion zeitlich konstant bleiben, so wird der Horizont immer den gleichen Bereich des expandierenden Raums umfassen. Um dies zu veranschaulichen, denken wir uns die Galaxien als schon immer existierende Objekte, ruhend im Raum. Dann bleibt während der Expansion die Anzahl der sichtbaren Galaxien, innerhalb des Horizonts, konstant.

Würde mit der Expansion hingegen die Energiedichte stark abnehmen, so ist sie verzögert, wie wir diskutiert hatten. Bei einer Reise in die Vergangenheit würden wir sehen, wie die Geschwindigkeiten der Expansion immer größer werden und der Horizont entsprechend schrumpft. Man würde immer weniger Galaxien sehen, sie verschwinden zunehmend hinter dem Horizont. Ein anderer Grenzfall wäre die Situation einer konstanten Energiedichte, wie sie formal durch eine kosmologische Konstante beschrieben wird. Dies entspricht der beschleunigten Expansion. Dann würde bei einer Reise rückwärts in der Zeit der Horizont einen immer größeren Teil des Raums umfassen. Denkt man rein formal und nimmt man für die Konstante einen sehr hohen Wert, so schrumpft der gesamte Kosmos schließlich auf ein Volumen innerhalb des Horizonts, bevor er in die Singularität des Anfangs mündet.

Diese Diskussion soll zeigen, dass in einem nur verzögert expandierenden Weltall die beobachtete Isotropie nicht erklärt werden kann. Der heute sichtbare Kosmos war in der Vergangenheit in immer kleinere, physikalisch nicht verbundene Bereiche vereinzelt. Man spricht vom Horizontproblem.

Die Lösung des Problems sieht man heute darin, dass man nicht von einem Anfang mit riesigen Geschwindigkeiten der Expansion ausgeht, sondern vielmehr annimmt, dass diese Geschwindigkeiten in einer voraus gegangenen Phase beschleunigter Expansion erst entstanden sind. Statt eines instantanen Urknalls denkt man an einen evolutionären Prozess, in welchem Beschleunigung der Verzögerung vorausging. Aus diesem Gedanken heraus entstand das Inflationsmodell, eine Theorie, die jedoch deutlich mehr erklärt als nur die Isotropie. Um dies in den richtigen Zusammenhang zu stellen, sollen zuvor Überlegungen zu einem Anfang im eigentlichen Sinne vorgestellt werden.

C. Planck-Skala, der Anfang

Aus der Allgemeinen Relativitätstheorie ergibt sich der Anfang als Singularität, alle Abstände des Raumes seien

Null. Diese mathematisch formale Aussage widerstrebt dem physikalischen Denken. Wie kleine Dimensionen sind physikalisch noch sinnvoll? Der Physik in diesem Bereich widmen sich Theoretiker, die etwa an String-Theorien arbeiten. Auch wenn wir noch keine Theorie haben, die Gravitation und Quantenmechanik vereinigt, kann man einfache Abschätzungen machen: Die Quantenmechanik und Heisenbergs Unschärferelation besagen, dass bei extremer Beschränkung des Raums der Impuls und damit die Energie sehr groß werden. Und von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie haben wir bereits die Schwarzschild-Beziehung benutzt, die jeder Masse, und damit jeder Energie, einen Schwarzschild-Radius zuordnet. Wird nun der Schwarzschild-Radius größer als die betrachtete Lokalisation, so diskutiert man eine Lokalisation innerhalb eines Schwarzen Lochs, und das ist von einem Standpunkt außerhalb des Schwarzen Lochs physikalisch sinnlos. Auf diese Art erhält man eine Länge von 10^{-35} m, welche man als kleinsten, physikalisch noch sinnvollen Wert für die Angabe eines Abstands betrachtet. Man bezeichnet diese als Planck-Länge. Dividiert man sie mit der Lichtgeschwindigkeit, so folgt daraus eine kleinste, physikalisch noch sinnvolle Zeitdifferenz, die Planck-Zeit. Entsprechend erhält man den Energieinhalt, die Planck-Energie, und die davon abgeleitete Energiedichte, welche extrem hoch ist.

