

# Kosmologie, einfach

Gerhard Graw

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

Für Sterne haben sich die Menschen schon immer interessiert. Sie geben Orientierung im Weglosen, und wirken als Projektionsfläche für Vorstellungen. Mythisches Denken identifizierte Himmelskörper mit Gottheiten. Kultische Bedeutung hatte die Bestimmung von Terminen im Ablauf der Jahreszeiten. Die frühen griechischen Philosophen sahen in den Gestirnen und in ihrem Bezug zur Welt eine Ordnung, und sprachen von Kosmos. Das Verständnis dieser Ordnung, die Kosmologie, gehörte zu den zentralen Themen. In der Auseinandersetzung mit Fragen dieser Art entwickelte sich ihre Kultur des kritischen und rationalen Denkens, den Paradigmen der Naturwissenschaften heute. Dabei kamen auch physikalisch geprägte Ansätze ins Spiel, Vorstellungen entstanden, die Kopernikus und Galilei weiterführten. Heute ist Kosmologie bestimmt durch die Fortschritte in Astronomie und Physik. Naturwissenschaftlich begründete Aussagen ergeben ein erstaunlich umfassendes Bild von Zusammenhängen. Dieses zu skizzieren ist Thema dieser Schrift.

Der Zugewinn an Erkenntnissen betrifft das Universum in seiner Gesamtheit wie auch in seinen Konstituenten, den Sternen, Galaxien, Galaxienhaufen und von vielem anderen mehr. Die wesentliche Einsicht ist: Das Universum und seine Objekte unterliegen einem fortlaufenden Prozess der Veränderung, Kosmologie beschreibt ein dynamisches Geschehen. Deswegen erscheint die tradierte Unterscheidung von Kosmogonie und Kosmologie, von Entstehen und Beschreibung, heute als weniger sinnvoll. Das Universum hatte einen Anfang, vor ungefähr 13,8 Milliarden Jahren, und die heutige, unermessliche Vielfalt ging hervor aus einfachsten Strukturen. Der Energieinhalt des Kosmos war entstanden nahezu aus dem Nichts, in einer extrem kurzen Zeitspanne. Dies geschah im Wechselspiel mit dem dabei erzeugten Feld der Gravitation, und die Expansion des Raums war Folge davon. Die Kosmologie ordnet dem Anfang Teilchen und Felder gerade so zu, dass aus ihnen alles das, was wir heute beobachteten, als kausal bedingt folgt. Damit gibt Kosmologie Anlass über die Natur dieser Teilchen und Felder nachzudenken, über neue Physik. Letztlich wird es wohl darum gehen, die Physik der Gravitation und der Elementarteilchen in einem einheitlichen Ansatz zu verstehen.

Kosmologie beschreibt die Evolution unserer materiellen Umwelt. Man kann dies in Perspektive setzen zur Biologie und der Evolution des Lebens, und vielleicht auch zu den Geschichtswissenschaften und der Evolution

von Kultur und Wissen. Somit ist Kosmologie Teil wissenschaftlich fundierter Weltanschauung.

Astronomie war eine der sieben freien Künste, geschützt von der Muse Urania. Unter diesem Aspekt der allgemeinen Bildung versuche ich hier, über Kosmologie als Ganzes zu schreiben, aus der Perspektive eines Beobachters. Dazu stelle ich mir vor einen Leser mit Interesse für Physik, der zu Zahlen und Formeln jedoch sorgfältig Abstand halten möchte. So ist der Text gedacht als eine Art Spaziergang durch den Bereich des aktuellen Wissens, der grundlegenden Phänomene und ihrer physikalischen Einordnung. Nicht eingehen werde ich auf aktive Forscher und die damit verbundenen Prioritäten. Entsprechendes gilt für Geräte und die experimentellen Techniken astronomischer Beobachtungen. Dies ist ein eigenes, absolut faszinierendes Gebiet.

Die Entwicklung des Kosmos ist ein physikalisch bestimmtes Geschehen. Dieser Sicht entspricht auch das Forschungsprojekt >Origin and Structure of the Universe<, zu dem sich in München Kollegen der Ludwig-Maximilians-Universität, der Technischen-Universität, der Max-Planck-Institute, und des European-Southern-Observatory verabredet hatten im Rahmen der Exzellenzinitiative der Bundesregierung. Ihre Auszeichnung als >Exzellenzcluster<, bereits in der ersten Begutachtung, wurde gefeiert am 23.1.2007 mit einem Festakt im Deutschen Museum. Astrophysik ist nicht mein Fachgebiet, als experimenteller Kernphysiker hatte ich jedoch Berührungspunkte. Zu Fragen von nuklearen Astrophysikern konnte ich beitragen mit Messungen am Münchener Tandem-Beschleuniger.

Mit den Gesetzen der Physik werden die Lichtquellen am Himmel zu Objekten ganz unterschiedlicher Größe und Natur. Die physikalische Beschreibung vermittelt auch Vorstellungen davon, wie diese Objekte entstanden waren und welche weitere Entwicklung sie nehmen werden. Im folgenden Text werden zunächst die verschiedenen kosmologisch relevanten Objekte vorgestellt. Deren Entstehen 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, welche die beobachteten Zusammenhänge physikalisch begründen.

## I. DIE GESCHICHTE VON ERDE UND SONNE

Die zutreffende Beschreibung der Bewegungen von Sonne, Erde und den Planeten begann mit Kopernikus, und seinem Rückgriff auf Vorstellungen des Aristarch von Samos. Immanuel Kant bewunderte, wie Kopernikus sich löste von der bloßen Beschreibung von Beobachtungen, und statt dessen Vorgänge in Raum und Zeit gedanklich eindeutig fasste. Davon ausgehend wusste Galilei, wie die für uns sichtbare, beleuchtete Oberfläche der Venus sich ändern sollte in ihrem Umlauf um die Sonne, und genau dies beobachtete er mit seinem neuen Fernrohr. Alle unsere Vorstellungen von physikalischer Wirklichkeit sind Modelle aus denen sich Erscheinungen ableiten lassen. Sie gelten als begründet soweit ihre Vorhersagen stimmen und ein Widerspruch zu ihnen nicht beobachtet wurde. Es geht also um Theorien, aus denen sich Wahrnehmungen deduzieren lassen, die durch Beobachtungen verifiziert werden, und die sich allen Anstrengungen einer Falsifikation widersetzen.

Kepler erkannte, wie die beobachteten Bahnen der Planeten als Ellipsen mit der Sonne in einem der Brennpunkte von der idealen Kreisform abweichen. Er beschrieb das zeitliche Verhalten während eines Umlaufs in einfacher mathematischer Form, dabei erscheint das System von Sonne, Erde und Planeten als physikalische Einheit. Damit ist das raum-zeitliche Verhalten des Systems vollständig beschrieben. Wir sprechen heute noch von den Keplerschen Gesetzen. Die physikalische Begründung dieser «Gesetze» gelang erst Newton. Der Schlüssel war die von ihm erdachte Physik von Bewegungsvorgängen und sein Gesetz der Gravitation (1686, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*). Revolutionär war sein Ansatz, dass Gesetze der Physik auch für den Bereich der Gestirne, den Kosmos gelten sollen. Dies ganzheitliche Denken setzte die Bewegung der Planeten in Bezug zum Fall des Apfels vom Baum. Es war der Beginn der Naturwissenschaften im heutigen Sinne.

Inzwischen wissen wir wie vor knapp 5 Milliarden Jahren dies System von Sonne, Erde und Planeten entstanden ist: Ausgangspunkt war das interstellare Gas in der Milchstraße, dessen mittlere Dichte liegt bei einem Wasserstoffatom pro Kubikzentimeter. Sternentstehung bedeutet eine Verdichtung um etwa 25 Größenordnungen. Das interstellare Gas besteht aus primordialem Wasserstoff und Helium, und dazu etwas Gas und Staub aus schwereren chemischen Elementen, letztere in der Größenordnung von insgesamt einem Gewichtsprozent. Diese schwereren chemischen Elementen stammen aus früheren Supernova-Explosionen. Diese Explosionen sind auch Ursache für Bewegungen des interstellaren Gases, sodass bei gegenläufigen Strömungen lokale Verdichtungen entstehen. In diesen wird die Eigengravitation wirksam, die gegenseitige Anziehung im verdichteten Bereich auf Grund der Schwerkraft. Ist in einem Bereich

diese Bewegung auf Grund der Schwerkraft größer als die Bewegungen auf Grund der Strömungen, so nimmt die anfängliche Verdichtung in einem sich selbst verstärkenden Prozess zu. Dieser Prozess wird gedämpft durch den sich dabei aufbauenden Druck des Gases, welcher der Schwerkraft entgegen wirkt.

Die erste Folge von Verdichtung ist die Bildung von molekularem Wasserstoff, da nun das thermodynamische Gleichgewicht nicht mehr von der Entropie, sondern von der Bindungsenergie dominiert wird. Zusammen mit dem 1 Prozent Gewichtsanteil an Staub wird im Bereich des Infraroten Abstrahlung möglich, die Temperatur sinkt auf unter 10 Kelvin. Mit weiter zunehmenden Dichte wird die Absorption der Strahlung durch Staub effektiv. Dies hat zur Folge, dass im Innern die Temperatur mit der Dichte zunimmt, und dass man von Aussen nicht mehr in den Bereich der weiterten Sternbildung einsehen kann, sie ist von Staub-Wolken verborgen. Lokale Störungen bestimmen das Entstehen von gravitativen Feldern. Wirken diese stärker als der thermische Druck, so ziehen sich entsprechende Bereiche unabhängig vom äusseren Geschehen zusammen. War eine Erhöhung der Dichte anfangs von aussen getrieben, erfolgt sie nun in einem sich selbst verstärkenden Prozess, dem erster Schritt zur Sternbildung. Dabei hängt die Masse des sich bildenden Sterns ab von der Temperatur, in einer kalten Umgebung entstehen die leichten Sterne, in einer wärmeren die schweren. Von den leichten Sternen gibt es viele, von den schweren wenige.

Im Zentralbereich werden als Folge steigender Temperatur die Moleküle dissoziiert, und dann die Atome ionisiert. Diese Energie aufnehmenden Prozesse bedeuten Abkühlung, sie unterstützen die rasche Zunahme der Dichte im zentralen Bereich. Im Aussenbereich wird das Einströmen der Materie von der Gravitation getrieben, jedoch ist dies eingeschränkt durch die Erhaltung des Drehimpulses. Das Einströmen treibt den Vorgang, bis nukleare Energieerzeugung ein für lange Zeit wirkendes Gleichgewicht bewirkt.

Bei der Entstehung der Sonne erreichten im zentralen Bereich Dichte und Temperatur bereits nach wenigen zig Millionen Jahren so hohe Werte, dass nukleare Brennprozesse zünden konnten. Bedingung für das Zünden, und damit für das Entstehen eines Sterns, ist eine Masse von mehr als 8 Prozent der Masse der Sonne.

### A. Die Planeten

Die Planeten sind eine Folge der Erhaltung des Drehimpulses in obigem Geschehen. Bei der Bildung der anfänglichen Konzentration aus Gas und Staub hatten sich einige Teilbereiche des Gases, das aus verschiedenen Richtungen einfällt, eher streifend auf das gemeinsame Zentrum hin bewegt. Sie werden von diesem angezogen,

sodass Bahnen einander überschneiden, Ausgleichsprozesse finden statt. Relativ zum Zentrum ist jeder dieser Bahnen ein Drehimpuls zugeordnet. Drehimpuls ist eine Erhaltungsgröße der Physik. Das bedeutet, dass bei der anschließenden Vermengung und Konzentration des Gases unter Abstrahlung von thermischer Energie nur noch der Summenwert der Drehimpulse der einzelnen Teilbereiche relevant wird. Interessant ist nun, wie dieser sich verteilt. Wegen der Abstrahlung von thermischer Energie konzentrieren sich Gas und Staub unter dem Einfluss der Gravitation zunehmend in einer Scheibe, die um die Achse des Drehimpulses rotiert. Man sollte jedoch sehen, dass diese protostellare Scheibe sich ganz wesentlich von der Rotation einer starren Diskusscheibe unterscheidet, da die sonnennahen Bereiche sich wesentlich schneller drehen als die sonnenfernen. Dies ist auch die Aussage des dritten Keplerschen Gesetzes.

Die Physik dieser Scheibe ist durch Gravitation, Drehimpulserhaltung und Reibung, d.h. dissipative Prozesse, bestimmt. Man spricht von Akkretion: Materie wird zum Zentrum transportiert, Drehimpuls nach aussen, dissipierte Energie wird abgestrahlt. Modellmäßig kann man die Wechselwirkung benachbarter Bereiche diskutieren, gravitative Anziehung größerer Objekte, dissipative Prozesse (Reibung) oder turbulente Strömungen. Diese bremsen jeweils die inneren und deshalb schnelleren Bereiche und beschleunigen die langsameren äußeren. Geht man aus von zwei benachbarten Keplerschen Kreisbahnen, so werden aus diesen zwei Keplersche Ellipsen: Bereiche, die Energie verloren haben, bewegen sich auf das Zentrum hin, und solche, die Energie gewonnen haben, bewegen sich vom Zentrum weg nach außen. Dabei wird der Drehimpuls nach außen getragen. Finden Prozesse dieser Art mit großen Impulsüberträgen wiederholt statt, so folgt eine weitgehende Umordnung des Systems. Hat man es mit eher kleinen Impulsüberträgen zu tun, so wirken diese wie Reibung, und die eben beschriebenen elliptischen Bahnen passen sich an die Bewegung ihres neuen Umfelds an. Dabei nähern sie sich wieder Keplerschen Kreisbahnen an, allerdings nun mit größeren Unterschieden im Durchmesser. Die freigesetzte Reibungsenergie zeigt sich in einer Erhöhung der Temperatur, diese entspricht der freigesetzten Gravitationsenergie bei der Trennung der benachbarter Kreisbahnen. Eine vielfache Wiederholung von Prozessen dieser Art erzwingt Bewegungen auf das Zentrum hin, verbunden mit Bewegungen weg vom Zentrum. Die Dynamik des Prozesses, der Materiefluss zum Zentrum hin, zeigt sich in der freigesetzten Wärmeenergie. Astronomen bezeichnen diesen Vorgang als Akkretion. Die Stärke der dissipativen Wechselwirkungen ergibt sich aus der Dynamik des Ablaufs.

Magnetische Felder spielen hier eine wichtige Rolle: Wann immer Medien aneinander streifen, werden Elektronen übertragen. Unterscheiden sich die Medien in ihrer Temperatur oder stofflicher Zusammensetzung, so

ist dabei eine Richtung bevorzugt und es entstehen bewegte, elektrisch geladene Bereiche, und als Folge davon magnetische Felder. Bei entsprechend hoher Temperatur sind die Medien elektrisch leitend, Induktion verstärkt die elektrischen Ströme und magnetischen Felder. Dies folgt dem Prinzip des Dynamos, die Energie von Bewegungen wird gewandelt in die Energie magnetischer Felder. Induktionsvorgänge bestimmen das Geschehen.

Dabei ist wichtig, dass wegen der zumeist sehr geringen Dichte die elektrischen Widerstände extrem niedrig sind und deswegen die magnetischen Felder entsprechend lang bestehen bleiben, fast wie bei einem Supraleiter. Es liegt in der Natur des Induktionsgesetzes, dass Magnetfelder und die sie erzeugenden elektrischen Ströme an das Medium gebunden sind und dessen Bewegungen folgen. Beim Akkretionsprozess wirken Magnetfelder auf die elektrischen Ströme benachbarter Bereiche und erzeugen dabei starke Kräfte, die wie Reibungskräfte erscheinen. In der frühen Entwicklungsphase eines Sterns ist die Lichtemission auf Grund der freigesetzten Energie im Akkretionsprozess stärker als die auf Grund eines bereits beginnenden nuklearen Brennens. Dies bedeutet, dass man einer im Zentrum hell strahlenden zirkumstellaren Scheibe nicht ansieht, ob sich dahinter bereits ein Stern verbirgt oder ein zukünftiger Brauner Zwerg. Braune Zwerge haben Massen von weniger als 8 Prozent der Sonne, zum nuklearen Brennen ist dies nicht genug. Sie strahlen mit abnehmender Temperatur ihren anfänglichen Energievorrat ab, deswegen der Name. Erst in jüngster Zeit sind sie in größerer Zahl nachgewiesen worden. Generell gilt, dass leichte Sterne häufiger sind als schwere. Wie sich dies in den Massenbereich der Braunen Zwerge hin fortsetzt, ist eine der spannenden Fragen.

Aus der zirkumstellaren Scheibe der Sonne nahm im Zentrum der Vorläufer der Sonne durch Akkretion weitere Materie auf, und außen differenzierten sich die Vorläufer der Planeten. Die Planetenbildung erforderte niedrige Temperaturen, sodass der Anteil von Staub und Eis zur Wirkung kommt: Durch Kräfte der Adhäsion klumpt diese relativ schnell zu Objekten von einigen Zentimeter Durchmesser. Der Übergang zu größeren Objekten von bis zu einem Kilometer, man spricht von Planetesimalen, ist noch nicht verstanden. Aus diesen bildeten sich unter dem Einfluss der Gravitation größere Einheiten bis hin zu den Vorläufern der Planeten, oder es verblieb bei kleineren Objekten, die sich in Ringen ordneten, ähnlich denen des Saturn. Neben den von Adhäsion ausgehenden Vorstellungen ist der gravitative Kollaps von Teilbereichen nicht auszuschließen, sodass dort die Situation lokal der bei der Sternbildung ähnlich wäre.

Das Entstehen von Planeten ist ursächlich verbunden mit der Existenz von Staub. Dies bedeutet auch, dass diejenigen chemischen Elemente, die bereits bei hohen Temperaturen kondensieren, weniger gut das Zentrum, die Sonne, erreicht hatten. Sie wurden durch die Bildung

von Planeten abgefangen. Dies zeigt der Vergleich mit Sternen, die der Sonne ähnlich sind, jedoch keine Planeten haben. Bei diesen finden wir diese Elemente etwa 20 Prozent häufiger als bei der Sonne.

In einigen Bereichen jenseits des Mars war die Bildung stabiler Planeten unterblieben. Vielmehr ordneten sich dort kleinere Objekte so, dass sie sich in ihrer Bewegung auf Keplerbahnen gegenseitig nur wenig störten, sie bildeten Gürtel. Zwischen Mars und Jupiter gibt es den sogenannten Hauptgürtel. Dessen Objekte, Asteroiden oder Planetoiden genannt, haben ganz unterschiedliche Größen. Mit Durchmessern von mehr als einem Kilometer gibt es Millionen davon, einzelne Objekte erreichen Durchmesser von fast tausend Kilometern. Ihr Anteil an Eis ist zum Teil abgeschmolzen, entsprechend ihrem Abstand zur Sonne.

Jenseits von Neptun folgt der Kuipergürtel. Von den Staub-Eis Objekten dort haben knapp Hunderttausend einen Durchmesser größer als Hundert Kilometer. Werden solche Objekte durch Stöße fragmentiert oder aus ihrer Bahn geworfen, und erreichen sie infolgedessen, auf einer stark exzentrischen Bahn, den Bereich nahe der Sonne, so bezeichnet man sie als Kometen. Hülle und Schweif entstehen durch Verdampfen des Eises im Sonnenlicht. Sie werden sichtbar durch den dabei mit freigesetzten Staub, der das Licht reflektiert. Mit jedem Lauf um die Sonne verlieren Kometen an Masse, entsprechend ändern sie ihre Bahn und ihre Oberfläche. Einschläge von Kometen auf die Erde hatten katastrophale Folgen. Im Jahrestakt durchquert die Erde den Bereich eines Kometenschweifs, dann bewirkt der Staub im Schweif in der Erdatmosphäre lokale Erhitzungen, die wir als Sternschnuppen bewundern.

Das heute relativ geordnet erscheinende System von Planeten und Gürteln entstand durch die wiederholte Wechselwirkungen einzelner Bereiche der anfänglichen Gas-Staub Wolke. Bewegungsenergie wurde gewandelt in Wärme und dann abgestrahlt. Als Ergebnis beobachten wir Keplerbahnen mit einheitlichem Drehsinn in einer Ebene, der Ekliptik. Für die anfänglichen Bereiche weiter außen jedoch war die Durchmischung wesentlich schwächer. Deswegen zeigt dieser äussere Bereich, bis zu einem Abstand von etwa einem Lichtjahr, nur Objekte in einer sphärischen Verteilung. Deren Größe entspricht der von Planetoiden. Man spricht von der Oortschen Wolke. Aus dieser stammen diejenigen Kometen, die nur alle paar Tausend Jahre das Innere des Sonnensystem erreichen und so beobachtbar werden. Die Oortsche Wolke unterliegt zwar noch der Anziehung durch die Sonne, jedoch ist der Einfluss benachbarter Sterne deutlich.

Die Strahlungswärme der Sonne und der solare Wind - das ist der eruptive Ausstoß heißer Materie aus der Sonne - haben längst alle Reste der anfänglichen Gas-

Staubwolke in den interstellaren Raum verweht. Heute hindert der solare Wind das interstellare Gas daran, in den planetaren Bereich einzudringen, sodass ein Bereich mit einem Radius von etwa hundert Erd-Sonne-Abständen vergleichsweise frei ist von interstellarem Gas. Die Grenze (der >termination shock<) wurde im Jahre 2005 erstmals von der Raumsonde Voyager passiert. Diese Grenze erweist sich als ausgedehnter Bereich, der 2013 im Abstand von 121 Astronomischen Einheiten verlassen wurde. Die Messung zeigt ein im Vergleich zur Heliosphäre achtzigfach dichteres interstellare Plasma, das 5000 K wesentlich kälter ist die Heliosphäre. Voyager registrierte einen koronalen Massenauswurf der Sonne, der 13 Monate vorher stattgefunden hatte. Nimmt man Wasserstoffionen an, so war deren mittlere kinetische Energie 2 keV.

Entscheidend für das Entstehen unseres Planetensystems war die Ausbildung einer Scheibe von Gas und Staub. Eine vergleichbare Situation kann man am Südhimmel im Sternbild Beta Pictoris in nur 63 Lichtjahren Entfernung beobachten. In diesem Bereich aktiver Sternentstehung zeigt sich Akkretion in unterschiedlichen Stadien. Trifft viel ionisiertes Material auf das Zentrum, so entstehen Jets. In diesen wird auf Grund magnetischer Wechselwirkungen ein Teil der Materie längs der Achse des Gesamtdrehimpulses wieder abgestoßen. Die Jets tragen beachtliche kinetische Energie. Diese stammt aus der freigesetzten Gravitationsenergie des insgesamt vom Zentrum angezogenen Materials. Durch magnetische Wechselwirkung wird sie auf einen Teilbereich des Materials übertragen, welches den Jet bildet. Somit stellt die Bildung von Jets eine Alternative dar zur thermischen Abstrahlung.

Für die Sternentstehung aus einem System mit beträchtlichem Gesamtdrehimpuls erzwingt Drehimpulserhaltung die Bildung von mehr als einem Objekt: Denkt man sich als Ausgangspunkt eine Akkretionsscheibe, so ist in dieser mit der beginnenden Bildung von Planeten die Symmetrie des Gravitationsfelds gebrochen, die von den Planeten erzeugten zusätzlichen Gravitationsfelder beeinflussen die Bahnen und deren sich schliesslich einstellende Ordnung. Planeten und sonstige Objekte erfahren das Gravitationsfeld als sich periodisch ändernd. Geschieht dies im Takt mit dem Umlauf, so treten Resonanzeffekte auf, und die Bahn wird instabil. Infolge dessen kann er anderen Planeten nahe kommen, und die daraus resultierenden Ablenkungen können bewirken, dass einer in entfernte Bereiche entschwindet und der andere von Sonne verschluckt wird. Effekte dieser Art haben die aktuelle Ordnung der Planeten bestimmt. Die Bildung von Planeten und Doppelsternsystemen, und die Frage, ob letztere Planeten haben, sind Fragen der aktuellen Forschung.

Das Studium der planetaren Begleiter von Sternen wird jetzt zu einem der ganz großen Forschungsziele. So hat

man für einem Stern bereits sechs zugehörige Planeten identifiziert. Dazu können folgende Effekte genutzt werden: Da Stern und Planeten sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen, ändern sich die Position und vor allem die Geschwindigkeit des Sterns periodisch; bei geeigneter Bahn wird der Planet das Licht des Stern periodisch wiederkehrend kurzzeitig abschaten; das sphärische Gravitationsfeld eines Sterns wird vom Planet periodisch geändert, und somit dessen Eigenschaft als Gravitationslinse. Es liegt in der Natur dieser Methoden, dass schwere und sternnahe Planeten leichter aufzuspüren sind. So umkreist unseren nächsten Nachbarstern Alpha Centauri B ein gut erdschwerer Planet in etwas mehr als 3 Tagen. Für das System Planet-Stern definiert man eine sogenannte habitable Zone, und inzwischen gelingt es auch in dieser Planeten zu finden. Aus 4 Jahren Beobachtungen mit Herschel zeichnet sich ab, dass sehr viele Sterne planetare Begleiter haben. Letztendlich geht es bei der Exoplaneten-Forschung darum, ob Leben, in welcher Form auch immer, ausserhalb der Erde existieren kann. Dies ist ein Thema, das im 17. Jhd. aktuell war, und mit dem sich noch der junge Kant befasste, bis er schließlich realisierte, dass man mit Geistesschärfe allein hierzu nichts aussagen kann. Denkt man sich Leben als basierend auf der Photosynthese, so versucht man Ozon als Biomarker nachzuweisen.

### B. Erde und Mond

Der Mond entstand, als die Erde noch keine 100 Millionen Jahre alt war, durch den Aufprall eines planetenartigen Körpers. Der Stoß war streifend und die Drehachse der Erde wurde dabei kräftig verrückt. Deswegen haben wir statt ewigen Frühlings die wechselnden Jahreszeiten. Aus dem explosionsartig verstreuten Material der Erde formte sich 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 nur wenig von dem des Mondes. Aktuelle Abschätzungen sagen, dass der Mond zu etwa gleichen Teilen aus dem Material des Planeten und der Erde stammt.

Die junge Erde hatte wegen der anfänglich sehr hohen Temperaturen alle leicht flüchtigen Stoffe verloren. Was wir heute davon auf der Erde finden, Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Wasser, wurde erst später freigesetzt. Dabei ist offen, was mineralischen Ursprungs ist und was von Kometen stammen könnte. Als die jetzige Ordnung des Systems von Planeten und Planetesimalen noch weniger regulär war, stand die Erde unter einem massivem Bombardement von Kometen, die genügend viel vereistes Wasser enthielten, um damit die Ozeane zu füllen. Diese Phase sollte vor etwa 3,8 Milliarden Jahren geendet haben.

Die dargelegte Geschichte der Entstehung impliziert, dass

alle Materie der Erde bereits vor der Bildung des Sonnensystems vorhanden war. Wegen des Verlusts der flüchtigen Stoffe in der Frühzeit ist der Anteil leichter 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.

### C. Energietransport in der Sonne

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 Energieerzeugung nimmt mit dem Abstand vom Zentrum ab. Etwa 90 Prozent der Energie wird in den inneren 20 Prozent des Sonnendurchmessers erzeugt, in diesem befindet sich 40 Prozent der Masse, (und 60 Prozent der Energie innerhalb der innersten 10 Prozent der Masse). Die Temperatur der Sonne fällt zur Oberfläche hin ab. Von dieser aus strahlt sie bei einer Temperatur von 5800 Grad Kelvin. 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 Zahlen von bis zu Millionen Jahre genannt. Im inneren Bereich erfolgt sie allein durch Strahlung im heißen Medium. Aufgrund vielfacher Streuung ist dies der zeitbestimmende, langsame Prozess. Im Bereich der letzten 20 Prozent des Weges zur Oberfläche hin wird die Konvektion entscheidend. Die Konvektion beginnt bei 2 Millionen Grad. Nun ist der Transport von Wärme verbunden mit dem Transport von Materie, diese steigt in sich lokal bildenden Kreisläufen auf und ab. An der Oberfläche erscheinen die Strömungszellen sehr eng, sie ändern sich fortlaufend, wir sehen wabenartige Muster: In den Zentren der Waben die heisse, aufsteigende Materie, und an deren Rändern die abgekühlte, zurückfließende.

Die Sonne rotiert im gleichen Sinn wie die Planeten. Am Äquator sehen wir eine Umlaufperiode von etwa 25 Tagen, nahe der Pole jedoch von 36 Tagen. Seismische Untersuchungen zeigen, dass der innere Strahlungsbereich mit einer Periode von 27 Tagen gleichförmig rotiert. Der Übergang zu der differentiellen Rotation erfolgt im innersten Bereich der Konvektionzone, der sogenannten Tachocline. Differentielle Rotation beobachtet man auch an Gasplaneten wie Jupiter und Saturn. Sie hat zur Folge, dass der Drehimpuls verstärkt von den achsenfernen Bereichen getragen wird. Als Ursache gilt die thermische Bewegung von freien Teilchen. Je nach Bewegungsrichtung ist deren Drehimpuls unterschiedlich, und

damit auch die Zentrifugalkraft. Daraus folgt die radiale Trennung freier Teilchen nach ihren Drehimpulsen.

Der Bereich der Tachocline gilt als Quelle eines dipolaren Magnetfelds. Dies Feld der Sonne hat an der Oberfläche eine Stärke vergleichbar dem Erdfeld, wechselt jedoch alle 11 Jahre seine Richtung. Um bis zu 4 Größenordnungen stärker sind lokale Magnetfelder, die wir in den Bereichen der dunklen Sonnenflecken beobachten.

Sonnenflecken bilden sich in Zeiten verstärkter Strahlungsintensität der Sonne, auf Grund einer dann entsprechend wirkungsvolleren Konvektion. Die Häufigkeit ihres Auftretens ist verbunden mit dem Wechsel der Polarität des solaren magnetischen Dipolfelds, dementsprechend zeigt sie alle 11 Jahre ein Maximum. Synchron ändert sich die auf der Erde gemessene gemittelte Strahlungsintensität der Sonne, mit einer Amplitude von einem halben Promille.

Sonnenflecken entstehen auf Grund der differentiellen Rotation. So werden die in Richtung der Rotationsachse erzeugten Feldlinien in äquatorialer Richtung verzerrt, "aufgewickelt". Bei der Bewegung des Felds im elektrisch gut leitenden Medium ist der magnetische Fluss in relativ engen Schläuchen konzentriert. Im weiteren Verlauf werden Teilbereiche dieser Schläuche an die Oberfläche gedrückt, bis sie aus dieser in einer Schleife heraustreten. Die Stärke ihres magnetischen Feldes behindern die Konvektion, sodass ihre entsprechenden Ein- und Austrittsbereiche an der Oberfläche um etwa Tausend Grad kälter sind. Dies sehen wir als Sonnenflecken. Die Orte, an denen Sonnenflecken auftreten, sind zufallsbedingt, jedoch sind die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens und ihre Entwicklung verknüpft mit dem Zyklus der Sonne. Sie zeigen nördlich und südlich des Äquators charakteristische Unterschiede. Sonnenflecken können rasch verschwinden, aber auch über Monate anwachsen zu Bereichen viel größer als ein Erddurchmesser.

Mit den konvektiven Strömungen des heißen, ionisierten Materials, und insbesondere mit der differentiellen Rotation, sind lokale Magnetfelder verbunden, die von diesen bewegt werden. Interessant wird es, wenn unabhängig voneinander entstandene Magnetfelder an der Oberfläche zusammenkommen. Falls sie Orientierungen haben, die energetisch ungünstig sind, müssen die Strömungen dazu Kräfte ausüben. Darauf reagieren die Magnetfelder, und die mit ihnen verbundenen elektrischen Ströme, indem sie energetisch günstigere Ordnungen einnehmen. Dies erfolgt spontan, so wie ein senkrecht stehender Bleistift spontan aus dem labilen in das stabile Gleichgewicht kippt: Werden entgegengesetzt orientierte Magnetfelder zur Berührung gezwungen, so schliessen sie sich kurz. Dabei schließt sich ein magnetischer Fluss ausserhalb der Oberfläche zu einem Ring, der mitsamt seinem Plasma von der Oberfläche abgestoßen wird. Man spricht von magnetischer Neuverbindung (Rekonnexion). Die Rekonne-

xionen können in benachbarten Bereichen die Schwellen zur Annäherung solcher Felder absenken, sodass Umordnungen große Bereiche erfassen und insgesamt erhebliche Energien freisetzen. Vorgänge dieser Art gelten als Ursache für die Eruptionen (Flares) und Protuberanzen, die wir auf der Sonnenoberfläche sehen, und für den solaren Wind, den Ausstoß ionisierter Atmosphäre. Induktionsvorgänge in den Flares beschleunigen Elektronen auf hohe Energien. Wir sehen deren Strahlung auch im Röntgenbereich. Starke eruptive Ausbrüche solaren Winds beeinflussen die Atmosphäre der Erde, ohne Schutz durch das Erdmagnetfeld wäre ihre Strahlung tödlich. Der solare Wind wird von Satelliten analysiert, daher kennen wir die Atmosphäre der Sonne auch bezüglich der Isotope. Das Plasma des solaren Winds treibt das interplanetare Gas hinaus, bis sich am "termination shock" ein Gleichgewicht einstellt.

#### D. Nukleares Brennen

Das nukleare Brennen in der Sonne wandelt Atome des Wasserstoffs in Helium. Dies geschieht in einem mehrstufigem Prozess von Kernreaktionen. Die Bindung im Atomkern des Heliums ist stark: Die Masse der 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 dieser nuklearen Reaktionen, der Heliumkern, besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen. Diese im Kern gebundenen Neutronen sind 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 ohne dessen elektrische Ladung und mit einer Masse, die sehr viel kleiner ist. 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 beträchtlich 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 diese kann Eigenschaften eines Teilchens auf ein anderes übertragen. Die Anzahl der Teilchen bleibt erhalten, es ändert sich nur die Zuordnung von Eigenschaften. Diese Schwache Wechselwirkung hat eine extrem kurze Reichweite. Dementsprechend sind bei niederen Energien Reaktionen auf Grund dieser Wechselwirkung sehr selten, darum auch die Bezeichnung Schwach. Neutrinos unterliegen neben der Gravitation nur der Schwachen Wechselwirkung, deshalb durchdringen sie größte Materieschich-

ten. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit für den Stoß eines Neutrinos mit Materie, einem gebundenem Elektron etwa, extrem gering. So sind riesige Detektoranlagen gebaut worden, um in jahrelangem Betrieb zumindest eine kleine Zahl solcher Stoßprozesse nachzuweisen, obwohl die Zahl der Neutrinos, die den Detektor passieren, riesig ist. Durch Messungen dieser Art sind unsere Vorstellungen von den Vorgängen im innersten Kern der Sonne im Detail bestätigt worden. Ein Pionier dieser Physik war Raymond Davis Jr. (Nobelpreis 2002). Die in Detektoren nachgewiesenen Neutrinos waren jeweils erst 8 Minuten zuvor in der Sonne entstanden. Die erzeugte Wärme hingegen brauchte hunderttausende von Jahren 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.

### E. Fraunhofers Linien

Die Zusammensetzung der ursprünglichen Gas-Staubwolke zeigt uns die äußere Atmosphäre der Sonne. Diese ist vom nuklearen Brennprozess im Innern nicht beeinflusst. Die erste Beobachtung gelang 1813 Joseph Fraunhofer in Benediktbeuern. Er analysierte mit einem Prisma und einer Anordnung von besonders guten Linsen das Licht der Sonne. Dabei sah er nicht nur das Spektrum des Regenbogens, sondern darin sehr enge Bereiche, sogenannte Linien, die weniger hell sind. Licht mit dem Spektrum des Regenbogens wird von jedem genügend heißen Körper erzeugt. In diesem sieht man Linien von der beobachteten Art falls sich zwischen Lichtquelle und Beobachter freie Atome oder Moleküle befinden. Sie absorbieren das Licht bestimmter Wellenlängen, die für die Substanz charakteristisch sind. Chemiker nutzen diese Eigenschaft zur Identifikation von Stoffen. Mittlerweile versteht man es, aus Fraunhofers Linien im Sonnenlicht quantitative Information über die Zusammensetzung der äußeren Sonnenatmosphäre zu ermitteln. In diese Analyse gehen natürlich Kenntnisse ein über die Dynamik der Sonne. Die Hülle der Sonne besteht, nach Gewichtsanteilen, zu 75 Prozent aus Wasserstoff und zu 24 Prozent aus Helium. Alle weiteren Elemente machen nur etwas mehr als 1 Prozent aus. Dieses eine Prozent stammt aus dem im Gas der Sonne 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 durch Supernova-Produkte angereichert war.