D. Inflationäre Expansion

Das Modell der Inflation erlaubt nun die Vorstellung, dass der gesamte heute zu beobachtende Kosmos sich entwickelt hat aus der Expansion eines Bereich, dessen Ausdehnung und Energiedichte durch die Planck-Skala vorgegeben war. Da es keine Struktur kleiner als die Planck-Länge geben kann, ist dieser anfängliche Bereich auch frei von einer inneren Struktur. Deshalb ergibt sich die Isotropie des beobachtbaren Kosmos wie von selbst, falls dieser damals nur einen sehr kleinen Teilbereich, relativ zur ursprünglichen Planck-Länge, umfasste. Dies impliziert, dass der Kosmos heute sehr viel größer ist als der beobachtbare. Was ausserhalb dieses anfänglichen Bereichs war, ist grundsätzlich jenseits eines Beobachtungshorizonts. Damit erledigt sich auch das Problem einer Krümmung des Raums. Das beobachtete euklidische Verhalten ergibt sich aus der einfachen Tatsache, dass ein sehr kleiner Bereich eines insgesamt gekrümmten Raums immer noch als geradlinig erscheint. Das, was im verzögert expandierenden Kosmos als Feinabstimmung von Energiedichte und Expansion angesehen werden mag, ist somit Folge und nicht Ursache.

Der extremen Schnelligkeit der Expansion entspricht eine sehr hohe Energiedichte, das hatten wir als Aussage des Friedmann Modells kennengelernt. Die Energiedichte der Planck Skala war abgesunken auf einen festen Wert,

den man gerne als eine quantenmechanisch vorgegebene Nullpunktsenergie eines entsprechenden Felds verstehen möchte. Manche nennen dieses Feld falsches Vakuum. Das sind natürlich besonders einfache modellmäßige Annahmen.

Aus einer extremen Schnelligkeit der Expansion ergibt sich insbesondere, dass das physikalische Geschehen an einem bestimmten Ort nur noch von der unmittelbaren Umgebung bestimmt war. Alles, was jenseits eines sehr kleinen Horizonts passierte, konnte nicht mehr auf diesen Ort zurückwirken.

Wichtig ist nun, dass der Horizont eine Längenskala vorgibt, in der die Heisenbergsche Unbestimmtheitsbeziehung relevant wird: Die Quantenmechanik erlaubt, dass ein System kurzzeitig in einen anderen Zustand übergeht und dabei die Forderung nach Erhaltung der Energie verletzen darf. Die Verletzung der Energieerhaltung kann dramatisch sein, sofern nur die Zeitdauer der Verletzung entsprechend kurz ist. Beobachtbare Effekte ergeben sich immer erst dann, wenn die Rückkehr des Systems in den ursprünglichen Zustand behindert ist. Auf diese Weise versteht man, z.B. in der Quantenelektrodynamik, die beobachteten Wechselwirkungen als Folge der Erzeugung und Vernichtung von Feldquanten. Im Fall der inflationären Expansion geht es nun darum, dass einige dieser Anregungen des Felds den Horizont überschreiten, sodass eine Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands nicht mehr gegeben. Der jeweils in Frage stehende Energiebetrag war vom Bereich innerhalb des Horizonts in den Bereich außerhalb des Horizonts übertragen worden. Entsprechend änderten sich die lokalen Energiedichten. Die Änderungen waren umso größer, je kleiner der Horizont damals war. Diese sogenannten Quanten-Fluktuationen der Energiedichte expandierten mit dem Raum. Somit umfassten sie Raumbereiche, die vom Zeitpunkt der jeweiligen Fluktuation bestimmt waren. Je früher sie erzeugt wurden, desto ausgedehnter wurden die Raumbereiche. Nach dem Ende der inflationären Expansion hatten sie ganz unterschiedliche Größen. Man beschreibt diese Situation mit einfachen statistischen Annahmen. Modelliert man die anschließenden, gravitativ ablaufenden ersten Konzentrationsprozesse bis zum Zeitpunkt der Emission der Kosmischen Hintergrundstrahlung, so lassen sich daraus die dort beobachteten Verteilungen der Korrelationen im Grundsatz verstehen. Sind die beobachteten Winkelbereiche kleiner als ein Bogengrad, so zeigen sie die Quantenfluktuationen zu eher späteren Zeitpunkten, diese sind jedoch durch Ausgleichsprozesse modifiziert. Die Strukturen in Winkelbereichen größer als ein Bogengrad hingegen zeigen die Quantenfluktuationen zu früheren Zeitpunkten ohne jede Modifikation! Aus der Anpassung an diese experimentellen Daten folgt die Annahme eines sehr frühen Zeitpunkts und einer sehr kurzen Zeitdauer dieser insgesamt extrem schnellen inflationären Expansion.