## II. DIE MILCHSTRASSE, GALAXIEN

Unsere Sonne ist ein Stern unter anderen Sternen. Es gibt Sterne mit größerer Masse, bei denen sind Dichte und Temperatur im Innern größer. 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 der sonnenähnlichen Doppelsterne Alpha Centauri A und B. Dabei erscheint A als vierthellster Stern, kann man A und B nicht trennen, so bilden sie den dritthellsten "Stern". Mit unbewaffnetem Auge sieht man am nächtlichen Himmel 3000 bis 6000 Sterne und als bandförmige Aufhellung die Milchstraße. Mit dem Fernrohr beobachteten 1609 Galileo Galilei und andere erstmals, dass sich die Milchstraße in eine Vielzahl einzelner Sterne auflöst. Bekannt ist in der Alten Pinakothek das Bild von Adam Elsheimer, das er noch im gleichen Jahr in Rom malte: Er stellt, in künstlerischer Freiheit, die Milchstraße dar als Häufung von Einzelsternen. Auf Grund von Sternzählungen erkannte Wilhelm Herschel 1785 die Scheibenform der Galaxis. 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 galaktische Scheibe hat einen Durchmesser von 100.000 Lichtjahren. Im Zentrum ist sie ausgebaucht, diesen Bereich bezeichnet man als Bulge. In der Milchstraße hat der Bulge Erdnussform, er geht in eine Balkenstruktur über, dies ist eine eher spezielle Eigenschaft unserer Galaxie. Die Dichte der Sterne in der Scheibe nimmt mit dem Abstand vom Zentrum stark ab, auch ist die Scheibe weiter außen mit einer Dicke von 3.000 Lichtjahren wesentlich flacher. Die Scheibe rotiert mit einer Geschwindigkeit von etwas über 200 km/sec um das galaktische Zentrum. Relativ dazu ist die Bewegungen von Sternen oder von Teilbereichen um eine Größenordnung kleiner.

Unsere Galaxis besteht aus etwa 200 Milliarden Sternen

(diese Zahl entspricht in etwa der Anzahl von Neuronen, mit denen wir denken) und aus interstellarem Gas und Staub. In der Scheibe finden wir Sterne jeglichen Alters, im zentralen Bereich hingegen sind fast alle Sterne sehr alt, auch gibt es dort kaum Gas, sodass Sternentstehung nur noch in den mehr äusseren Bereichen erfolgt, insbesondere in den Spiralarmen der Scheibe. In der Galaxis übertrifft die Masse der Sterne die des noch vorhandenen interstellaren Gases um einen Faktor 5 bis 10.

Analysiert man nur die Leuchtkraft, so zeigt diese in einem Abstand vom Zentrum die Form von Spiralarmen. Diese auffällige Verteilung der Leuchtkraft beruht auf dem Beitrag weniger, schnell brennender und deshalb stärker leuchtender Sterne. Die 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.

Zur Galaxis gehört ein sie umgebender, kugelförmiger Außenbereich von etwa 160.000 Lichtjahren Durchmesser, der so genannte Halo. In diesem gibt es alte Sterne und Gas sehr geringer Dichte. Innerhalb dieser Sphäre kennt man etwa 200 Kugelsternhaufen. Dies sind gravitativ gebundene Ansammlungen von typisch jeweils einer Million Sternen. Diese sind vergleichbar alt wie die alten Sterne im Bulge. Die hohe und relativ einheitliche Anzahl von Sternen in den Kugelsternhaufen erklärt man so, dass in sehr früher Zeit der Vorläufer der Galaxis mit anderen Systemen kollidierte, sodass eine Starburst-Situation entstand. Dabei erlebten von den Kugelsternhaufen nur die großen. Diese Kugelsternhaufen laufen auf gestreckten elliptischen Bahnen um das galaktische Zentrum, ohne dabei einer einheitlichen Richtung zu folgen. Anders als die galaktische Scheibe ist der Halo weitgehend frei von Staub.

Im Übergang von der Scheibe zum Halo gibt es noch den Bereich der sogenannten dicken Scheibe, die sich von der bisher besprochenen dünnen Scheibe unterscheidet. Sie besteht aus vorwiegend alten Sternen auf exzentrischen Bahnen, deshalb erscheint ihre Rotationsgeschwindigkeit um das Zentrum als etwas langsamer. Die Spiralgalaxie ist vergleichbar einer frühen planetarischen Scheibe, als Folge von Wechselwirkungen migrieren die Sterne, der Radius ihrer Kreisbewegungen ändert sich mit der Zeit. Dabei entweichen auch Sterne aus der dünnen in die dicke Scheibe.

Zentriert um die Achse der Milchstrasse hat man auf beiden Seiten der Scheibe jeweils einen ausgedehnten Bereich (Blase) von etwa 25 Tausend Lichtjahren Durchmesser entdeckt. Dieser bestehen aus Fronten einer Vielzahl von Supernovae Explosionen, die im Zentralbereich stattgefunden hatten, und in denen sich Plasma mit entsprechender Geschwindigkeit vom Zentrum weg bewegt. Die Verteilung des heissen Mediums zeigt sich

in der Radio- und Mikrowellenstrahlung. Die Fronten induzieren hochenergetische kosmische Strahlung (s.u.), die von Gammastrahlung begleitet ist, mit Energien bis in den GeV Bereich hinein. Diese ermöglicht die Lokalisation dieser Quelle kosmischer Strahlung.

Das interstellare Medium unserer Galaxie ähnelt in seiner chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre der Sonne. In der räumlichen Verteilung von Dichte, Temperatur und Bewegung ist strukturiert. Die Verteilung entspricht einem dynamischen Geschehen, bestimmt durch Energie freisetzende Prozesse. Dabei sind die schweren und deshalb kurzlebigen, Sterne mit mehr als 8 Sonnenmassen von besonderer Bedeutung. Deren Strahlung, planetarische Nebel und die abschliessende Supernovaexplosion sind zeitlich integriert energetisch vergleichbar, und bestimmen die kurzen Zeitskalen. Im interstellaren Medium gibt es heisse, warme, kalte und sehr kalte Bereiche, mit Temperaturen von 1 Million Kelvin, Zehn- bis Fünftausend Kelvin, 300 Kelvin, und unter 30 Kelvin. Verbunden mit der Temperatur sehen wir den bergang vom Plasma zu atomarem Gas, Staub und molekularem Gas, und einen rapiden Anstieg der Dichte. In der ionisierten heissen Phase (H II) kommt ein Atom auf tausend ccm, und in der warmen Phase bei 1 Atom auf zehn ccm. In der kalten Phase 10 Atome auf ein ccm, und in der molekularen bei mehr als tausend. Die unterschiedlichen Dichten ergeben sich durch Prozesse des Auseinandertreibens, denen solche der Verdichtung gegenüberstehen.

Die ionisierte heisse bzw. warme Phase erfüllt 50 bzw. 15 Prozent des Volumens, die neutrale warme bzw. kalte Phase 30 bzw. 4 Prozent, und die molekulare 1 Prozent. Die Durchmesser der molekularen Wolken liegt zwischen wenigen Lichtjahren und eingen hundert, sie haben die die Masse von mehr als Tausend bis zu einer Million Sonnen.

Supernovae und Strahlungsdruck ionisieren die Materie und treiben sie weg, unter Bildung einer Stofront. Dabei werden die mit ihr verbundenen magnetischen Felder wirksam. Treffen gegenläufige Bewegungen aufeinander, ergeben sich hohe Dichten. Die Kühlung erfolgt durch Stöße, Bewegungsenergie wird übertragen in Anregungsenergie von Atomen oder Molekülen, diese wird nachfolgend durch Emission von Strahlung abgegeben. Dabei werden die Elemente jenseits schwerer als Wasserstoff und Helium wichtig. In den Molekularen Wolken messen wir die tiefen Temperaturen über die Rotationsbande der polaren CO Moleküle. Die H II Gebiete identifiziert man über zweifach ionisierten Sauerstoffatome, die auf Grund der hohen Temperatur entstehen. Bei entsprechend niedriger Dichte werden verbotene optische bergänge aus metastabilen Zuständen sichtbar, wie der bei 500,7 nm.

Die molekularen Wolken sind wegen der hohen Dichte an

Staub optisch undurchsichtig, Das nächste dieser Sternentstehungsgebiete liegt im Orion-Nebel, 1500 Lichtjahre entfernt. Diese Wolken sind durchzogen von Strömungen, mit Geschwindigkeiten von typisch 10 km/sec, die einem turbulenten Prozess entsprechen, und dabei fraktale Muster zeigen. Die Turbulenz, und die Einstrahlung von Aussen behindern die Entwicklung nachhaltiger Selbstgravitation und somit die Sternbildung. Im Mittel geht aus 100 Sonnenmassen an kaltem Gas nur ein Stern hervor.

## 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 Brücke aus Wasserstoffgas, den 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 wird 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. Aus den Bewegungen folgen die Massen (incl. der Dunklen Materie). Aktuelle Abschätzungen geben 800 Milliarden Sonnenmassen für unsere Milchstraße und 1,5 Billionen Sonnenmassen für die Andromeda-Galaxie M31, die Fehler liegen bei etwa 400 Milliarden Sonnenmassen.

Der Dreiecksnebel 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 eine expandierende, 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 begann mit etwa 17 Sonnenmassen und brannte entsprechend intensiv, sodass er nur 20 Millionen Jahre alt wurde. Verglichen mit der Sonne verfeuerte er seinen wesentlich größeren Energievorrat 500 mal schneller. Als im Innern dieses Sterns die Erzeugung von Energie durch nukleare Prozesse beendet war, brach dieser zentrale Bereich unter dem Druck der Gravitation zusammen. Die dabei freigesetzte Energie bewirkte das Absprengen der äusseren Bereiche, wie in einer Explosion. Dies war verbunden mit einer Kette von nuklearen Prozessen, in denen die Bildung der chemischen Elemente ihren Abschluss fand. Das sichtbare Licht zeigt nur die Oberfläche des Systems, dementsprechend war das Aufleuchten zeitlich verzögert. Vom Geschehen im Sterninneren berichteten die 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. Die Entwicklung von Sternen

Die Entwicklung dieses Sterns begann mit dem Verbrennen von Wasserstoff zu Helium, wie bei der Sonne. Wegen der größeren Masse war die Temperatur im Zentrum jedoch deutlich höher, sodass Reaktionen

von Wasserstoff mit bereits vorhandenem Kohlenstoff dominierten. Die Reaktionskette besteht aus vier Einfangreaktionen von Wasserstoff und zweimaligem radioaktivem Betazerfall, danach zerfällt das Reaktionsprodukt in Helium und Kohlenstoff. In diesem 1937 von Bethe und Weizsäcker beschriebenen CNO Zyklus wirkt Kohlenstoff wie ein Katalysator. Entsprechend schneller erfolgt der Prozess. Der CNO Zyklus ist in allen Sternen wichtig, deren Masse die der Sonne um nur wenige 10 Prozent übertrifft. Ist der Wasserstoff im zentralen Bereich verbrannt, fehlt der dem gravitativen Druck standhaltende Energienachschub. Die äußeren Schichten des Sterns drücken den inneren Bereich weiter zusammen. Entsprechend steigen dort Temperatur, Dichte und Druck, bis Helium zu Kohlenstoff verbrennt, und in der benachbarten nächst äußeren Schicht Wasserstoff zu Helium. Heliumbrennen jedoch hat bei weitem nicht die Heizkraft des Wasserstoffbrennens, deshalb geht das Zusammenpressen des Kerns rasch weiter. Auf das Heliumbrennen folgt das noch ineffektivere Kohlenstoffbrennen, und entsprechend verlagert 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 dieser inneren Schalen gewaltig schrumpften. Dabei wurden die äußersten Schalen sehr heiss, sodass sie sich aufblähen und das Gravitationsfeld als sogenannte planetarische Nebel verlassen.

Den aktuellen Entwicklungsstand eines Sterns entnimmt man dem Hertzsprung-Russell Diagramm. In diesem ist die Leuchtstärke, das ist die tatsächlich abgestrahlte Leistung, dargestellt als Funktion der Temperatur der Oberfläche. Alle jüngeren Sterne liegen auf der Hauptreihe, aus ihrer Temperatur lässt sich die Masse zuordnen. Ältere Sterne, die ihre Hülle aufblähen, werden als Riesen bezeichnet. Wegen ihrer vergrößerten Oberfläche sehen wir deren Strahlung bei signifikant geringeren Temperaturen, obwohl sie die Leuchtstärke behalten oder steigern. Der genaue Verlauf dieser Seitenzweige, in welche die Hauptreihe auffächert, hängt ab von der Masse eines Sterns. Aus der Position im Bereich der Seitenzweige wird dem Stern Alter und Masse zugeordnet. Ein Beispiel ist der zehnt-hellste Stern, Beteigeuze, der linke Schulterstern des Orion, 600 Lichtjahre von uns entfernt. Dieser Rote Überriese mit einer Oberflächentemperatur von 3450 K übertrifft im Durchmesser den der Bahn der Erde um die Sonne um das 3-fache, und die Leuchtkraft im sichtbaren Bereich um mehr als das 10.000-fache. Mit der 20-fachen Masse der Sonne ist er Kandidat für eine Supernova. Glücklicherweise zeigt die Rotationsachse nicht in Richtung Erde, sodass der Gammablitz unsere Biosphäre nicht gefährden sollte.

Interessant sind Cepheiden, helle Sterne, die periodisch ihre Leuchtkraft ändern. Als Rote Riesen mit einer Masse von vier bis zehn Sonnenmassen liegen sie im

Instabilitätsbereich des Hertzsprung-Russell-Diagramm, wegen einer Perioden-Leuchtkraft-Beziehung dienen sie als Standardkerzen.

Bei Kugelsternhaufen des Halos kann man von einer Sternpopulation gleichen Alters ausgehen. Dann erlaubt die beobachtete Verteilung im Hertzsprung-Russell Diagramm die Bestimmung des Alters dieser Population. Auf diese Weise wurde für Kugelsternhaufen ein typisches Alter von 12,7 Milliarden Jahren abgeschätzt.

Kugelsternhaufen im Halo sind isolierte und damit beständige, wohldefinierte Objekte, zusammengehalten durch ihre wechselseitige Gravitation. Im Innern von Galaxien gibt es eine wesentlich größere Anzahl von gravitativ gebundenen lokalen Konzentrationen von Sternen, vergleichbar den Kugelsternhaufen. Diese wechselwirken jedoch mit Ihrer Umgebung und sind deshalb zeitlich weniger beständig.

## B. Der Supernova Mechanismus

Beim Vorläufer der Supernova 1987 erlosch das Brennen im Zentrum, sobald sich Atomkerne mit der Masse von Eisen gebildet hatten, da bei noch schwereren Atomkernen die elektrische Abstoßung der gebundenen Protonen den Zugewinn an Bindungsenergie auf Grund der Nuklearen Kraft übertrifft. Wegen des fehlenden Energienachschubs konnte im Zentrum das System aus Elektronen und Kernen des Eisenatoms dem Druck der Gravitation nicht mehr Stand halten. Dabei wird Quantenmechanik wichtig:

Je dichter Elektronen gepackt sind, desto schneller bewegen sie sich. Dies ist eine zentrale Aussage der 1926 formulierten Quantenmechanik. Ist ein Körper außerdem noch heiß, so ist dieser quantenmechanisch begründeten Bewegung die thermische Bewegung überlagert. Falls nun bei abnehmender Temperatur der thermisch verursachte Druck unwichtig werden sollte, bleibt immer noch der quantenmechanisch begründete. Diesen kennen wir als Festigkeit von Stoffen, wie wir dies in der täglichen Erfahrung wahrnehmen. Hohe Festigkeit bedeutet, dass man zur Kompression des Volumens viel Energie aufzuwenden hat. Diese zugeführte Energie wird aufgenommen von den Elektronen, indem deren kinetischen Energie erhöht wird. In gleicher Weise halten sie auch im Stern der Gravitationsenergie das Gleichgewicht. Nimmt ein dichter Bereich dieser Art durch Zuwachs von außen an Masse zu, so erhöht dies den Druck im Innern. Kann diesem nur der quantenmechanisch begründete Druck das Gleichgewicht halten, so wird die Materie weiter komprimiert. Dabei sind die Verhältnisse so, dass einer Verdoppelung der Masse eine Halbierung des Volumens entspricht. Nimmt nun die Masse immer weiter zu, so erreicht die Energie der Elektronen Werte, bei denen deren Masse zunimmt. Dies ist eine Aussage

der Speziellen Relativitätstheorie von Einstein aus dem Jahre 1906. Die Zunahme der Masse der Elektronen hat nun den Effekt, dass sich bei der Kompression weniger große Werte für den quantenmechanisch begründeten Druck ergeben. Damit gerät das System aus dem Gleichgewicht, der dichte Bereich wird instabil und kollabiert. Dies Phänomen tritt ein, wenn dessen Masse die der Sonne um etwa 40 Prozent übertrifft. Diese Einsicht hatten bereits um 1930 mehrere Physiker. Der kritische Wert der Masse wird mit dem Namen von Subrahmanyan Chandrasekhar verbunden (Nobelpreis 1983).

Dies idealisierte Modell ist auf Grund der hohen Temperaturen und auf Grund von Prozessen der Schwachen Wechselwirkung zu ergänzen: Mit der Kompression steigt die Temperatur, die Gammaquanten des thermischen Strahlungsfelds erreichen Energien mit denen sie die Bindungen der schweren Atomkerne auflösen, und so Neutronen, Protonen und Heliumkerne freisetzen. Diese Absorption der Gammaquanten reduziert die Temperatur, der damit verbundene Druckabfall verstärkt die Kompression. Weiterhin ermöglicht die zunehmende Energie der Elektronen Reaktionen, in denen Protonen in Neutronen und Elektronen in Neutrinos gewandelt werden. Zwar sind dies Prozesse der Schwachen Wechselwirkung, auf Grund der extrem hohen Dichten jedoch sind die Reaktionsraten groß. Das Verschwinden von Elektronen treibt ebenfalls die gravitative Kontraktion in einen selbstverstärkenden Prozess. Wenn nur noch die Neutronen bleiben, dann ist das Volumen dieses inneren Bereichs wiederum bestimmt durch das Gleichgewicht des Drucks auf Grund der Gravitation mit dem quantenmechanisch begründeten Druck, den die Neutronen auf Grund ihrer Konzentration aufbauen, vergleichbar den Elektronen. Das Volumen auch dieses Bereichs wird mit zunehmender Masse kleiner. Es zeigt sich, dass nach Ablauf aller Prozesse ein Neutronenstern von etwa 10 km Radius verbleibt. Es gibt Hinweise, dass dieser Wert für den Radius relativ unabhängig ist von der Masse des Neutronensterns. Der Wert der Chandrasekhar-Masse und die Dichte von schweren Atomkernen geben nur Anhaltspunkte. Die Kompressibilität von Materie in diesem extremen Zustand ist Gegenstand der Forschung.

### C. Neutrinoastronomie

Der beschriebene gravitative Kollaps bis hin zum Neutronenstern findet statt, weil alle Protonen ihre elektrische Ladung auf Elektronen übertragen. Die gebildeten Neutrinos haben die Energie der Elektronen, da die Bewegungsenergien von Protonen und Neutronen eine vergleichsweise geringe Rolle spielen. Die beim Kollaps frei gesetzte Gravitationsenergie ist viel größer als die bei allen vorher abgelaufenen Brennprozessen. Sie wird von den Neutrinos fortgetragen, im Vergleich zu

denen aus der Sonne haben sie ungleich höhere Energien.

So entweicht der größte Teil der freigewordenen Gravitationsenergie mit den Neutrinos ins All. Nur ein Anteil im Prozentbereich geht durch Reaktionen in den extrem dichten, kernnahen äußeren Bereichen verloren. Der damit verbundene Energieübertrag reicht jedoch aus, den gesamten äußeren Bereich abzusprengen. Dies ist es, was wir bei dieser Art von Supernova als Explosion wahrnehmen. Die Streuprozesse bewirkten 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 drei riesigen Apparaturen, eine davon in der Kamioka-Mine in Japan. Sie waren als Detektoren von Neutrinos zu einem anderen Zweck konzipiert, Der Kamioka Detektor zum Nachweis eines hypothetisch angenommenen Zerfalls des Protons. Registriert wurden damals 11 hochenergetische Neutrinos. Nach 170.000 Jahren Laufzeit trafen sie innerhalb von 10 Sekunden ein! Danach sprach man von Neutrinoastronomie. Leider ist das für Doktoranden weniger 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!

### D. Supernovae, der weitere Ablauf

Bei der extrem schnellen Implosion wird Raum frei, in den die Materie aus den nächst äußeren Sternbereichen einstürzt. Diese wird an dem zentralen Kernbereich des sich entwickelnden Neutronensterns näherungsweise elastisch reflektiert. Im Abstand von wenigen 100 km vom Zentrum ergibt sich aus der Konkurrenz von weiter einströmendem und bereits zurückströmendem Material eine hochverdichtete Zone, die für die kurze Zeit von mehreren zehntel Sekunden zum Stillstand kommt. Auf Grund der sehr hohen Dichte dieser Zone wechselwirkt sie mit den vom Kern emittierten Neutrinos, sodass Druck und Temperatur stark ansteigen. Diese Energiezufuhr und die Akkretion auf Grund der Rotation

bewirken in diesem inneren Bereich extrem turbulente Prozesse, eine Vielzahl von Umwälzungen, bis schliesslich dieser ganze Bereich abgesprengt wird und mitsamt dem weiteren Material der äusseren Schalen das Gravitationsfeld verlässt. Diese turbulenten Umwälzungen großer Massen sollten auch Quellen von Gravitationsstrahlung darstellen, und man hofft auf den erfolgreichen Nachweis. Die Stoßfront ist keineswegs sphärisch oder irgendwie symmetrisch. Deshalb werden unterschiedliche chemische Elemente in verschiedene Richtungen emittiert. Der Unsymmetrie der Stoßfront entspricht auch ein Rückstoß auf den verbleibenden Neutronenstern, der beträchtlich sein kann. Die Stoßfront durchdringt die umgebende Materie und gelangt in die äußere, von uns aus sichtbare Oberfläche des Sterns 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 Turbulenzen 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 demselben 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.

In der Puppis A Supernova beobachtet man für den im Röntgenlicht hell strahlenden Rest, den vor 4000 Jahren gebildeten Neutronenstern RX J0822-4300, die besonders

hohe Geschwindigkeit von 0,5 Prozent der Lichtgeschwindigkeit relativ zum Schwerpunkt der SN-Fronten. Die Erklärung der Stärke des Rückstoßes ist Gegenstand der Forschung.

### E. Kosmologische Bedeutung der Supernovae

Der Ablauf und die Auswirkungen von Supernova-Prozessen hängen entscheidend ab von der Masse des jeweiligen Vorläufer-Sterns. Bei der Supernova 1987 bewirkte die beschriebene extreme Aufheizung durch Neutrinos, dass im abgesprengten Bereich die Atomkerne sich zunächst in Neutronen, Protonen und Heliumkerne auflösten um anschließend wieder zu fusionieren. Dabei gab es Prozesse von Bildung und Zerfall, in denen die mit der Masse der Atomkerne zunehmende elektrische Abstoßung und die Stabilität der Kerne eine Rolle spielte. Deswegen endete die so gebildete Verteilung näherungsweise im Bereich von Eisen, da hier die Bindung der Nukleonen im Kern am stärksten ist. Dies Material expandierte mit der abgesprengten Schale. Ein Beispiel ist der Krebsnebel. Über ihre Spektrallinien kennen wir für die verschiedenen chemischen Elemente deren Häufigkeit. Sie hängen davon ab, wie sich während ihrer Entstehung Temperatur und Dichte zeitlichen entwickelt hatten. Wegen der Turbulenz des Vorgangs können sich benachbarte Bereiche stark unterscheiden. Entsprechend zeigen Supernova-Fronten keineswegs eine gleichförmige Verteilung. Mit zunehmender Abkühlung bildeten sich einfache chemische Moleküle und Staubteilchen. In letztere kondensierten insbesondere die schwereren Elemente. Im umgebenden interstellaren Gas bewirken die expandierenden Fronten Kompressionseffekte und unterstützen so die Bildung neuer Sterne in fortlaufenden Zyklen. Auf diese Weise reicherten sich die chemischen Elemente an aus denen unsere Welt besteht. Zugespitzt formuliert: Jeder von uns besteht aus Überresten von Supernova-Prozessen.

### F. Zoo der Supernovae

Sterne, die mit weniger als etwa 8 Sonnenmassen begannen, können auf signifikant andere Art als Supernovae zünden: Diese hatten den nuklearen Brennprozess mit der Bildung von Kohlenstoff und Sauerstoff beendet, und die s die Materie der äußeren Schalen durch Strahlung abgestoßen, sodass kompakte Weiße Zwerge verblieben. Deren Masse liegt bei etwas zwei Dritteln der Sonnenmasse. Falls sie Teil eines Doppelsternsystems sind und vom anderen Partner Materie aufnehmen, kann der so genannten Typ Ia Supernova-Prozess ausgelöst werden. Inzwischen beobachtet man etwa 300 Supernovae dieser Art pro Jahr.

Dabei kann als "Vorspiel" der auf der Oberfläche eingefangene Wasserstoff zu Helium verbrennen. Solche kurz dauernden Ereignisse bezeichnet man als Novae. Diese

können sich wiederholen, V407 Cygni, 9000 Lichtjahre entfernt, zeigte 1936 und 2010 einen solchen Ausbruch. Das abgesprengte Material bildet beim Durchdringen der Umgebung des Roten Riesen Stossfronten, welche auch Gammastrahlung emittiert.

Das Supernov-Ereignis vom Typ Ia ergibt sich, sobald der Weiße Zwerg auf Grund der aufgenommenen Materie die Chandrasekhar-Masse erreicht. Mit dem nun einsetzenden gravitativen Kollaps steigt die Temperatur und die abgebrochene Kette von Fusionsreaktionen zündet wieder: Aus Kohlenstoff und Sauerstoff entsteht Silizium, und aus diesem Nickel. Die dabei freigesetzte Energie übertrifft die Energie der Bindung durch Gravitation, wegen der Schnelligkeit des Prozesses ergibt sich ein explosiver Prozess, die gesamte Materie wird verstreut. Im Vergleich zur Core-Kollaps Supernova von 1987 ist die insgesamt freigesetzte Energie um vier Größenordnungen geringer, jedoch ist die Helligkeit im optischen Bereich meist größer. Dies liegt daran, dass Nickel 56, das häufigste Fusionsprodukt, in der Explosionsfront liegt und diese durch radioaktiven Zerfall aufheizt. Die freigesetzte Energie ist ohne Verschattung zu sehen. Die von Tycho Brahe 1572 beobachtete Supernova ist das gute Beispiel für eine Typ Ia Supernova. 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 und Eisen. In der näheren Sonnenumgebung sind zwei Drittel der Atome der Eisengruppe den Typ Ia-Supernovae zuzuordnen, und nur ein Drittel den massereicheren vom Typ II. Die häufigsten leichteren Elemente von Kohlenstoff bis Kalzium hingegen stammen vorzugsweise aus den Typ II Supernovae.

Davon ausgehend, lässt sich das Alter von Sternen abschätzen. Im Mittel sind Typ Ia-Supernovae jüngere Ereignisse als Typ II-Supernovae, deshalb zeigen früh gebildete Sterne einen höheren Anteil an Magnesium relativ zu Eisen als die später gebildeten. So zeigt man, dass die Sterne des zentralen Bereichs der Galaxis älter sind als die der Scheibe weiter aussen.

Für die Typ Ia-Supernovae zeigt die anfängliche Situation eine gewisse Streubreite. Die Experten streben an, die Typ Ia-Supernovae so gut zu verstehen, dass sie jeder beobachteten Supernova dieser Art aus ihrem Spektrum und dem jeweiligem zeitlichen Verlauf der Lichtabstrahlung eine bekannte Leuchtkraft zuordnen können. Sie sprechen dabei gerne von Standardkerzen. Inzwischen sind 6000 dieser Typ Ia Supernova beobachtet worden. Man erkennt sie im optischen Spektrum an den Linien von Silizium, und am Fehlen von Wasserstoff und Helium. Sie leuchten besonders hell auf. Allerdings gibt es diese Kerzen erst im relativ fortgeschrittenem Stadium der Sternentwicklung, da es Zeit braucht zur Bildung von Weissen Zwergen und insbesondere von Roten Rie-

sen, den Partnern im Doppelsternsystem, von dem die abgestoßene Materie akkretiert wird.

## G. Verteilung der Elementhäufigkeit

Es ist ein großes Ziel von Astronomie und Kernphysik, die Häufigkeit der chemischen Elemente im Detail zu verstehen. Bei den Supernovae haben wir skizziert, wie aus primordiales Material, Wasserstoff und Helium, durch Einfang geladener Teilchen die chemischen Elemente bis zu Eisen erzeugt werden. Diese Elemente bilden in den Sternen der nachfolgenden Generation Beimengung zu Wasserstoff und Helium, und werden dort zum Ausgangsmaterial weiterer Elementumwandlungen. Neben der Anlagerung von Protonen ist der Einfang von Neutronen besonders wichtig. Entsteht nach (gegebenenfalls wiederholtem) Neutroneneinfang ein radioaktiv instabiler Kern, dann geht dieser durch  $\beta$ -Zerfall, d.h. unter Emission eines Elektrons, in einen fester gebundenen Kern der nächst höheren Ordnungszahl über. Dabei sind die Zeitskalen so, dass der radioaktive Zerfall viel schneller erfolgt als der nächste Einfang. Damit ist ein Weg durch die Isotope der so gebildeten Elemente festgelegt, dieser folgt der stärksten Bindung. Der Weg wird sichtbar, da fast alle Atomkerne diesen nur zum Teil durchschritten haben, und so irgendwo auf dem Weg stehen geblieben sind. Dieser Prozess des langsamen Neutroneneinfangs, kurz (slow) s-Prozess, geht aus von Eisen und findet sein Ende bei Blei und Wismut, da alle anschließend erreichbaren Kerne instabil sind gegen Teilchenzerfall.

Relevant werden diese Vorgänge, sofern sie in Bereichen stattfinden die später abgestoßen werden und so den interstellaren Raum erreichen. Dies gilt für eine Schale in Roten Riesen, in der Helium zu Kohlenstoff fusioniert, und in der an bereits vorhandenen leichteren Atomkernen ( $^{13}\text{C}$  und  $^{22}\text{Ne}$ ) durch den Einfang von Helium der benötigte Fluss an Neutronen entsteht. Im zentralen Bereich solcher Sterne ist das Wasserstoff- und Heliumbrennen bereits beendet, er wird später in einen weißen Zwerg übergehen. Die hier diskutierten Sterne im asymptotischen Riesenast des Hertzsprung-Russell-Diagramms sind bereits zum Tausendfachen des Sonnendurchmessers aufgebläht. In der nachfolgenden weiteren Expansion werden die gebildeten schweren Elemente mit dem sgn. planetarischen Nebel freigesetzt.

Die beobachtete Verteilung der Isotope zeigt, dass es neben dem s-Prozess einen weiteren Mechanismus der Erzeugung schwerer Elemente geben muss. Dieser hat die Genese der beobachteten neutronenreichen Atomkerne zu erklären, die ausserhalb des Bildungspfad der s-Prozess-Kerne liegen, Kerne schwerer als Blei und Wismut sind ausschließlich auf diese Weise entstanden. Man ging zunächst davon aus, dass deren Erzeugung durch extrem schnellen Neutronen-Einfang erfolgt, deswegen die

Bezeichnung (rapid) r-Prozess. Inzwischen stellt sich heraus, dass dies in den uns bekannten Formen von Supernovae nicht möglich ist. Neueste Untersuchungen zeigen, dass diese Kerne bei der Verschmelzung zweier Neutronensterne entstehen sollten. Dabei wird ein Bruchteil der hochdichten Neutronenmaterie ins interstellare Medium freigesetzt. Zunächst entsteht eine thermisch bestimmte Verteilung neutronenreicher Kerne sehr großer Masse. Aus diesen entstanden die uns bekannten Kerne durch Spaltung und radioaktiven Zerfall. So erklärt sich die in den verschiedenen Sternen beobachtete einheitliche Verteilung der Elementhäufigkeit von r-Prozess Kernen. In der Milchstraße entspricht die Masse der gebildeten r-Prozess Kerne einigen Tausend Sonnenmassen. (Die der s-Prozess Kerne ist vergleichbar.) Aktuelle Berechnungen zeigen, dass bei jeder Verschmelzung zweier Neutronensterne knapp ein Prozent einer Sonnenmasse in der Form von r-Prozess Kernen freigesetzt werden sollte. Allerdings beobachtet man bereits in sehr alten Sternen schwere Elemente, deren Häufigkeit jedoch 4 Größenordnungen unter dem aktuellen Wert liegt. Deren Alter schließt die Bildung aus einem Neutronendoppelstern wohl aus. Als Entstehungsort vermutet man frühe Supernovae extrem massereicher Sterne.

In die angestrebte Berechnung der Verteilung der Elementhäufigkeit gehen ein die Entwicklung der Galaxien, die Modellierung von Sternentstehung und Supernovae-Prozessen, und die Kenntnis von Kernreaktionsraten, die aus Laboraten abgeleitet sind. In den Grundzügen ist dies verstanden. Der Pionier dieser Physik war William Fowler (Nobelpreis 1983).

## H. Zeitangaben

Die in stellaren Prozessen erzeugten Verteilungen der Elementhäufigkeiten werden anschließend modifiziert durch radioaktiven Zerfall. Falls von einem chemischen Element verschiedene Isotope gebildet wurden, betrifft der Zerfall mit einer charakteristischen Halbwertszeit jeweils nur ein Isotop. Kann man Proben unter Laboratoriumsbedingungen untersuchen, und gelingt es, die Zahl der durch Zerfall gebildeten Kerne relativ zu den verbliebenen zu bestimmen, so folgt der Zeitpunkt, zu dem das Material der Probe erzeugt wurde. Dementsprechend können Altersbestimmungen von Erdschichten, Meteoriten, der Erde und des Sonnensystems sehr genau sein.

Anders ist es bei Sternen. Hier haben wir nur die Spektrallinien als Information, und diese unterscheiden nicht nach Isotopen. Deshalb konzentriert man sich auf Elemente die möglichst aus nur einem Isotop bestehen, und bestimmt deren durch den bereits erfolgten Zerfall reduzierte Häufigkeit. Das Problem dabei ist die Referenzgröße, die Häufigkeit vor dem Zerfall. Hier spielen Uran und Thorium eine wichtige Rolle. Diese heute beobachteten Elemente werden nur im diskutierten r-Prozess er-

zeugt, Nach einiger Zeit sind auf Grund des Alpha - Zerfalls fast alle Elemente schwerer als Blei verschwunden, nur von Uran und Thorium ist etwas übrig geblieben. Deren unterschiedliche Zerfallszeiten und der definierte Prozess ihrer Erzeugung erlauben näherungsweise Aussagen über das Alter. Kürzlich wurde auf diese Weise einem Stern im Halo der Milchstraße ein Alter von 13,2 Milliarden Jahren zugeordnet. Das passt zu der sehr niedrigen Häufigkeit schwerer Elemente in diesem Stern und zu unserer Kenntnis über das Alter des Kosmos. Jedoch ist die Messung und ihre Analyse mit einer Unsicherheit von insgesamt mehr als einer Milliarde Jahre behaftet. Man sollte jedoch festhalten, dass dies eine direkte Altersbestimmung darstellt, unabhängig von der Physik kosmischer Expansion.

## I. Pulsare, Magnetare

Die verbleibenden Neutronensterne sind sehr kompakte Objekte. Beim Kollaps im Supernova-Prozess bleibt der Drehimpuls erhalten, sodass ein Teil davon auf den Neutronenstern übergeht. Wegen des geringen Durchmessers haben diese extrem hohe Umlaufgeschwindigkeiten. Ein Tag auf einem derart kompakten Stern kann nur wenige Millisekunden dauern. Beim Kollaps bleibt der Fluss des Magnetfelds erhalten, sodass auf Grund der Konzentration extrem starke Magnetfelder entstehen. Nahe der Oberfläche übertreffen diese die in Laboratorien erzeugten Feldstärken um bis zu eine Milliarde. 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.

Inzwischen kennt man auch Neutronensterne, deren Magnetfelder nochmal um etwa einen Faktor 1000 stärker sind, man spricht von Magnetaren. Man versteht diese Feldstärken, falls unmittelbar nach dem Supernovakol-

laps verschiedene Teilbereiche des Neutronensterns unterschiedlich schnell rotiert hatten, und falls diese auf Grund noch verbliebener Elektronen und Atomkerne elektrisch leitend waren. Dann ergaben sich im Magnetfeld des Neutronensterns Induktions-(Dynamo)Effekte, die dieses Feld dramatisch verstärkten, kinetische Energie der Rotation wurde in Energie des Magnetfelds gewandelt. Eine Beobachtung in der Region Westerlund in der Milchstraße am Südhimmel zeigt das Relikt eines Doppelsterns, der Vorläufer sollte 40 Sonnenmassen gehabt haben. Im SN-Prozess wurde in diesem Fall offensichtlich soviel Materie abgesprengt, dass der Rest nicht mehr reichte zu Bildung eines Schwarzen Lochs.

## J. Zur Sternentstehung heute

Sterne entstehen immer dann, wenn lokale Bereiche von verdichtetem interstellarem Gas und Staub auf Grund ihrer eigenen gravitativen Anziehung kollabieren. Wegen des Staubs ist der Vorgang der Sternentstehung zumeist nicht sichtbar. Verdichtungen ergeben sich aus der Überlagerung verschiedener Bewegungen. In diesen Bewegungen spiegelt sich die ganze Vorgeschichte. Verdichtungen ergeben sich bereits aus Turbulenzen, die aus Akkretionsvorgängen auf Grund der Bewegung um das Galaktische Zentrum folgen.