Das Konzept der Inflation kann man als ein minimalistisches Modell auffassen, aus dem in konsistenter Weise Homogenität und Isotropie des Kosmos, Euklidisches Verhalten des Raums und Quantenfluktuationen als Ausgangspunkt von Strukturbildung folgen.

E. Teilchen, Felder, und Theorien dazu

Das Ende der Inflation versteht man als den Wandel des Felds der Inflation in einen physikalisch davon verschiedenen Zustand. Bei diesem Phasenübergang sollte das in der Elementarteilchenphysik postulierte Higgs-Feld eine Rolle gespielt haben. Nach diesem Zeitpunkt gab es erstmals die uns bekannten Wechselwirkungen. Der Phasenübergang setzte die Energie des Inflationsfelds frei als Energie des Strahlungsfelds. Entsprechend dem thermischen Charakter des Strahlungsfelds kann man ab jetzt erstmals von Temperatur sprechen. Auf Grund der Wechselwirkungen mit dem Strahlungsfeld entstanden Teilchen und Antiteilchen paarweise im thermodynamischen Gleichgewicht. Auf Grund der nun völlig anderen physikalischen Natur des Kosmos begann die verzögerte Expansion. In dieser Phase sollte sich der Raum um mindestens weitere 30 Größenordnungen ausgedehnt haben.

Das Modell der Inflation beinhaltet eine pauschale Beschreibung der Entstehung des Energieinhalts des Universums und der Entstehung des anfänglichen Schwungs in der Expansion des Raums. In der Sprache der Allgemeinen Relativitätstheorie entspricht das Feld der Inflation einer kosmologischen Konstante. Energiedichte, Expansion und Gravitation waren miteinander so verknüpft, dass ihre wechselseitige Erzeugung aus dem Nichts heraus physikalisch konsistent ist.

Zusammengefasst: Eine anfängliche Situation im Bereich der Planck Skala hatte die Eigenschaft, das inflationäre Feld hervorzubringen. Dieses bewirkte die Erzeugung des Energieinhalts des Kosmos zu Lasten des dabei gebildeten Felds der Gravitation. Die Dynamik des Vorgangs folgt den Aussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Das inflationäre Feld brachte Phasenübergänge hervor, welche die weitere Erzeugung des Energieinhalts beendeten und aus denen die uns heute bekannt Materie hervorging. Danach gab es, sieht man einmal von dem Feld der Dunklen Energie ab, nur noch Prozesse der Wandlung. Diese Vorstellungen werden als notwendig angesehen, wenn man Eigenschaften des so Entstandenen verstehen will. Die physikalischen Begründungen des beschriebenen Verhaltens stehen aus. Man erhofft sie aus neuen Einsichten in die Grundlagen der Physik, insbesondere im Bereich der elementaren Teilchen.

Das Modell der inflationären Expansion geht explizit aus

von einem symmetrischen Universum. Damit ist gemeint, dass Teilchen und Antiteilchen paarweise gebildet worden sind. Ein Mehr an Teilchen gegenüber den Antiteilchen musste sich aus Folgeprozessen in der frühen Zeit ergeben haben. Die Materie heute entspricht allein diesem Überschuss an Teilchen.

F. Teilchen, Felder und Experimentelle Strategien

In der nachfolgenden kosmischen Expansion durchlief das Feld eine weite Skala von Energiedichten, mit anfangs sehr hohen Werten. Dies schafft einen engen Bezug zur Teilchenphysik. Die Stärken der fundamentalen Wechselwirkungen und die Massen der elementaren Teilchen stehen heute noch unverbunden da. Diese Größen möchte man gern als Folge von Symmetriebrechungen einer fundamentalen Beschreibung verstehen. Dies sollte folgen aus der Existenz eines Higgs-Feldes und aus Symmetriebrechungen, wie sie etwa in den als Super-Symmetrie (SUSY) bezeichneten Theorien der Elementarteilchen diskutiert werden. Die Energieskala dafür liegt bei den hohen Energien des frühen Universum. Aussagekräftige Untersuchungen hierzu am unteren Ende des relevanten Energiebereichs erhofft man sich von dem neuen LHC-Beschleuniger am CERN.