Zunächst sollen die Größenordnungen skizziert werden. Materie im Kosmos ist zu 90 Prozent noch freies, primordiales Gas, nur 10 Prozent ist in Sternen gebunden. Im Bereich der Galaxis ist das Verhältnis gerade umgekehrt. Die mittlere Dichte des Gases dort beträgt ein Wasserstoffatom pro Kubikzentimeter, sie liegt somit um 7 Größenordnungen über dem mittleren Wert im Kosmos. Sternentstehung bedeutet eine weitere Verdichtung um mehr als 25 Größenordnungen (s.o.). In kalter Umgebung entstehen die leichten Sterne, in wärmerer die schweren. Von den leichten Sternen gibt es viele, von den schweren wenige. Die Masse von Sternen ist beschränkt, da bei sehr schweren Sternen die Temperaturerhöhung beim raschen gravitativen Kollaps so stark ist, dass das System zerreißt, eine Masse von etwa 100 Sonnen wird als Limit abgeschätzt, doch beobachtet man schwerste Sterne mit einer Masse von etwa 150 Sonnen. Über die Häufigkeit der Sterne in der Galaxis kann man sagen, dass sie um einen Faktor 5 abfällt, wenn deren Masse um einen Faktor 2 zunimmt. Die schweren und schwersten Sterne brennen besonders schnell ab, die mit 100 Sonnenmassen in weniger als einer Million Jahren, die Sonne in 9 Milliarden Jahren, und die leichteren in noch viel längeren Zeiten. Entsprechend variiert die abgestrahlte Energie.

Die zur Sternentstehung nötigen hohen Dichten stellen sich auf Grund dynamischer Prozesse für kurze Zeiten ein. Sie umfassen Gas-Staub Bereiche von vielen tausend Sonnenmassen, in denen gleichzeitig, und auch

in gegenseitiger Beeinflussung, eine größere Anzahl von Sternen entstehen. Nur über spezielle Strömungen auf Grund gegenseitiger Beeinflussung ist das Entstehen der schwersten Sterne zu verstehen. Je massereicher ein Gas-Staub Bereich, desto eher entsteht dort auch schwere oder sehr schwere Sterne.

Diese spielen für das Weitere eine besondere Rolle: Sie emittieren intensive Strahlung, auch im Röntgenbereich, und ionisieren und erwärmen so das umgebende Medium aus Gas und Staub. Dies verhindert dort weitere Sternbildung. Die Ausdehnung des erwärmten Gases drängt das umgebende kalte Gas zurück. Verstärkt wird dieser Effekt durch Stoßfronten, verursacht durch stellare Winde. Diese nehmen mit der Masse des zentralen Sterns sehr stark zu. Die so erhöhte Dichte im umgebenden kalten Gas bewirkt dort verstärkte Sternbildung. Die räumliche Verteilung der so entstandenen leichten Sterne wird bestimmt durch die Wechselwirkung der Stoßfront mit den turbulenten Strömungen im kalten Gas. Bei den entstehenden Sternen sind protostellare Scheiben und auch Akkretions-Jets beobachtet worden. Die Akkretions-Scheiben bestehen für wenige Millionen Jahre. Dies ist der Zeitraum einer etwaigen Planetenbildung.

Erfolgt dann die Supernovaexplosion des Zentralsterns, so räumt die entsprechende, zweite Stoßfront den umgebenden Bereich leer, und die im Nahbereich gebildeten neuen Sterne werden so besser sichtbar. Dazu kommt, dass die Supernova-Stoßfront ihrerseits im umgebenden Medium eine weitere Phase von Sternbildungen auslöst. Die schweren Sterne lösen also zumindest zwei Zyklen der Sternbildung aus. Dabei wird jeweils nur ein eher kleiner Anteil des Ausgangsmaterials verbraucht, Werte von 10 Prozent werden genannt.

Interessant ist, dass der Entstehungsprozess der Sonne und unseres planetaren Systems durch das Material eines Zentralsterns von mindestens 30 Sonnenmassen dominiert war. In der Entwicklung von Sternen dieser oder noch höherer Masse werden infolge der hohen Freisetzung von Energie äußere Schalen abgesprengt, sodass innere Schalen, in denen der Brennprozess weit fortgeschritten ist, nahe an der Oberfläche liegen. Man spricht von Wolf-Rayet Sternen. Deren Sternwinde tragen eben erzeugtes Material nach außen. Interessant sind die durch Reaktion in diesen Schalen gebildeten radioaktiven Isotope von Natrium und Aluminium,  $^{22}\text{Na}$  und  $^{26}\text{Al}$ .  $^{22}\text{Na}$  zerfällt nach einigen Jahren,  $^{26}\text{Al}$  nach knapp einer Million Jahren. Deren Zerfall können wir auf Grund der nachfolgenden Gammastrahlung aus solchen Sternen beobachten. Haben wir auch eine Information über die Zerfallsprodukte, so können wir zeitliche Abläufe im Detail rekonstruieren. Beispiele dafür: Im 1864 nahe Orgueil in Südfrankreich niedergelagerten Meteoriten findet sich reichlich  $^{22}\text{Ne}$ , das Zerfallsprodukt von  $^{22}\text{Na}$ . Das bedeutet, dass  $^{22}\text{Na}$  im Meteoriten deponiert war, bevor es im Wolf-Rayet Stern

durch Protonenanlagerung in  $^{23}\text{Mg}$  überführt wurde. Kennt man einige kernphysikalische Reaktionsdaten (zu deren Messung ich beigetragen konnte: Phys. Rev. C75, 045807 (2007)), so kann man auf die Temperatur im Wolf-Rayet Stern schliessen. Ein weiteres Beispiel: In alten Meteoriten findet man in Chondrulen, die Aluminium auf Grund seiner chemischen Eigenschaften in ihr Kristallgitter binden, das Zerfallsprodukt von  $^{26}\text{Al}$ , Magnesium  $^{26}\text{Mg}$ . Innerhalb der Halbwertszeit von weniger als 1 Million Jahren gelangte also  $^{26}\text{Al}$  nach seiner Bildung im Innern des Sterns über die erste Stoßfront in die Kristalle eines Meteoriten unseres Sonnensystems. In vergleichbarer Weise kann man nach kurzlebigen Kernen aus der anschließenden zweiten Stoßfront auf Grund der anschließenden Supernovaexplosion fragen. Hierfür eignet sich ein Isotop des Eisens,  $^{60}\text{Fe}$ , das in wenigen Millionen Jahren zu  $^{60}\text{Ni}$  radioaktiv zerfällt. Dies wird ebenfalls in Meteoriten nachgewiesen. Es wird nun berichtet, dass einige Meteoriten  $^{26}\text{Al}$ , aber keinen  $^{60}\text{Co}$  Zerfall zeigen. Sie entstanden offensichtlich nach der ersten, aber vor der zweiten Stoßfront. Die Beobachtung sei konsistent mit präzisen Altersbestimmungen dieser Meteoriten auf Grund des Alpha-Zerfalls sehr schwerer Kerne.

Eine weitere interessante Frage ist, wie schwer Sterne sein können. Inzwischen kennt man Sterne, die mit einer Masse von 300 Sonnen begannen. Sie sollten in Bereichen entstanden sein, die frei waren von schwereren Elementen. Somit wäre die Situation vergleichbar mit der zu Beginn aller Sternentstehung. Für alle diese sehr schweren Sterne gilt, dass ihr Ende als Supernova ihre Umgebung in entscheidender Weise geändert hatte.

#### 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 Bewegungen und die Anziehungen der anderen Planeten nicht berücksichtigt werden. Die 1977 gestartete Raumsonde Voyager, die etwa 2012 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 umlief. 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. Zur ersten Orientierung betrachten wir einen Probekörper auf der Oberfläche eines Objekts, dessen Masse kugelsymmetrisch verteilt ist, und fragen wann dessen potentielle Energie im Gravitationsfeld, gleich seiner Ruhenergie wird. Der Durchmesser, bei dem dies geschieht, ist proportional zur Masse des Objekts. Für das Objekt folgt daraus, dass bei vorgegebener Masse eine hohe Dichte verlangt wird, bzw. bei vorgegebener Dichte ein großer Durchmesser und damit auch eine große Masse. Für ein Objekt mit der Dichte eines Neutronensterns sind dies mehrere Sonnenmassen. 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 soeben naiv abgeschätzten nur um einen Faktor 2. Wird Licht oder was auch immer innerhalb des Schwarzschildradius emittiert, kann es das Gravitationsfeld nicht mehr verlassen. Die Zone innerhalb des Schwarzschildradius erscheint von aussen als schwarz, als ein Schwarzes Loch.

Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Gravitation als Dynamik der Raumzeit. Die Anziehung eines Sterns beinhaltet, dass der Raum in den Stern fällt. Für einen Beobachter von außen wird der Schwarzschildra-

dius zu dem Abstand, bei dem die Geschwindigkeit der Bewegung des Raums gerade gleich der Lichtgeschwindigkeit wird, noch näher am Zentrum übertrifft sie diese. Ereignisse dort können von außen in keiner Weise wahrgenommen werden. Einfallende Materie, die den Schwarzschildradius passiert hat, kann nicht mehr zurück, dort emittiertes Licht gelangt nicht mehr zu uns, deshalb bezeichnet man eine entsprechende Konzentration von Masse als Schwarzes Loch.

Für ein Schwarzes Loch, das aus einem rotierenden Stern hervorgeht, wurde die Metrik 1963 von Roy Kerr berechnet. Sie bestimmt die Akkretion und die Bildung von Jets. Sie ist allein durch Masse und Drehimpuls bestimmt, alle weiteren Eigenschaften des rotierenden Sterns, insbesondere die Momente der Massenverteilung, wurden bei der Bildung des Schwarzen Lochs durch Gravitationswellen abgestrahlt.

Der Schwarzschildradius stellt einen Horizont dar, hinter dem Ereignisse grundsätzlich nicht wahrzunehmen sind, man spricht vom Ereignishorizont. Wird Licht im Gravitationsfeld emittiert, so sehen wir dieses auf Grund des Dopplereffekts mit vergrößerter Wellenlänge, und bei Emission am Schwarzschildradius wird diese unendlich. Man kann dies auch so sehen, dass für den Beobachter die Schwingungen des Lichts still stehen. Für ihn scheint die emittierende Quelle nicht mehr zu schwingen, er kann sagen, dass dort, am Ereignishorizont, die Zeit stehen bleibt!

#### A. Wie entstehen Schwarze Löcher?

Schwarze Löcher gehen hervor unter anderem aus massereichen Sternen. Im Supernova-Prozess sprengen sie die Schale ab, im Zentrum verblieben Neutronensterne. Auf diese stürzte aus der Schale so viel Materie zurück dass diese in Schwarze Löcher übergingen.

#### B. Gammablitz

Die Entstehung eines Schwarzen Lochs kann als Gammablitz beobachtbar werden. Der Supernova-Kollaps eines sehr schweren Sterns oder die Fusion zweier Neutronensterne ist verknüpft mit der Akkretion schnell rotierender Materie um das entstehende Schwarze Loch und mit der Abstoßung eines eng kollimierten, extrem energiereichen Jets entlang der Rotationsachse. So wird die freigesetzte Gravitationsenergie abgeführt. Diese Vorgänge im Bereich von Sekunden oder auch Minuten führen zur Abstrahlung kollimierter Gammastrahlung. Befindet sich die Erde in der Richtung dieser Abstrahlung, so erscheint sie uns als Gammablitz (Gamma Ray Burst). Die nur Sekunden kurze Blitze ordnet man der Fusion zweier Neutronensterne oder eines Neutronensterns mit

einem Schwarzen Loch zu, die Minuten andauernden den beschriebenen Supernovae sehr schwerer Sterne. Ereignisse dieser Art gelten als stärkste Strahlungsquellen, sie sind über sehr große Distanzen zu beobachten und zeigen stellare Prozesse auch aus einer Zeit, in welcher der Kosmos noch weniger als eine Milliarde Jahre alt war.

Es gibt Hinweise für einen Gammablitz, der die Erde im Jahr 774 oder 775 getroffen hat: eine erhöhte Konzentration von Kohlenstoff 14 in Baumringen, und von Berillium 10 im antarktischen Eis. Da eine Supernova auszuschließen ist, wäre die Fusion von Neutronensternen oder von schwarzen Löchern, im Abstand von etwa zehntausend Lichtjahren, eine Erklärung.

#### C. Quasare und massereiche Schwarze Löcher.

Viele Galaxien haben in ihrem Zentrum ein massereiches Schwarzes Loch. Falls diese Materie durch Akkretion aufnimmt, wird es sichtbar als Strahlungsquelle höchster Intensität. Das erste Objekt dieser Art wurde 1963 beobachtet, und als Quasar, quasi-stellar, bezeichnet. Der Materiezufuss wird aus Leuchtkraft und Entfernung abgeschätzt, dabei folgen Werte von bis zu vielen Sonnenmassen pro Jahr. Dementsprechend sollte die im Schwarzen Loch gesammelte Masse heute im Bereich von Millionen bis zu einigen Milliarden Sonnenmassen liegen. Der Materiezufuss ist verbunden mit der Freisetzung von Gravitations-Energie, die sich zeigt in der Abstrahlung des akkretierten Gases und in der kinetischen Energie der emittierten Jets. Sie beträgt mehrere 10 Prozent der Ruhenergie der akkretierten Materie. Dementsprechend intensiv ist die Strahlung, auch im Bereich sehr kurzer Wellenlängen. Durch Ionisation und Erwärmung beeinflusst diese den gesamten Bereich der Galaxie, und auch das umgebende intergalaktische Gas, und bestimmt so deren weitere Entwicklung, auch limitiert ihr Strahlungsdruck den Zufuss akkretierter Materie. Rekordhalter an Strahlungsemission ist ein Quasar im Sternbild Löwe, dieser emittiert 400 Sonnenmassen im Jahr.

Die meisten Quasare beobachtet man in Entfernungen, die einem Alter des Kosmos von 2 bis 4 Milliarden Jahren entsprechen. Jedoch kennt man einige sehr massereiche, die schon viel früher entstanden sind. Heute sind fast alle ehemaligen Quasare „ausgeschaltet“, denn das galaktischen Umfeld des Schwarzen Lochs im Zentrum hat sich bis heute so geordnet, dass das Material zur Akkretion fehlt. Man kann hier eine Parallele ziehen zur Entwicklungsgeschichte der protoplanetaren Scheibe unseres Sonnensystems. Die supermassereichen Schwarzen Löcher in den Zentren von Galaxien sind die Asche, die vom Akkretionsprozess und der Quasar-Lichtemission übrig geblieben ist. Ergibt sich aus Störungen des Umfelds erneut ein Akkretionsprozess, und somit ein Wiederaufflammen intensiver Lichtemission, so spricht

man von einem aktiven galaktischen Nucleus (AGN). Spiralgalaxien zeigen dann ein besonders helles Zentrum (Seyfert-Galaxie). (Quasare, deren Leuchtkraft mit der Zeit wechselt, werden als Blasare bezeichnet)

Quasare machen extrem entfernte und entsprechend junge Galaxien sichtbar. Sie zeigen, wie die Masse der Schwarzen Löcher im Zentrum zunimmt, und so Werte von einigen Millionen bis zu einigen Milliarden Sonnenmassen erreicht. Quasare gehören zu den fernsten beobachtbaren Objekten, Zwei besonders frühe Quasare, die man 12,7 Milliarden Lichtjahre entfernt beobachtet hat, zeigen in ihrem Umfeld deutlich weniger Staub als später entstandene, es fehlten die vorangegangenen Sternexplosionen.

Die Beobachtung von Quasaren zeigt, dass es supermassereiche Schwarze Löcher geben muss. Sie lässt jedoch offen, aus welcher Situation heraus diese entstanden sind und ob alle Galaxien in ihrem Zentrum ein entsprechend massereiches Schwarzes Loch besitzen. Inzwischen hat man für eine Anzahl von Galaxien experimentelle Information über die Dichte der Sterne und der Geschwindigkeiten der Sterne bei ihrer Bewegung um das gemeinsame Gravitationszentrum. Dann wird bei kleinen Abständen vom galaktischen Zentrum die Gegenwart eines massereichen Schwarzen Lochs evident, sofern dessen Masse im Bereich von Millionen Sonnenmassen und mehr liegt. Es zeigt sich, dass alle elliptischen Galaxien im Zentrum ein Schwarzes Loch haben. Deren Masse ist proportional zur Masse der Galaxie, und liegt bei 1 bis 2 Promille. In der riesigen Virgo Galaxie M 87, nur 54 Millionen Lichtjahre von uns entfernt, hat das Schwarze Loch eine Masse von 6,6 Milliarden Sonnen. (Es gibt jedoch auch Ausnahmen von der Promille Regel: Ein Schwarzes Loch mit 17 Milliarden Sonnenmassen enthält etwa 14 Prozent der Masse der Wirtsgalaxie NGC 1277 im Sternbild Perseus, etwa 220 Millionen Lichtjahre von uns entfernt.) Spiralgalaxien hingegen haben nur dann ein massereiches Schwarzes Loch, wenn diese im zentralen Bereich einen Bulge (Ausbauchung) zeigen. Ein Bulge entspricht einer elliptischen Galaxie in kleinerem Maßstab, und ist in ihrer stellaren Zusammensetzung unabhängig von der Zusammensetzung der äußeren Scheibe mit Spiralstruktur. Ein Beispiel dafür ist die Andromeda Galaxie M31, 2,5 Millionen Lichtjahre von uns entfernt, mit einem Schwarzen Loch einer Masse von 140 Millionen Sonnen. Eine Spiralgalaxie ohne Bulge ist M31 im Dreiecksnebel, nach Andromeda die zweit hellste Galaxie am Nachthimmel, 2,8 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Für diesen konnte die Existenz eines Schwarzen Lochs mit einer Masse oberhalb von einigen Tausend Sonnen ausgeschlossen werden. Die Milchstraße zeigt im Zentrum zwar auch eine Ausbauchung, einen Bulge, der jedoch übergeht in einen Balken. Deshalb hat sie, obwohl in der Masse vergleichbar mit der Andromeda Galaxie, ein Schwarzes Loch mit einer

wesentlich kleineren Masse von nur 4,3 Millionen Sonnen.

Man kann diese Beobachtungen in die Vorstellung einordnen, dass in den gleichsinnig rotierenden Scheiben von Spiralgalaxien eine alles beherrschende Rotation spektakuläre Akkretionsprozesse im Zentralbereich verhinderte. Dies steht im Kontrast zu elliptischen Galaxien, in denen die einzelnen Sterne alle möglichen Umlaufrichtungen um das galaktische Zentrum zeigen und in denen alle Sterne alt sind. Offensichtlich gingen diese hervor aus einer näherungsweise sphärisch symmetrischen Zuströmung von Gas und Sternen. Am Anfang erzeugte das zentral einströmendes Gas einen so massereichen Stern, dass dieser direkt kollabierte und ein schwarzes Loch bildete. Dessen Masse wuchs rasch an durch weiter zuströmendes Gas und durch Akkretionsprozesse, die auch die zuströmenden Sterne einschloss. Schließlich endete die Sternbildung, da auf Grund der bei diesen Prozessen frei gesetzten Energie alles sternbildende Gas fort geblasen war. Dies erklärt die weitgehend einheitliche Struktur, die Bulges mit elliptischen Galaxien gemeinsam haben, und das feste Verhältnis der Masse des zentralen supermassiven Schwarzen Lochs mit seiner Galaktischen Umgebung.

Falls im Laufe der Entwicklung Galaxien kollidieren und verschmelzen, werden für die entsprechend virulenten Situation auch Werte von bis zu 10 oder mehr akkretierten Sonnenmassen pro Jahr diskutiert. Die Jets ergeben sich aus der Rotation der vom Schwarzen Loch akkretierten Materie und den damit verbundenen Magnetfeldern. Diese führen den kleineren Teil der akkretierenden Materie am Schwarzen Loch vorbei und beschleunigen diesen so stark, dass er entlang der Achse mit Geschwindigkeiten von bis zu 99 Prozent der Lichtgeschwindigkeit als Plasmastrahl abgestoßen wird. Die intensiv leuchtenden Jets haben eine Länge von zig Tausend Lichtjahren und mehr.

Die dem Quasar-Mechanismus zugrunde liegenden Prozesse lassen sich auch zeitnah beobachten, etwa im Zentrum des Virgo Galaxienhaufens. Die beobachtete Aktivität dort ist jedoch eher gering, wenn man mit der ursprünglichen Aktivität in der Entstehungsphase der Galaxie vergleicht. In entsprechender Weise hat man ein 1992 beobachtetes kurzzeitige Aufleuchten eines Objekts (hinter dem Andromedanebel) verstanden als Akkretion des Materials eines schweren Sterns, den Gezeitenkräfte zerrissen hatten. Es ist üblich, bei diesen Prozessen, den Vorgang beschreibend, von aktiven galaktischen Kernen zu sprechen und den Begriff Quasar auf die frühe Phase zu beschränken.

#### D. 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 Bereich der Radiowellen-, Infrarot- und Röntgenstrahlung zu beobachten. Das massereiche Schwarze Loch im Zentrum zeigt sich als starke Radioquelle, in dieser Form kennt man es seit 1932, bezeichnet als Sagittarius A\*. In den letzten 20 Jahren wurden vom Zentrum immer bessere Aufnahmen gemacht. Mit den 2004 vorhandenen wurde in einer Doktorarbeit in München (ich war Mitglied der Prüfungskommission) erstmals gezeigt, dass in einem sehr kleinen Bereich des Zentrums die Masse von 4,3 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 4,3 Millionen Sonnen.

Entscheidend war damals die Beobachtung des nächstliegenden Sterns, S2, der das supermassereiche zentrale Schwarze Loch im Abstand von etwa 17 Lichtstunden in nur 15,2 Jahren umläuft. Dabei erreicht er Geschwindigkeiten von bis zu 5000 km/sec 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 folgt die Masse des Zentrums zu den genannten 4,3 Millionen Sonnenmassen, und ein Schwarzschildradius von 10 Millionen km. Das supermassereiche zentrale Schwarze Loch der Milchstraße ist derzeit optisch nicht aktiv. Die Radiostrahlung wird von einer Akkretionsscheibe als Synchrotronstrahlung emittiert. Dies zeigt die Existenz starker Magnetfelder, das Plasma ist jedoch zu dünn, um thermisch Licht zu emittieren. Magnetische Instabilitäten, spontane Rekonexionen, erzeugen gelegentlich Flares, die im Infrarot- und Röntgenbereich für etwa 1 Stunde aufscheinen. Es gibt Hinweise, dass diese im Bereich der innersten stabilen kreisförmigen Umlaufbahn mit einer Periode von 15 Minuten das zentrale Schwarze Loch umlaufen.

Innerhalb weniger 10 Lichtjahre vom Zentrum ist die Dichte von Sternen extrem hoch, dazu kommen noch viele tausend Stellare Schwarze Löcher mit Massen von typisch 5 bis 10 Sonnenmassen, die man aus deren Bindung zu Doppelsternen identifiziert. In diesem Nuclear Star Cluster, der nicht mit dem Bulge verwechselt werden soll, lassen sich 500 Sterne in ein Hertzsprung-Russel Diagramm einordnen. Dabei zeigt sich, dass 80 Prozent von ihnen älter sind als 5 Milliarden Jahre. Das bedeutet, dass sie aus einer Zeit stammen, als das zentrale Schwarze Loch noch wesentlich kleiner war. Eine Vorstellung ist, dass der Nuclear Star Cluster einem schweren, sehr alten Kugelsternhaufen entspricht, der vorhanden war vor der

Bildung der Galaxie.

#### E. Eine Zwischenbilanz

Zur Verteilung der Materie im Kosmos gibt es Abschätzungen. Diese besagen, dass etwa 10 Prozent der Materie in Galaxien gebunden ist, und die verbleibenden 90 Prozent überwiegend ein heißes intergalaktisches Gas bilden. Dieses Gas steht in Wechselwirkung mit den Galaxien, es besteht aus Material, das von den Galaxien aufgrund ihrer Aktivität abgestoßen wurde und in verdichteten Bereichen, Filamenten, den Raum in dynamisch strukturierter Weise durchzieht, und sich dabei von einer Galaxie zur nächsten bewegt. Dementsprechend hat man davon auszugehen, dass die schweren Elemente des Sonnensystems, aus denen wir bestehen, zum Teil auch von anderen Galaxien stammen kann, auf Grund dieses großräumigen Geschehens. Man hat Informationen über das intergalaktische Gas aus den Spektren ferner Quasare, in denen die beigemischten schwereren Elemente Absorptionslinien erzeugen, und von Emissionen im Röntgenbereich. Die Auswertung ist Gegenstand aufwändiger Simulationsrechnungen.

In den Galaxien ist der Anteil von interstellarem Gas klein im Vergleich zur Materie, die in Sternen gebunden ist. In Schwarzen Löchern befinden sich mehrere Prozent der insgesamt in Sternen gebundenen Materie. Überwiegend sind dies Stellare Schwarze Löcher von typisch 10 Sonnenmassen. In den Supermassereichen Galaktischen Kernen sollen nur etwa 3 Prozent der insgesamt in Schwarzen Löchern gebundenen Materie gesammelt sein.

#### V. MAGNETFELDER, KOSMISCHE STRAHLUNG

Das sich ausbreitende Material, insbesondere in den Fronten von Supernova-Explosionen und in den Jets von Quasaren, erzeugt elektrische und magnetische Felder. Bei Supernovae bewegt sich die ausgestoßene Materie mit Geschwindigkeiten von wenigen Prozenten der Lichtgeschwindigkeit. Durch Strahlung ionisiert sie das interstellare Gas, sodass dieses mit den Magnetfeldern der ausgestoßenen Materie wechselwirkt, es wird von diesen mitgenommen. Entsprechend nimmt mit wachsender Masse die Geschwindigkeit der bewegten Materie ab. Ihr äußerer Bereich wird als Stoßfront bezeichnet. In dieser ist die Materie verdichtet und erhitzt, und es werden Magnetfelder neu erzeugt, mit wechselnden Orientierungen. Man spricht von turbulenter Struktur.

Diese Magnetfelder der bewegten Stoßfronten wirken als Beschleuniger (Fermi-Beschleunigung), da von außen einfallende elektrisch geladene schnelle Teilchen, Ionen oder Elektronen, von diesen elastisch abprallen. So wird

Bewegungsenergie der Plasmafront auf die schnellen geladene Teilchen übertragen. Die kinematische Situation entspricht der beim Tennisspielen. Die Energie der schnellen geladene Teilchen nimmt um einen bestimmten Faktor zu. Bei Supernova-Fronten liegt er im Prozentbereich, er potenziert sich jedoch mit der Anzahl der Wiederholungen. Diese finden statt, dass sich im Aussenbereich der Stoßfront turbulente Magnetfelder aufbauen, die jedoch im Raum ruhen. Von diesem prallen die rückgestreuten schnellen Ionen elastisch ab, es resultiert eine vielfach wiederholte Beschleunigung. Der Strom der in dieser Weise zirkulierenden elektrisch geladenen schnellen Teilchen verstärken die Magnetfelder. Die Beobachtungsdaten sind konsistent mit modellmäßigen Rechnungen. Dieser Prozess endet, wenn die schnellen Ionen, auf Grund einer zu hohen Energie, nicht mehr reflektiert werden können. Die Stoßfronten sind dünn, vergleicht man mit dem Abstand zum Zentrum zur Supernova-Explosion, doch sind äherungsweise homogene Teilbereiche dieser turbulenten Magnetfeldern klein im Vergleich zur Dicke der Stoßfronten.

Der beschriebene Mechanismus der Beschleunigung wirkt auch auf Elektronen. Wegen ihrer geringen Masse jedoch strahlen diese in den Magnetfeldern Synchrotron-Strahlung ab, und so verlieren sie ihre Energie auch wieder. Sofern man die Synchrotron-Strahlung beobachten kann, sehen wir die Orte, an denen die Beschleunigung stattgefunden hat: Bei der von Tycho Brahe beobachteten Supernova ist es einer Haut, die knapp außerhalb des Balls der expandierenden Materie zu schweben scheint. Die Intensität ist strukturiert und ändert sich mit der Zeit, dies passt zur Vorstellung turbulenter Magnetfelder. Die Frequenz der Synchrotron-Strahlung zeigt, dass die Stärke dieser Magnetfelder weit über dem Wert im interstellaren Medium liegt, und dass die Elektronen Energien erreichen, die einem Vielfachen der an Teilchen-Beschleunigern erreichten entspricht.

Die Zahl der an der Beschleunigung teilnehmenden Elektronen und Ionen ist gering im Vergleich zur Anzahl der ionisierten Teilchen in den Stoßfronten. Auch wenn sie wohl aus der Stoßfront zum Zeitpunkt des Supernova-Ereignisses stammen, ist noch nicht ganz klar ist, wodurch sie sich zu Anfang unterscheiden.

Abschätzungen zeigen, dass die hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung einige 10 Prozent der Bewegungsenergie der von der Supernovaexplosionen ausgestoßene Materie wegtragen. Umgekehrt heißt dies auch, dass die kosmischen Strahlung das dynamische Verhalten des ionisierten Gases in Galaxien beeinflussen.

Auf der Erde ist die kosmischen Strahlung Ursache der Höhenstrahlung, die von Victor Hess in Ballonaufstiegen 1912 (Nobelpreis 1936) entdeckt wurde. Die kosmische Strahlung löst in der Atmosphäre der Erde eine Kette von Reaktionen aus, in denen ihre Energie auf eine

große Anzahl von Ionen, Elektronen, Muonen und Photonen verteilt wird. Ihre höchste Intensität haben diese Schauer in 10 km Höhe, Hess beobachtete die Zunahme der ionisierender Strahlung mit der Höhe.

Ausgelöst werden die Schauer durch hochenergetische Gamma-Strahlung, doch überwiegend durch Protonen und Heliumkerne. Dazu kommen auch schwerere Atomkern, insbesondere bei den höchsten Energien. Deren Häufigkeiten entspricht der Erzeugung in den Supernovae. Einige von ihnen haben in der langen Zeit ihrer Existenz als schnelles Ion Nukleonen verloren, in Stößen mit anderen Atomkernen.

Da die Atomkerne durch Magnetfelder abgelenkt werden, sagt die Richtung des Einfalls auf die Erde nichts über ihre Quelle aus. Dies ist anders bei hochenergetischen Gammaquanten. Erzeugt werden diese im Bereich der Quelle im Zerfall neutraler Pionen nach Protonenstößen. Deren Energie und Richtung wird gemessen über die vom Schauer emittierte Cerenkovstrahlung. Die Verteilung unterscheidet sich etwas von der von Atomkernen. Derzeit gelingt es, in der galaktischen Ebene ca. 60 Quellen kosmischer Strahlung zu identifizieren, den meisten kann man Supernovafonten oder Pulsare zuordnen.

Die innerhalb der Galaxie beschleunigten Teilchen haben Energien bis zu  $10^{15}$  eV. Tatsächlich beobachtet man viel höhere Energien, bis zu  $10^{20}$  eV, allerdings sehr selten. Diese können nicht über den diskutierten Supernovae-Mechanismus erzeugt werden, es müssen Prozesse im extragalaktischem Raum sein. Als Quellen werden Stoßfronten diskutiert, die sich beim schnellen Durchdringen von Galaxienhaufen ergeben, oder die Jets aktiver galaktischer Kerne. Den derzeitigen modellmäßigen Rechnungen gelingt es jedoch nicht, die Werte der maximal beobachteten Energien darzustellen. Die Quellen müssen uns relativ nahe sind, da mit zunehmender Energie der Energieverlust durch Streuung an kosmischer Hintergrundstrahlung die Reichweite einschränkt. Da die Ionen höchster Energien von den magnetischen Feldern des intergalaktischen Raums nur noch wenig abgelenkt werden, hofft man aus der Verteilung der beobachteten Richtungen die relativ nahe Quellen zuzuordnen. So wurde Centaurus A, nur 14 Millionen Lichtjahre entfernt, als Kandidat gehandelt, jedoch ist für eindeutige Aussagen die Anzahl der Messpunkte noch viel zu gering.

Die in Galaxien beobachteten Magnetfeldern haben eine Stärke von einigen Mikrogauss. In Spiralgalaxien entspricht die Orientierungen dieser Felder in etwa der Spiralstruktur. Im intergalaktische Medium von Galaxienhaufen ist das Feld um etwa zwei Größenordnungen kleiner. Inzwischen scheint man die Ursache dieser Felder zu verstehen. Numerische Rechnungen, in denen die Galaxienentwicklung und auch die Kollisionen von Galaxien reproduziert werden, zeigen, dass die Magnetfelder aus der Kollision von Galaxien herrühren sollten. Dabei wird die kinetische Energie der dabei erzeugten turbulenten

Strömungen umgesetzt in magnetische Feldenergie, bis sich ein Art von Gleichgewicht einstellt. Dabei ist interessant, dass sich dieses als weitgehend unabhängig von der Stärke eines anfänglichen (seed) Felds erweist.

## VI. GRAVITATIONSWELLEN

Falls sich die supermassereichen Schwarzen Löcher in den Zentren von Galaxien mit ihren extrem starken Gravitationsfeldern beschleunigt bewegen, werden sie zu Quellen energiereicher Gravitationswellen. Gravitationswellen sind lokal fortschreitende Kompressionen der Raum-Zeit Geometrie. Man erwartet sie, 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 verbunden 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 wurden. 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 Ruheenergie abgestrahlt werden, wobei die Abstrahlung unmittlerbar 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 freigesetzten Gravitationsenergie enthalten sollte. 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 Mutterga-

laxie. Das Schwarze Loch ist sichtbar, da es etwas Materie aus dem zentralen Bereich der Galaxie mitgenommen hat.

## VII. VERTEILUNG DER GALAXIEN, DUNKLE MATERIE

Fast alle Sterne finden sich in Galaxien. In deren Zentren haben wohl alle ein supermassereiches Schwarzes Loch von Millionen oder auch Milliarden Sonnenmassen, und darum umlaufend viele Millionen bis zu mehreren Hunderten von Milliarden Sterne. Die schon von Herschel entdeckte riesige elliptische Galaxie NGC 4889 im Komahaufen, im Sternbild Haar der Berenike, hat in ihrem Zentrum das schwerste bekannte Schwarze Loch, mit einer Masse von ca. 21 Milliarden Sonnen. 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 Universums nimmt. Betrachtet man jedoch weniger große Bereiche, so ist die Verteilung der Galaxien im Raum alles andere als homogen. Lokale Bereiche hoher Dichte sind verbunden durch fadenartige Strukturen (Filamente), sie bilden ein Netzwerk, das große Leerräume (voids) umfasst, und dies in unterschiedlichen Größen. In der Verteilung der Galaxien unterscheidet man Galaxiengruppen, -haufen (cluster) und -superhaufen. Diese bewegen sich relativ zueinander auf Grund ihrer gravitativen Anziehung. Derzeit analysiert man die Verteilung von knapp einer Million Galaxien.

Die Leerräume entstanden in Bereichen, in denen in der Verteilung der Dichte die anfänglichen Unterschiede so gering waren, dass deren Bewegungen auf Grund der gravitativen Anziehung langsamer waren als die der kosmischen Expansion. Die Dichte der Leerräume wird auf etwa die Hälfte der mittleren Dichte abgeschätzt.

### A. Galaxiengruppen und Galaxienhaufen

Bei kleineren Ansammlungen von 50 Galaxien in einem Volumen mit einem Durchmesser von bis zu 10 Millionen Lichtjahren spricht man von Gruppen. Man unterscheidet poor group, 10 bis 60 Billionen Sonnenmassen, und rich group, bis 300 Billionen Sonnenmassen. In einer poor group variieren die Geschwindigkeiten ihrer Mitglieder 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 min-

destens 1300, vermutlich aber über 2000 Galaxien in einem Bereich von 9 Millionen Lichtjahren Durchmesser. Der Virgo-Galaxienhaufen ist 65 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. Die Galaxien in Haufen bewegen sich im gemeinsamen Schwerefeld, sie gelten als die größten gravitativ gebunden Strukturen. Die Masse des Virgo-Galaxienhaufens liegt bei etwas über einer Billion Sonnenmassen. Man erhält sie aus der Beobachtungen des Schwerefelds. Die Ausdehnung und damit die Masse wird festgelegt durch den Bereich, dessen Dichte die einer definierte Dichte übertrifft. Hier wählt man ein Vielfaches der kosmologisch relevanten kritischen Dichte, z.B. das 200-fache oder 500-fache, und spricht von  $M_{200}$  oder  $M_{500}$ . Übertrifft  $M_{200}$  den Wert von 0,3 Billionen Sonnenmassen, spricht man von Galaxienhaufen (-Cluster), deren Häufigkeit nimmt mit der Masse ab, 3 Billionen Sonnenmassen ist ein Maximalwert.

Charakteristisch für Galaxienhaufen ist ihr intergalaktisches Gas, der Halo aus Wasserstoff und Helium. Die Masse des Gases ist etwa fünfmal größer als die der Gesamtheit der Sterne des Haufens. Das Gas hat eine Temperatur von 10 bis 100 Millionen Grad, und emittiert Röntgenstrahlung entsprechend kurzer Wellenlänge. Die hohe Temperatur verhindert jede weitere Sternbildung. Die Intensität dieser Röntgenquellen entspricht der Masse des entsprechenden Galaxienhaufens und identifiziert diesen eindeutig. Ein Pionier der Röntgenbeobachtung war Riccardo Giacconi (Nobelpreis 2002). Ihm gelangen bereits 1962 mit Detektoren in Raketen 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 sehr rasch entstanden waren, aus der Verschmelzung noch junger Galaxien. Solche Prozesse kann man auch relativ nahe beobachten. Die irreguläre Galaxie NGC 6240 entstand vor 30 Millionen Jahren aus der Kollision zweier Galaxien mit einem hohen Anteil von Gas. Dies zündete ein Feuerwerk der Sternentstehung, man spricht von einem Starburst. Die Galaxie erscheint viel heller als andere gleicher Masse. Dementsprechend sind die beiden galaktischen Kerne, die sich derzeit in einem Abstand von 3.000 Lichtjahren umkreisen, hoch aktiv. Die Galaxie strahlt intensiv im gesamten Bereich, von Radiowellen bis zur harten Gammestrahlung. Bei der Bildung der elliptischen Galaxien waren diese Prozesse, der Starburst, noch intensiver, auch blieb keine Zeit, eine durch den Drehimpuls dominierte Scheibe zu bilden. Wegen Ihrer Leuchtstärke sind diese Quasare die fernsten beobachtbaren galaktischen Objekte. Diese fernsten galaktischen Objekte müssen in extrem kurzer Zeit entstanden sein. Dies zu verstehen, ist eine Herausforderung.