Dunkle Materie kennen wir bisher nur durch ihren Beitrag zur Gravitation. Davon unabhängigen Nachweise erhofft man sich von Detektoren, in denen Stöße elementarer Teilchen der Dunklen Materie mit Atomkernen von Detektoren nachgewiesen werden. Man geht davon aus, dass solche Stöße, falls es sie denn gibt, nur auf Grund der Schwachen Wechselwirkung erfolgen und dementsprechend selten sind. Wäre dabei die Rückstoßenergie auf die Atomkerne groß, so würden diese ionisiert, und der Prozess wäre leicht zu detektieren. Da man dies jedoch nicht beobachtet, hat man bei der Dunklen Materie von Teilchen mit vergleichsweise geringen Geschwindigkeiten auszugehen. Dies passt durchaus zur Vorstellung von Kalter Dunkler Materie. Man versucht die geringen Rückstoßenergien über die Erwärmung von Detektorkristallen nachzuweisen. Der Kunstgriff dabei ist, die Wärmekapazität durch Abkühlen auf tiefste Temperaturen extrem zu reduzieren.

Eine andere Strategie des Nachweises Dunkler Materie beruht auf der Annahme, dass diese aus Teilchen und Antiteilchen bestehen könnten, so wie jegliche Materie unmittelbar nach dem Ende der inflationären Phase, zur Zeit der Bildung der Materie in Prozessen der Symmetriebrechung. In der uns bekannten Materie hatten sich, auf Grund der Starken und der Elektrischen Wechselwirkungen, Teilchen und Antiteilchen paarweise vernichtet, und es verblieben nur hochenergetische Gammastrahlung und der Überschuss an Teilchen. Bei der Dunklen Materie hingegen gibt es zwischen den angenommenen Teilchen und Antiteilchen, wenn

überhaupt, dann nur die Schwache Wechselwirkung, sodass Reaktionen der Vernichtung viel seltener sind. Dementsprechend spielte, auf Grund der Expansion des Raums, ab einem vergleichsweise frühen Zeitpunkt die paarweise Vernichtung der Teilchen und Antiteilchen der Dunklen Materie keine wesentliche Rolle mehr, ihre Dichte war zu gering dafür. Danach strukturierte sich aus der zunächst weitgehend homogenen Verteilung die Dunkle Materie. Der diskutierte Prozess der Galaxienbildung wurde durch die sich ständig verstärkende lokale Konzentration Dunkler Materie angetrieben. Somit gibt es heute Bereiche wesentlich gesteigerter Dichte Dunkler Materie, und man kann erwarten, dass in diesen die Vernichtung von Dunkler Materie wieder stattfinden sollte. Von diesen Prozessen hofft man die Zerfallsprodukte der Feldteilchen der Schwachen Wechselwirkung zu beobachten, man denkt insbesondere an Gammastrahlung im GeV Bereich. Es gibt ältere Daten von Satelliten, aus denen eine entsprechende Strahlung, mit Quellen in der Galaxis, herausgelesen werden kann, sodass man auf die weitere Entwicklung gespannt sein darf.

Eine weitere Aufgabe wird sein, experimentell nachgewiesene Dunkle Materie physikalisch zuzuordnen. Ein Ansatz unter anderen ist das Modell der Supersymmetrie. Es wird spannend, ob und wie Kosmologie und Elementarteilchen-Physik hier zusammenkommen werden.