## 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! Die Bewegung der Kugelsternhaufen am Rande der Galaxis zeigen eine Masse der Galaxis von etwas über 1000 Milliarden Sonnenmassen. Diese lässt sich nur schwer allein aus der beobachteten Materie erklären. Seit Neuestem gibt es Messungen an kaltem Wasserstoffgas im Aussenbereich der Galaxien. Bei unserer Galaxis folgt aus den Umlaufgeschwindigkeiten, dass in einem Abstand von 10 Radien der Scheibe die gravitativ wirksame Masse etwa 10 mal größer ist als die beobachtete.

Eindeutig ist die Situation, wenn man Bewegungen von Galaxien um Galaxienhaufen berechnet. Für den Coma-Galaxienhaufen, etwa 400 Millionen Lichtjahre entfernt, stellte schon 1933 Fritz Zwicky eine extreme Diskrepanz fest und postulierte, dass die fehlende Masse in Form einer Dunklen Materie vorliegen müsse. Damals wurde das natürlich nicht akzeptiert. Auf Grund seiner Daten vermisste Zwicky einen Faktor 400. Die aktuellen Zahlen für die Beiträge zur Masse des Coma-Haufens (Boehringer) sind 87 Prozent Dunkle Materie, zu 11 Prozent Gashalo und 2 Prozent die sichtbaren Galaxien. Das intergalaktische Gas des Halo enthält schwere Elemente, vergleichbar der Sonne, jedoch ist ihr Anteil kleiner, er liegt bei einem halben Prozent.

Alle Beobachtungen heute passen zu der Aussage, dass in großskaligen Strukturen auf einen Teil gewöhnlicher Materie 5 bis 6 Teile Dunkler Materie kommen. Die Masse der gewöhnlichen Materie ist weitgehend durch die der Atomkerne bestimmt, deswegen spricht man zur Unterscheidung der gewöhnlichen von der Dunklen Materie von Baryonischer Materie. Es ist Konvention, mit dem Begriff Materie alles zusammenzufassen, was unter dem Einfluss der Gravitation seine Bewegung ändern und so räumlich konzentrieren kann.

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 Supersymmetrie. 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.

Deshalb durchdringen Teilchen Dunkler Materie Bereiche normaler oder Dunkler Materie ohne Energieverlust durch Streuung. Das unterscheidet sie grundsätzlich von normaler Materie. Bei letzterer führen Streuprozesse in bereits verdichteten Bereichen zum Einfang und somit zur weiteren Erhöhung der Dichte dieser Bereiche. Dunkle Materie hingegen kann von lokalen Bereichen erhöhter Dichte nur dann eingefangen werden, wenn die Masse des lokalen Bereichs während einer Durchlaufzeit zugenommen hat. Dann ist beim Herauslaufen das Feld der Gravitation größer als beim Hineinlaufen, sodass das passierende Teilchen kinetische Energie verliert. Übertrifft der Verlust an kinetischer Energie die kinetische Energie zu Anfang, so ist das Teilchen gefangen und vergrößert somit die Masse des lokalen Bereichs. Es handelt sich also um einen dynamischen, selbstverstärkenden Prozess. Die eingefangenen Teilchen Dunkler Materie durchlaufen das Gravitationsfeld des verdichteten Bereichs in periodischen Bahnen, ohne Dämpfung. Mit zunehmender Masse des verdichteten Bereichs wächst die Stärke des bindenden Potentials des Gravitationsfelds. Daraus folgt, dass im Zentrum des verdichteten Bereichs die kinetische Energie der Teilchen der Dunklen Materie breit gestreute Werte zeigen. Die Teilchen mit sehr kleiner kinetischer Energie sollten bereits sehr früh eingefangen worden sein, als der Bereich noch wenig Masse hatte, und die mit den größten kinetischen Energie erst zu einer Zeit, zu der die Masse bereits den aktuellen Wert hatte. Dies setzt voraus, dass die verdichteten Bereiche sich kontinuierlich entwickelt hatten. Sie bleiben ausgedehnt, da der Übergang von kinetischer Energie in thermische Energie entfällt. Ihr gravitatives Feld ist entscheidend für die Bildung von Galaxien und Galaxienhaufen. Die Dichte Dunkler Materie ist im Zentrum einer Galaxie maximal und fällt dann mit dem Abstand stark ab. Vergleicht man die Dichte im Zentrum mit der bei uns, so sollte sich diese um einen Faktor Hundert bis Tausend unterscheiden. In größeren Abständen sollte sie mit der dritten Potenz abnehmen.

### 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 verschiedenen Lichtquellen richtig zuzuordnen, so kann man für den Galaxienhaufen auf die Masse und näherungsweise auch auf deren Verteilung rückschließen.

Eine spektakulären Situation im Sternbild Carina, am Südhimmel, wurde berühmt: Ein Galaxienhaufen war fast frontal in einen zweiten, etwas größeren eingedrungen. Bei einer Geschwindigkeit von mehr als einem Prozent der Lichtgeschwindigkeit wirkte er dabei 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 dar für das heiße Gas, dem Plasma, aus dem die normale Materie in Galaxienhaufen überwiegend besteht. Die Stöße folgen der elektromagnetischen Wechselwirkung, die viel stärker ist als die gravitative. 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.

### D. Mittlere Eigenschaften

Der schwache Gravitationslinseneffekt wurde benutzt, um für mehreren Millionen Galaxien, die in Abständen von von bis zu 7 Milliarden Lichtjahren optisch vermessen wurden, die Verteilung ihrer Gesamtmassen zu untersuchen. Dabei gehen Modellierungen und statistische Methoden ein. Einschließlich der Dunklen Materie wird deren Mittelwert zu 2 Billionen Sonnenmassen bestimmt, bei den inaktiven, rot leuchtenden Galaxien beträgt er mehr als das Doppelte, bei den Sternentstehung zeigen-

den, blau leuchtenden, nur ein Drittel. Liegen Galaxien nahe beieinander, so sind diese im Mittel schwerer.

### VIII. 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

Damit gelang um 1929 die entscheidend wichtige Entdeckung, dass Galaxien sich von uns entfernen, und zwar um so schneller, je weiter sie weg sind. Als erster hatte dies wohl Abbé Georges Lemaitre realisiert. Er verknüpfte dies jedoch mit weitreichenden Schlussfolgerungen, sodass ihm vorgeworfen wurde, das Universum hätte mit einem >big bang< begonnen. Das entsprach nicht den damaligen Vorstellungen. Man dachte den Kosmos statisch. Die Entdeckung ist heute verbunden mit dem Namen von Edwin Hubble. Er bestimmte die Entfernungen von Galaxien und stellte fest, dass mit wachsenden Entfernungen die von Vesto Slipher und anderen gemessenen Rotverschiebungen entsprechend 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 deren Rotverschiebung einer Dehnung ihrer Wellenlängen um einen Faktor 7 entspricht.

Diese 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. Das gilt für jeden Abstand. Den Proportionalitätsfaktor bezeichnet man nach Hubble als Hubble-Konstante. Man sollte besser von einem Hubble-Parameter sprechen, da der der Proportionalitätsfaktor vom Alter des Kosmos abhängt. Nähme man vereinfachend die Expansion als zeitlich konstant an, so folgt aus Hubbles Gesetz, dass sich das ganze Weltall vor 13,8 Milliarden Jahren in einem sehr kleinen Volumen befunden haben sollte. Dies gibt zumindest eine Orientierung. 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 das Feld der Gravitation im Raum sich in Abhängigkeit von der Zeit entwickeln kann. Als Ausgangspunkt seiner Überlegungen wird gerne genannt, dass man das beschleunigte Steigen oder Fallen in einem Fahrstuhl als Änderung des eigenen Gewichts empfindet. Dies besagt, dass die Wirkung der Gravitation nicht zu unterscheiden ist von der Wirkung eines entsprechend beschleunigten Bezugssystems.

Dementsprechend wird in seiner Theorie der Gravitation eine Beziehung hergestellt zwischen der Verteilung der Masse, und damit jeglicher Form der Energie, und dem geometrischen Verhalten von Raum und Zeit. Man spricht gerne von einer 4-dimensionalen Raumzeit, die gekrümmt sein kann. Diese Theorie ist mathematisch sehr anspruchsvoll, und hat bis heute jeden Test bestanden. Die ersten Erfolge waren die Berechnung der sog. Periheldrehung des Planeten Merkur und die Ablenkung von Licht im Schwerfeld der Sonne. Die korrekte Beschreibung von Schwarzen Löchern und die

Abstrahlung von Gravitationswellen hatten wir bereits diskutiert. Das Funktionieren der GPS-Systeme zur Ortsbestimmung ist eine weitere Bestätigung. Besonders wichtig wird die Allgemeine Relativitätstheorie zur Beschreibung des Kosmos in seiner Gesamtheit.

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 bedeutet zum Einen, dass der physikalische Begriff des Raums nur durch den Zusammenhang mit Materie gegeben ist. So wäre es sinnlos, sich in einen absolutem Raum als Zuschauer zu denken, von dem aus man das Schauspiel der Expansion des Kosmos wie auf einer Bühne ansehen kann. Zum Anderen definiert das Friedmann-Modell einen Anfang. Diese absolut extreme Vorstellung von einem Anfang wird heute 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, nicht aber die Gravitationsenergien. Um die Expansion des Kosmos zu beschreiben muss man wissen, wie die zum jeweiligen Zeitpunkt vorliegende Energiedichte sich mit der Expansion ändert. Nimmt man einen gewissen, 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. In der Begriffsbildung der Thermodynamik wird das Verhältnis von Energieabnahme und Volumenvergrößerung als Druck bezeichnet. Dementsprechend wird in den Friedmann-Gleichungen der Kosmos beschrieben durch Energiedichte und 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 Strahlungsfeld. Bei diesem nimmt die im expandierenden Volumen eingeschlossene Energie ab, dementsprechend ist der Druck positiv und gleich einem Drittel der Energiedichte. Die Auswirkung der Kosmologischen

Konstante, einer von Einstein formal eingeführten Größe, welche die Raumzeit modifiziert, kann auch beschrieben werden durch eine Energiedichte die während der Expansion konstant bleibt. Dieses Verhalten bringt man mit dem Begriff der Dunklen Energie in Verbindung. Falls deren Energiedichte während der Expansion konstant bleibt, nimmt die Dunkle Energie im expandierenden Volumen zu, sie wäre dann proportional zum Volumen. Diesem ungewöhnlichen Verhalten entspricht formal ein Druck mit negativem Vorzeichen, wobei der Betrag des Drucks gleich ist dem der Energiedichte. Dieser Grenzfall wird als de Sitter Universum beschrieben. 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 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 zueinander 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. Gäbe es nur die Dunkle Energie, dann wäre die Hubble-Konstante von der Zeit unabhängig, auf Grund des Strahlungsfelds und der Materie nimmt sie mit der Zeit ab.

Zum zeitlichen Verlauf der Expansion des Raums sagen die Friedmann-Gleichungen, dass sie für Kalte und für relativistische Materie verzögert ist, 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 mit der Zeit 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, sollte irgendwann nur noch die Dunkle Energie übrig bleiben. Dementsprechend sollte einer Phase verzögerter Expansion der Übergang in eine Phase beschleunigter Expansion folgen, sodass man dazwischen

einen Bereich weitgehend konstanter Expansion zu erwarten hat.

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 Quellen 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 68 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. Es gibt also die individuellen Effekte auf Grund der (Pekuliar-) Bewegung der Galaxien im Raum, und zusätzlich den kosmischen Effekt, bei dem im expandierenden Raum Quelle und Empfänger als ruhend (comoving) angenommen werden. Die kosmische Expansion ist gleichbedeutend mit Rotverschiebung.

Der beobachtete Faktor, um den die Wellenlänge des Lichts dabei zugenommen hat, ist exakt gleich dem Faktor, um den seit der Zeit der Emission des Lichts die Längenausdehnung des Raums zugenommen hat.

## IX. DIE KOSMISCHE HINTERGRUNDSTRAHLUNG

Die zweite experimentelle Beobachtung, die in allen Details zur Physik eines expandierenden Universums passt, ist die Beobachtung einer Kosmischen Hintergrundstrahlung im Mikrowellenbereich (der cosmic microwave background, CMB). 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 den umgekehrten Vorgang, eine fortlaufende Erniedrigung der Temperatur. Geht man jedoch gedanklich in der Zeit zurück, lässt man also den Raum schrumpfen, so steigen die Temperaturen. Dementsprechend ist das Entstehen strukturierter Materie die Folge der Abkühlung und einer damit verknüpften Zeitskala. Dieser Annahme folgend wurde erwartet, dass bei den hohen Temperaturen einer frühen Zeit die Atomkerne von der Atomhülle getrennt waren. Sie bildeten ein Plasma, ein Gas aus Ionen, Elektronen und Lichtquanten (Photonen) im thermodynamischen Gleichgewicht. In diesem durch elektrische Kräfte wechselwirkendem Medium wirkte der thermische Druck jeder lokalen Konzentration von Materie entgegen. Signifikante lokale Konzentrationen konnten sich erst entwickeln nach dem Verschwinden des Plasmas.

Dies sollte bei einem Absinken der Temperatur auf etwa 3000 Grad geschehen, der Zahlenwert ergibt sich aus Abschätzungen der Dichte. Dann verbanden sich die letzten, noch freien Atomkerne mit den Elektronen des Plasmas zu den elektrisch neutralen Atomen des Wasserstoffs. Neutrales Helium gab es schon etwas früher.

Im Plasma streuen die Lichtquanten an den ungebundenen Elektronen. Mit dem Verschwinden des Plasmas, d.h. der Bindung aller Elektronen an die Atomkerne, findet diese Streuung nicht mehr statt. Nun breiteten sich die Lichtquanten ungehindert aus, das Universum wurde erstmals optisch transparent. Dazu sagt man: die thermische Strahlung entkoppelte von der Materie. Diese Lichtquanten sehen wir heute emittiert von den Orten ihrer letztmaligen Streuung. Und wir sehen nur die Orte ihrer letzten Streuung. In ihrer Gesamtheit erscheinen sie als eine diffuse, leuchtenden Oberfläche des Plasmas, wie in einer Leuchtstoffröhre. Zeitlich früher freigesetzte

Lichtquanten liegen tiefer, sie erreichen uns nicht mehr direkt. So bildet diese zeitliche Oberfläche des Plasmas den Horizont unserer optischen Beobachtungsmöglichkeit. In ihm sehen wir dieses frühe Stadium, vor 13,8 Milliarden Jahren, 380 000 Jahre nach dem Anfang. Die so beobachtete Materie befindet sich heute auf Grund der Expansion des Kosmos in einer Entfernung von etwa 50 Milliarden Lichtjahren. Gäbe es die Dunkle Energie nicht, wäre dieser Abstand etwas geringer, etwa 40 Milliarden Lichtjahre. Wegen dieses Horizontes können wir prinzipiell nur diejenigen Bereiche des Raums sehen, die heute weniger als 50 Milliarden Lichtjahre entfernt sind, und dies jeweils zu dem Zeitpunkt, der durch die Laufzeit des Lichts bestimmt ist.

Die nachfolgende Expansion führte zu einer kräftigen Rotverschiebung des Spektrums. Dies war bereits um 1940 die Einsicht derjenigen Physiker, die darüber nachgedacht hatten. Allerdings scheuten sie sich dies auch entsprechend zu publizieren. So kam es, dass 1964 Penzias und Wilson (Nobelpreis 1978) diese Kosmische Hintergrundstrahlung, ohne Wissen von der Vorhersage, eher zufällig entdeckten beim Test einer Antenne für Mikrowellenstrahlung.

Inzwischen ist die Kosmische Hintergrundstrahlung von mehreren speziell konzipierten Satelliten mit extremer Präzision vermessen worden. Es zeigt sich, dass wir uns als Teil der Milchstraße mit einer Geschwindigkeit von 2 Promille der Lichtgeschwindigkeit bewegen relativ zu einem Raum, der durch die allseitig auf uns einfallende Kosmische Hintergrundstrahlung definiert ist. Das passt auch zu aktuellen Messungen der Anziehung der Galaxis durch Bereiche dicht liegender Galaxienhaufen wie etwa dem Großen Attraktor. Man hat auch gelernt, auf Störeffekte von dazwischenliegenden Lichtquellen zu korrigieren. Dann bleibt ein Spektrum, das mit hoher Genauigkeit dem einer berechneten thermischen Strahlung bei 2,72 Kelvin entspricht. Ordnet man diesem Spektrum als Quelle das 3000 Grad heiße Plasma zu, so ergibt sich 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 dies grundlegende Gesetz gehen neben

der Temperatur nur die Lichtgeschwindigkeit und das Plancksche Wirkungsquantum ein, beides fundamentale Naturkonstanten. Das Gesetz ist abgeleitet aus den Vorstellungen eines thermodynamischen Gleichgewichts von Strahlung mit Materie und aus einer Quantisierung des elektromagnetischen Strahlungsfelds.

Einstein erkannte, dass im Planckschen Strahlungsgesetz ein Produkt dargestellt ist 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. Das entspricht den Regeln der Thermodynamik für die Verknüpfung von Energiedichte und Druck mit der Expansion. 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 kosmische Expansion umgekehrt proportional sind.

Vergleicht man heute die Anzahldichte der Photonen in der Kosmischen Hintergrundstrahlung mit der Anzahldichte von Nukleonen, d.h. aller Protonen und Neutronen, einschließlich der in Atomkernen gebundenen, und mittelt man über große Skalen, so erhält man einen Faktor von einigen Milliarden! Geht man nun in der Zeit immer weiter zurück, so steigt die Energie der Photonen ins Grenzenlose. Dies besagt, dass in früherer Zeit das Strahlungsfeld den Energieinhalt dominierte. Solange der Kosmos noch keine 5.000 Jahre alt war übertraf die Strahlungsenergie die Ruhenergie der materiellen Teilchen insgesamt. Zur Diskussion physikalischer Prozesse vor diesem Zeitpunkt ist die Temperatur als die relevante Größe anzusehen. Daraus folgt ein einfaches zeitliches Verhalten: Einer Abnahme der Temperatur um einen Faktor 2 entsprach eine Zunahme des Alters um einen Faktor 4. Man kann sich noch merken, dass bei einem Alter das Kosmos von einer Sekunde die Lichtquanten eine mittlere Energie von 1 MeV hatten, und dass ein Volumen von einem Kubikzentimeter auf Grund des Strahlungsfelds eine Masse von etwa 500 kg hatte, wozu die Protonen und Neutronen mit nur 0,2 Gramm beitrugen.