X. RESÜMEE

Der zunächst skizzierte Kenntnisstand zur physikalischen Geschichte der Erde, der Sonne, der Galaxis und der Galaxien, der Schwarzen Löcher und, mit Einschränkungen, der Dunklen Materie, gilt als weitgehend gesichert. Dabei geht es jeweils um Prozesse der Strukturbildung aus einer eher homogenen Ausgangssituationen. Die Kosmologie im engeren Sinn befasst sich mit der Entwicklung des Universums als Ganzem und beschreibt einen Expansionsprozess, für den ein Anfang vorausgesetzt wird. Experimentelle Informationen hierzu haben wir aus den vielen Untersuchungen zur Hubble-Beziehung zwischen Rotverschiebung und Entfernung von Galaxien, aus der Kosmischen Hintergrundstrahlung und aus der Primordialen Elementsynthese. Aus den Untersuchungen zur Hubble-Beziehung kennen wir die großräumige Struktur in der Verteilung von Galaxienhaufen. Die Typ-Ia-Supernovae als Entfernungsmesser zeigen uns die gegenwärtig stattfindende beschleunigte Expansion. Die Verknüpfung dieser Phänomene zu einer für den gesamten Bereich gültigen Beschreibung erfordert es, die Existenz von zwei Energie tragenden Feldern zu postulieren: das Feld der Inflation, aus dem der Ursprung, und der gesamte Energieinhalt des Kosmos hervorgegangen sind, und das Feld der Dunklen Energie, welches in der gegenwärtigen Spätpha-

se sichtbar wird. Das Feld der Inflation beschreibt die Entstehung aus dem Nichts. Es verschwand, als aus ihm in Phasenübergängen die uns heute bekannten Formen von Energie und Materie entstanden. Ob das Feld der Dunklen Energie eine physikalisch erklärbare Ursache hat oder einfach eine Eigenschaft des Raums darstellt, erscheint als offen. Beide Felder haben gemeinsam, dass ihre Energiedichten als unabhängig von der Expansion des Raums angenommen werden können. Dies Verhalten entspricht dem der von Einstein formal eingeführten kosmologischen Konstanten. Auf diese Weise bleibt das uns vertraute Gesetz der Gravitation auch in kosmischen Dimensionen gültig. Die Physik des Anfangs verbindet Konzepte der Kosmologie und der Elementarteilchenphysik. Das Paradigma eines Anfangs folgt aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie.

Sehr deutlich sollte man daran erinnern, dass die kosmologische Diskussion auf zum Teil dünnem Eis geführt wird: Von den heute kosmologisch relevanten Energien sind nur 5 Prozent physikalisch bekannten Formen zugeordnet. Die Natur der Dunklen Materie ist noch unbekannt. Die Dunkle Energie, heute mit etwa 70 Prozent der wichtigste Beitrag zum Energieinhalt des Universums, wurde formal eingeführt um den Rahmen der physikalischen Gesetze nicht zu verlassen. Die Kosmologie fordert dazu auf, die Physik in einen neuen, breiteren Rahmen zu stellen.

Physik ist jedoch mehr als neu entdeckte Phänomene jeweils auf neue Modellvorstellung zurückzuführen. Um neue Modellvorstellungen als Teil der Physik zu betrachten, sollten sie Vorhersagen für andere Systeme machen, die experimentell nachprüfbar sind. So bezog sich Newtons Gravitationsgesetz über hundert Jahre lang nur auf Kräfte, die ihren Ursprung in der Erde oder in der Sonne hatten. Der Schritt weg von diesen Himmelskörpern zu Objekten im Laboratorium gelang erst Cavendish. In kunstvollen Experimenten maß er für zwei Körper deren wechselseitige Anziehung als Funktion ihrer Massen und der Abstände voneinander, und bestimmte so erstmals Newtons Konstante, die Basis aller kosmologischen Berechnungen. Manches braucht eben Zeit, und der spekulative Charakter der aktuellen Kosmologischen Vorstellungen spricht nicht gegen sie. Historisch gesehen gibt es keinen Grund für eine konservative Einstellung. Wesentlich ist die logische Stringenz des Modells, und so wird die Wissenschaft der Kosmologie sicher sehr spannend bleiben.

Denkt man über das, was hier als kosmologisches Geschehen vorgestellt wurde, unter eher weltanschaulichen Gesichtspunkten nach, so ergeben sich bemerkenswerte Gesichtspunkte: Die Physik der Kosmologie vermittelt sehr konkrete Vorstellungen von einem Anfang und von möglichen Formen des Endes, von der Entwicklung von Strukturen, und auch davon, wie in unterschiedlichen Größenordnungen ganz verschiedene Gesetzmäßigkeiten relevant werden.

Sie zeigt auch in beeindruckender Weise die Rolle des Zufalls. Prozesse, die für unsere Existenz letztlich entscheidend sind, waren stochastischer Natur: die Verteilung der Quantenfluktuationen am Anfang ist stochastisch, die Entstehung eines Sterns aus riesigen Bereichen von Supernova-Staub erfolgt aus einer Zufallssituation, ebenso die Bildung der einzelnen Planeten aus einer rotierenden Staubscheibe, und später dann die Einschläge eines Protomondes und anderer Kometen auf die Erde. Diese Relevanz des Zufallsgeschehens setzt sich fort in der Geschichte der Biologie: Voraussetzung der Evolution des Lebens war gerade die Vielzahl der Selektionskriterien, die in ganz unterschiedlicher Weise wirksam wurden und jeweils Minderheiten bevorzugt hatten. Die geänderten Selektionskriterien erschienen damals zumeist als Umweltkatastrophen, Meteoreinschläge, Verlagerungen der Erdkruste, Klimawechsel, Brände, alles Ereignisse die wir als stochastisch ansehen.

Im Zusammenhang mit der Frage nach dem Zufall kann man auch nach der Bedeutung der Naturkonstanten fragen. Nach heutigem Kenntnisstand haben wir die Zahlenwerte für die Massen der elementaren Teilchen und die Stärken der elementaren Wechselwirkungen als vorgegeben zur Kenntnis zu nehmen. Eine übergreifende Theorie, aus der diese folgen, wird noch gesucht. Hätten diese Zahlen nur geringfügig andere Werte, so wäre vieles, und insbesondere unsere Existenz, in Frage gestellt. Natürlich ist dies einer der Ausgangspunkte für Überlegungen welche der Metaphysik zuzuordnen sind.

XI. DANK

Diese Niederschrift folgte allein dem Ziel, unter möglicher Vermeidung von Fachsprache über Beobachtungen und Vorstellungen zu sprechen, die kosmologische Aussagen betreffen, und diese in den Zusammenhang von Astronomie und Physik zu stellen.

Es gibt aktuelle Darstellungen von fachkundigen LMU Kollegen. Die Bücher von Gerhard Börner und von Harald Lesch wenden sich an einen breiteren Leserkreis, das von Viatcheslav Mukhanov eher an Fachstudenten. Fast noch druckfrisch kommt jetzt das Buch von Günther Hasinger dazu, er hatte immerhin an der LMU begonnen. Und natürlich ist das Web eine Fundgrube.

Mein herzlicher Dank für eine Durchsicht des Manuskripts in einem frühen Stadium und für wichtige Anregungen gilt Otmar Biebel und Andreas Müller.

XII. NACHTRAG: PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

Im Folgenden sollen einige der verwendeten physikalischen Grundlagen im Zusammenhang angesprochen

werden. Die Vergangenheit ist mit der Gegenwart verknüpft durch die Erhaltungssätze der Physik. Dies sind die Erhaltung von Energie, Impuls, Drehimpuls und der Anzahl von elementaren Teilchen. Die Geschichte der Sonne war ein Bericht über die zeitlichen Entwicklung eines Gleichgewichts. Dementsprechend sind Begriffe der Thermodynamik, Druck und Temperatur die relevanten Größen. Dabei ist die Temperatur ein Maß für die mittlere kinetische Energie der einzelnen Objekte. Die Temperatur ergab sich aus der Wirkung der Gravitation, einer der elementaren Wechselwirkungen der Physik. Die Gravitation bewirkt Anziehung, nie Abstoßung. Ihre Stärke ist proportional der Masse und kann bei entsprechender Akkumulation von Masse extreme Werte erreichen. Verglichen mit der anfänglichen Gas-Staubwolke ist die Sonne ein kompaktes System, welches sich selbst bindet. Bei der Kontraktion hatte die Gravitation Energie frei gesetzt: potentielle Energie wurde in kinetische Energie gewandelt, und diese durch nachfolgende Stoßprozesse in Wärmeenergie überführt. Gleichgewicht in einem stärker gebundenen Zustand stellte sich jeweils erst dann wieder ein, wenn ein Teil dieser Bewegungsenergie durch Abstrahlung von Wärme aus dem System entfernt worden war. Das Gleichgewicht bedingt, dass das System umso stärker gebunden ist, je kleiner es geworden ist. Auch wächst mit der Bindung die Bewegungsenergie im Innern die Temperatur. Die Existenz der Planeten verdanken wir dem Drehimpuls der anfänglichen Gas-Staub Wolke. Wenn auch die Masse der Sonne die der Planeten um Größenordnungen übertrifft, so gilt für die Drehimpulse gerade das Gegenteil. Nur so ist das System stabil.

Die Erzeugung von Energie aus Wasserstoff im Innern der Sonne beginnt, wenn Protonen die elektrische Ladung von Elektronen aufnehmen. Dabei werden aus Protonen Neutronen und aus Elektronen Neutrinos. Diese Reaktion, in der sich Wasserstoffatome in Neutronen und Neutrinos wandeln, ist aufgrund der Energieerhaltung nur dann möglich, wenn die Neutronen sich sofort mit je einem weiteren Proton verbinden und so Deuteriumkerne bilden. Aus denen entsteht nach weiteren Reaktionsschritten das besonders fest gebundene Helium. Hierzu tragen alle elementaren Wechselwirkungen bei: Die Umwandlung von Protonen zu Neutronen ist ein Prozess der Schwachen Wechselwirkung. Der Energiegewinn bei den nachfolgenden nuklearen Bindungen in Atomkernen ergibt sich aus der Starken Wechselwirkung. Die Elektromagnetischen Wechselwirkung bestimmt die Anziehung von Protonen und Elektronen und die wechselseitige Abstoßung der Protonen. Weiterhin ist das Licht eine Folge dieser Wechselwirkung. Die Erzeugung und Absorption von Licht ist ursächlich verbunden mit der Änderung der Bewegung von Elektronen.

Von der Erde aus sehen wir von diesem Geschehen nur das Licht und, falls man die Apparaturen dazu hat, die Neutrinos. Beobachtet man mit einer hoch-

empfindlichen Photozelle Licht niedriger Intensität, so erscheint Licht als ein Strom von einzelnen Teilchen, den Lichtquanten. Die Wellenlänge von Licht lässt sich mit einem Beugungsgitter messen. Alle Lichtquanten einer bestimmten Wellenlänge haben dieselbe Energie. Lichtquanten und Neutrinos sind elektrisch neutral, Lichtquanten haben keine, Neutrinos fast keine Masse. Sie bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit, bzw. fast mit Lichtgeschwindigkeit. Neutrinos unterliegen der Schwachen Wechselwirkung. Für ihre Anzahl gelten Erhaltungsgesetze. Auf Grund der Schwachen Wechselwirkung durchdringen sie sehr große Schichten von Materie ohne irgendeine Reaktion. Ganz anders die Lichtquanten. Sie werden erzeugt oder vernichtet in Wechselwirkung mit Elektronen. Durchsichtige Materie wie Glas oder Luft passieren sie nur, da Atome auf Grund ihrer quantenmechanisch bestimmten Eigenschaften Licht nur im Bereich bestimmter Wellenlängen absorbieren. Ein Beispiel dafür sind Fraunhofers Linien.

A. Teilchen und Felder

Neutrinos sind elementare Teilchen wie die Elektronen und die Quarks, die Bausteinen von Protonen und Neutronen. Nur diese sind stabil, für ihre Anzahlen gelten Erhaltungssätze. Entscheidend ist das von Wolfgang Pauli 1925 formulierte Ausschließungsprinzip. Zwei gleiche elementare Teilchen können nie am selben Ort und nie im selben Zustand sein. Der Begriff Zustand gehört zur Quantenmechanik. Einfache Vorstellungen dazu ergeben sich aus der 1926 von Erwin Schrödinger formulierten Wellengleichung und insbesondere aus der 1927 von Werner Heisenberg publizierten Unschärferelation. Aus dem Pauliprinzip und der Quantenmechanik folgt die Struktur aller Materie. Bei Atomen betrifft dies die Elektronen, Atomkerne und die elementare Elektromagnetische Wechselwirkung. Bei Molekülen und festen Körpern entsteht die Struktur aus den Atomen und den Wechselwirkungen zwischen ihnen. Diese jedoch sind nicht mehr elementar, sondern folgen aus der Struktur der beteiligten Atome und der Elektromagnetischen Wechselwirkung. Analog ist die Situation bei den Protonen und Neutronen, man spricht von Nukleonen. Sie bestehen aus Quarks und dem zwischen ihnen wirkendem Feld der Starken Wechselwirkung. Die Kräfte zwischen den Nukleonen folgt aus ihrer Struktur und

der Starken Wechselwirkung Die Schwache Wechselwirkung ist zu schwach, um gebundene Systeme zu erzeugen.

Vergleicht man diese quantenmechanisch gebundenen Systeme mit den gravitativ gebundenen, so kann man nach der Rolle der Temperatur fragen. Von ihr ist nicht die Rede, solange man die jeweils tiefstliegenden Zustände diskutiert. Bei ihnen ist die Bewegungsenergie bereits in der Nullpunktsenergie enthalten, und diese folgt unmittelbar aus Heisenbergs Unschärfe-Relation. Die Temperatur kommt erst ins Spiel, wenn man angeregten Zustände betrachtet.

B. Feldquanten

Soviel zu den Teilchen. Das Licht hingegen besteht aus Feldquanten. Sie werden von elektrischen Ladungen erzeugt und absorbiert. Neben den genannten Beispielen kann man an Ausstrahlung und Empfang von Radiowellen mit einer Antenne denken oder an die Emission von Synchrotronstrahlung in Beschleunigern für Elektronen. Die Elektromagnetische Wechselwirkung versteht man als Austausch dieser Feldquanten. Im Gegensatz zu den elementaren Teilchen folgen Feldquanten nicht dem Pauliprinzip, vielmehr ist gerade das Gegenteil der Fall: Feldquanten sind besonders gern im selben quantenmechanischen Zustand. Darauf basiert das Prinzip des Lasers. Der Strahl dieser besonders effektiven Lichtquelle besteht aus extrem vielen Photonen, die im Idealfall alle im selben quantenmechanischen Zustand sind. Der Laserstrahl ist die makroskopische Darstellung eines quantenmechanischen Zustands. Seine Besetzung mit vielen Feldquanten kann man an ihm im Detail studieren.

In analoger Weise werden auch die anderen elementaren Wechselwirkungen durch Feldquanten vermittelt. Die der Schwachen Wechselwirkung wurden in den 80-iger Jahren am LEP-Beschleuniger des CERN entdeckt. Sie ähneln den Photonen der Elektromagnetischen Wechselwirkung. Statt masselos zu sein, sind sie jedoch extrem schwer und zerfallen nach sehr kurzer Zeit. Die Starke Wechselwirkung wird durch Gluonen vermittelt. Diese versteht man auf Grund ihrer Wirkungen, experimentell kann man sie nur indirekt nachweisen. Die Feldquanten der Gravitation werden noch gesucht. Es wurden große Apparaturen aufgebaut in der Erwartung, Schwingungen auf Grund von absorbierten Gravitationsquanten nachzuweisen.

[1] G.Börner,
Schöpfung ohne Schöpfer?
DVA (2006).

[2] S.Weinberg,
Die ersten drei Minuten,
dtv (1980).

[3] H.Lesch und J.Müller,
Kosmologie für Fußgänger,
Goldmann (2001).

[4] V.Mukhanov,
Physical Foundations of Cosmology,

Cambridge Univ. Press (2005).

- [5] G.Hasinger,
Das Schicksal des Universums,
C.H.Beck (2007).
- [6] Webseiten des MPA für Astrophysik
www.mpa-garching.mpg.de
- [7] A.Müller, www.mpe.mpg.de/~amueller
- [8] Physik Journal 5 (2006) Nr.5, 19, 6 (2007) Nr.1, 16 ff,
Nr.3, 30 ff und Nr.4, 20, 7 (2008) Nr.1, 19 ff, 33 ff und 58.
- [9] Spektrum der Wissenschaften
April 2007, 32 , Mai 2007, 34, August 2007, 14 und 48,
Januar 2008, 19 und 34.