### B. Quantitative Aussagen über den Kosmos

Die Kosmische Hintergrundstrahlung zeigt wie der Kosmos aussah im Alter von 380.000 Jahren. Die Messungen von Satelliten erfassen alle Richtungen des Raums. Sie ergeben das sehr wichtige Resultat, dass in allen Himmelsrichtungen die Temperatur gleich ist. Mit hoher Genauigkeit sind auch Abweichungen von

der Gleichverteilung gemessen wurden. Sie liegen im Bereich unterhalb von hundertstel Prozenten. Diese beiden Aussagen sind die experimentelle Basis einerseits für unsere Vorstellung von einer homogenen Verteilung der Materie im Kosmos zum damaligen Zeitpunkt, und sind andererseits Ausgangspunkt aller Überlegungen zur Strukturbildung. Die beobachtete geringe Variation der Temperatur hat ihren Grund in lokalen Variationen sowohl der Dichte des Plasmas als auch des Gravitationspotentials, das im wesentlichen von der Verteilung der Dunklen Materie bestimmt ist.

Das beobachtete Muster der Abweichungen wirkt wie zufällig. Um es physikalisch zu diskutieren, analysiert man das Auftreten von heisseren und kälteren Bereichen in einer statistischen Analyse. Diese bezieht sich auf die Abweichungen der Temperaturen vom Mittelwert, und fragt nach konzentrischen Strukturen: Dazu multipliziert man diese Abweichungen für jeweils zwei Orte in einem vorgegebenem Winkelabstand. Das Produkt ist positiv, wenn beide Abweichungen gleiches Vorzeichen haben, beide positiv oder beide negativ, und es ist negativ, wenn beide Abweichungen verschiedene Vorzeichen haben. Anschließend mittelt man über alle Orte mit diesem Winkelabstand. Sind die Abweichungen statistisch gestreut, so ist als Mittelwert Null zu erwarten, verbirgt sich in ihnen eine gewisse Ordnung, so ist der Wert von Null verschieden. Da wir hier Winkelabstände analysieren, ist ein endlicher Wert dieser Autokorrelationsfunktion sensitiv für die Existenz von sphärischen Ordnung in der Temperaturverteilung. Und das Begeisternde ist, dass die Daten sphärische Ordnungen tatsächlich zeigen!

Um diese physikalisch zu interpretieren, erzeugt man aus ihnen durch geeignete Gewichtung mit sphärischen Funktionen (vergleichbar einer Fourieranalyse) ein "Leistungsspektrum". Die Gewichtung betont Winkelbereiche, die in ihrer Ausdehnung proportional sind zu dem Winkel, der die jeweilige Gewichtung kennzeichnet. So kann man breite Verteilungen von engen unterscheiden. Das Leistungsspektrum zeigt einen nahezu konstanten Beitrag, dem bei kleineren Winkeln, beginnend bei einem Bogengrad, eine Folge von mehreren Maxima überlagert, in abnehmender Stärke. Diese Ergebnisse großer wissenschaftlicher Teams unter Leitung von George Smoot und John Mather (Nobelpreis 2006) ermöglichen weitreichende Aussagen über Struktur und Entwicklung des Kosmos. Deren Daten wurden durch die europäische Mission «Planck» weiter bestätigt und präzisiert.

Die beobachtete Verteilung folgt aus dem Geschehen der ersten 380.000 Jahre. Sie hat ihren Ausgangspunkt in den Inhomogenitäten der Dichte, die in der Physik des Urknalls begründet sind. Das Geschehen danach war bestimmt von dem Anwachsen des Horizonts, denn nur innerhalb des Horizonts ist die Gravitation wirksam. Dabei reagierten die lokal unterschiedlichen

Energiedichten der Dunklen Materie, des Plasma und der Neutrinos ganz verschieden:

Am einfachsten war das Verhalten der Neutrinos, diese entfernten sich, ohne weitere Wechselwirkung, mit Lichtgeschwindigkeit. Das elektromagnetische Strahlungsfeld hingegen wechselwirkte mit dem Plasma aus Elektronen, Wasserstoff- und Heliumkernen, und bildete mit diesem ein elastisches Medium. In diesem dominierte die Energiedichte des Strahlungsfelds, und bestimmte den Druck, der einer ungleichmäßigen Verteilung entgegenwirkt. Interessant wurde es, als auf Grund der Expansion die Temperatur so weit abgenommen hatte, dass die Energiedichte des Plasmas - Masse und Energie seien äquivalente Größen - kleiner wurde als die Energiedichte der Dunklen Materie. Das geschah nach etwa 5000 Jahren, nun begann die Dunkle Materie sich auf die Bereiche erhöhter Dichte hin zu bewegen, und diese dort zu verstärken. Auf diese Weise nahm bis zum Ende der Plasmaphase, d.h., nach 380.000 Jahren, die relative Stärke dieser Inhomogenitäten der Dunklen Materie um einen Faktor 30 zu. Es zeigt sich, dass diese proportional zur Expansion der Abstände im Raum erfolgt, sodass im expandierenden Raum die Tiefe der anfänglichen Töpfe des Gravitationspotential in seiner Stärke erhalten bleibt. Dies bedeutet auch, dass die beobachtete Kosmische Hintergrundstrahlung aus Bereichen starker gravitativer Anziehung zu größeren Wellenlängen hin verschoben ist, sie erscheint als kälter. Dieser Beitrag des Gravitationspotentials zur beobachteten Temperatur der Strahlung wird als Sachs-Wolfe Effekt bezeichnet.

Die tatsächliche Temperatur des Plasmas war bestimmt durch seine Dichte. Diese wurde durch Transportprozesse innerhalb des Horizonts beeinflusst. Das Plasma strömt zu den Gravitationszentren, und reagiert auf den sich dort erhöhenden Druck als elastisches Medium. So wurden die Gravitationszentren zu Quellen von akustischem Schall, der sich in einer Wellenfront mit nachfolgenden Minima und Maxima ausbreitet. Diese nachfolgenden Minima und Maxima entsprechen den Oszillationen der Plasmadichte im jeweiligen zentralen Bereich. Diesen Vorgang bezeichnet man als baryon acoustic oscillation. Die Schallgeschwindigkeit folgt aus Dichte und Elastizität. Da das Strahlungsfeld dominierte, ist der Wert bekannt. Ohne Korrekturen für die ionisierte Materie war diese gleich der Lichtgeschwindigkeit, dividiert durch die Quadratwurzel von 3. Die Strecke, die der Schall in den 380.000 Jahren zurücklegen konnte, stellte für das Plasma einen Reichweite dar. Sie war bestimmt durch die Schallgeschwindigkeit, die Laufzeit und die Expansion des Raums. Nach dem Ende dieses Vorgangs hatte man erhöhte Dichte und Temperatur in den Gravitationszentren, auf Grund der dort konzentrierten Dichte Dunkler Materie, und in den zugehörigen konzentrischen Zonen auf Grund der Ausbreitung des Schallfelds. Im Leistungsspektrum erscheint die Reichweite der Plasmawelle im Winkelbereich des ersten akustischen Peaks,

bei etwa einem Bogengrad. Die abnehmende Stärke des Leistungsspektrums zu sehr kleinen Winkeln hin versteht man Silk Effekt. Ursache ist unter anderem die langsame Auflösung des Plasmas, sodass der Zeitpunkt der letzten Streuung eines Lichtquants erheblich variiert.

Das Leistungsspektrum lässt sich berechnen. Es folgt aus der Annahme einer anfänglichen, primordialen Verteilung, und den überlagerten Effekten der Ausbreitung des Schallfelds. Dabei zeigt sich, dass die anfängliche statistische Verteilung der Energiedichte, das ist der Zusammenhang von Stärken und Abständen, nahezu skaleninvariant ist, und dass die die Anteile von Dunkler Materie und normaler Materie relativ zum Strahlungsfeld dem entspricht, was wir bereits diskutiert hatten. Dazu kommt die Dunkle Energie, parametrisiert als Kosmologische Konstante. Das gemessene Leistungsspektrum zeigt eine ausgeprägte Struktur, und bestimmt die genannten Größen verblüffend präzise. (Planck-Mission, PJ 12 19, 2013) Skaleninvarianz ist eine spezielle Form von fraktalen bzw. selbstähnlichen Mustern. Sie bedeutet, dass die Verteilung, statistisch gesehen, in jedem Maßstab als gleich erscheint. Verknüpft man dies mit der Vorstellung einer extremen Expansion des sehr frühen Kosmos, so passt dies zu einer Vorstellung, dass die zugrunde liegenden, anfänglichen, statistisch verteilten, sphärischen Verteilungen in einheitlicher Weise und einheitlicher Größe und Stärke erzeugt wurden, aber zu verschiedenen Zeitpunkten.

Betonen sollte man, dass die beobachtete Verteilung der kosmischen Strahlung unter Winkelabständen größer als einem Bogengrad nicht von Ausgleichsvorgängen beeinflusst ist. Die entsprechenden Inhomogenitäten der Materie existierten bereits im sehr frühen Kosmos. Um dies seinem Auditorium richtig deutlich zu machen, sagte der Entdecker George Smoot, er «habe in das Auge Gottes gesehen».

Dem ersten akustischen Peak entsprach zum damaligen Zeitpunkt ein Abstand, den man physikalisch versteht. Damit beinhaltet die Beobachtung des akustischen Peaks die Beobachtung eines Dreiecks kosmischer Dimension. Die Frage ist nun, ob die Seiten dieses Dreiecks geradlinig sind oder gekrümmt. Ein Dreieck auf dem Globus etwa, bestehend aus einem Stück Äquator und zwei Meridianen, die sich im Pol schneiden, hat eine Winkelsumme von mehr als 180 Winkelgraden. Ursache dafür ist die (zur Kugel) gekrümmte Fläche des Globus. Wäre der Raum gekrümmt, eine Option der Allgemeinen Relativitätstheorie, so würde sich das Licht auf gekrümmten Bahnen bewegen. Die Analyse der Daten zeigt, dass der Raum flach ist im Sinne der Euklidischen Geometrie. Dies jedoch beinhaltet eine Verknüpfung der Expansionsgeschwindigkeit des Raums mit seiner Energiedichte. Nun ist der Anteil der Normalen als auch der Dunklen Materie, relativ zur Anzahl der Photonen des Strahlungsfelds, bekannt (aus

Stärke und Form der akustischen Maxima und Minima), und es stellt sich die Frage, ob deren Summe gleich der Energiedichte eines euklidisch flachen Raums ist. Der Fehlbetrag macht heute 68 Prozent der gesamten Energiedichte aus. Wir bezeichnen ihn als Dunkle Energie ohne zu wissen was Dunkle Energie ist. Sie ergibt sich als Konsequenz der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die genaue Bestimmung ihres Anteils hängt davon ab, was man für ihr zeitliches Verhalten annimmt. Der genannte Zahlenwert folgt für einen zeitlich konstanten Wert der Energiedichte. Dies hatte Einstein als formale Option seiner Theorie erkannt, und von einer kosmologischen Konstanten gesprochen. Die hier genannten Beobachtungen primärer Kenngrößen des kosmischen Systems gelten als gesichert.

Fasst man diese Daten mit Messungen zur Hubble-Konstante zusammen so ergibt sich für den Kosmos ein Alter von ungefähr 13,8 Milliarden Jahren. Zur Hubble-Konstanten kann man hier noch anmerken, dass eine besonders genaue Messung über den Gravitationslinsen-Effekt gelang, der von zwei nahe beieinander liegenden Galaxienhaufen erzeugt wird: Von einer weit entfernten Quelle, deren Helligkeit mit der Zeit variierte, wurden vier Bildflecken identifiziert. Diese zeigten Unterschiede in der Laufzeit von etwa einem Monat. So konnten Geometrie und Entfernung rekonstruiert werden, und aus der Rotverschiebung der Quelle folgt die Hubble-Konstante.

### C. Strukturbildung im expandierenden Kosmos

Wie hängen nun die Eigenschaften der beobachteten Hintergrundstrahlung mit der beobachteten Verteilung der Galaxien zusammen? Mittelt man über sehr große Räume, 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 Häufungen, ein Netz von Filamenten und riesige Leerräume.

Die Gravitationsfelder sind durch das Verhalten der Dunklen Materie dominiert, denn es gibt fünf mal mehr Dunkle Materie als normale. Auch begann die Konzentration der Dunklen Materie früher, da die Einschränkungen auf Grund des Drucks des Strahlungsfelds entfielen. Zum Zeitpunkt der Auflösung des Plasmas wich die Dichte der Dunklen Materie, die sich in den jeweiligen Zentren gesammelt hatte, bereits um bis zu einem Promille vom Mittelwert ab. Für die Verteilungen des Plasmas war dieser Wert um einen Faktor Hundert kleiner. Nach der Auflösung des Plasmas folgte die Materie den lokalen Gravitationsfeldern, so wie diese sich auf Grund der immer stärker konzentrierenden

Dunklen Materie einstellen. Auf Grund der gegenseitigen Abhängigkeit war diese Strukturbildung ein sich selbst verstärkendes Geschehen, das zunehmend größere Bereiche erfasste, und auch heute noch nicht beendet ist. Das Muster der anfänglichen Inhomogenitäten der Dunklen Materie ist skaleninvariant. Das bedeutet, dass diese Konzentrationprozesse in Skalen ganz unterschiedlicher Größe erfolgten. Dabei war wesentlich, dass dies in einem expandierenden Kosmos geschah, in dem während langer Zeit die Geschwindigkeit der Expansion abnahm, bis schliesslich die Dunkle Energie dominierte. In der Konkurrenz von Auseinanderlaufen, auf Grund der Expansion des Raums, und von Zusammenziehen, auf Grund der lokalen Felder, gab es für jeden dieser Bereiche einen Zeitpunkt, ab dem das Zusammenziehen die Expansion überwog, der Bereich koppelte von der kosmischen Expansion ab. Innerhalb dieser Bereiche konzentrierte sich die Materie durch wechselseitige Anziehung lokal weiter. Die außerhalb dieser Bereiche verbliebene Materie hatte sich auf immer weiter expandierende Volumina zu verteilen und dünnte entsprechend aus.

Für die Dunkle Materie ist der Spielraum zu hoher Konzentration eingeschränkt auf die Wandlung von potentieller Energie in kinetische und umgekehrt, wie bei einem Pendel ohne Dämpfung. Bei normaler Materie hingegen folgt der Wandlung in kinetischen Energie die in thermische. Wird diese durch Strahlung abgegeben, schreitet der Konzentrationsprozess weiter fort bis sich die hochkompakten sphärischen Verteilungen bilden, aus denen Sterne entstehen. Bei der Dunklen Materie hingegen bleibt es bis heute beim ewigen Wechselspiel von potentieller und kinetischer Energie. Dementsprechend ergeben sich für die Dunkle Materie keinesfalls die extrem hohen Konzentrationen von normaler Materie. In Clusterskalen ist sie nur 200 mal größer als die kritische Dichte (Börner). Die Dunkle Materie konzentriert sich in Fäden, die ein Netzwerk bilden, und häuft sich in dessen Knotenpunkten an. Entsprechend der anfänglichen Skaleninvarianz haben wir eine Überlagerung dieser Strukturen in ganz unterschiedlichen Größen. Die massereichsten dieser Knoten Dunkler Materie waren die natürlichen Ausgangspunkte der Bildung von Galaxienhaufen, und die masseärmsten die von Kugelsternhaufen. Aufgrund des bleibend dynamischen Verhaltens der Dunklen Materie haben wir einen Prozess der fortlaufenden Bewegung. Stoßen solche Bereiche zusammen, so ist dies zunächst ein gegenseitiges Durchlaufen, so als wäre nichts geschehen, jedoch bewirken die Gravitationsfelder eine Bahnablenkung. Sind diese sehr inhomogen, unterscheiden sich benachbarte Bahnen in ihrer Ablenkung, und es bilden sich entsprechend neue Strukturen. Die Verschmelzung von anfangs sehr vielen, eher massearmen Bereichen zu wesentlich wenigeren, doch massereicheren, wird als hierarchischer Prozess bezeichnet. In diesem behalten die anfänglich massearmen Bereiche noch lange ihre Identität, dies gilt insbesondere

für die Verteilung der Geschwindigkeiten. Dies wird in Modellrechnungen, etwa der sogenannten Millenniums-Simulation der Garching Astrophysiker, im Detail nachvollzogen. Dieser Vorgang gilt als verstanden. In diesen lokalen Konzentrationen der Dunklen Materie strukturierte sich die normale Materie. Hierbei spielen Sternentstehung, Supernovae und schwarze Löcher eine Rolle. Deswegen besteht in einer Galaxie keine strikte Proportionalität zwischen der Masse von normaler Materie und Dunklen Materie.

Zu den hierarchischen Prozessen kommt der kontinuierliche Zufluss aus Bereichen niedriger Dichte. Für den Bereich, der von der Erde passiert wird, geben Abschätzungen eine Massendichte der Dunklen Materie an, die einem Wasserstoffatom auf drei Kubikzentimetern entspricht.

Die beobachtete Verteilung von Galaxienhaufen bestätigt diese Vorstellungen. Galaxienhaufen sind die Orte stärkster Konzentration Dunkler Materie, hier laufen viele Filamente zusammen. In unserem Umfeld, in einem Bereich mit einer Rotverschiebung von weniger als 20 Prozent, kennt man fast alle Galaxienhaufen, es sind knapp 2000. Deren Orte werden mit statistischen Methoden analysiert, sodass man für deren räumliche Verteilung ein "Leistungsspektrum" erhält, ähnlich wie für die Kosmische Hintergrundstrahlung. Der Vergleich mit Simulations-Rechnungen, in denen verschiedene Annahmen für die Zusammensetzung des Energieinhalts des Kosmos miteinander verglichen werden, unterstützen die Parameter des Standardmodells. Eine vollständige Beobachtung aller Galaxienhaufen erwartet man von den aktuellen Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung bei höchster Winkelauflösung, denn deren Lichtquanten zeigen nach der Streuung an den Elektronen eines heißen intergalaktischen Plasmas eine im Mittel erhöhte Energie (Sunyaev-Zel'dovich Effekt). Die Auswertung dieses Effekts ist auch eine notwendige Korrektur der beobachteten Hintergrundstrahlung.

In den Verteilungen der Galaxien wird auch die Schallausbreitung im anfänglichen Plasmas sichtbar, die mit der Auflösung des Plasmas geendet hatte. Dementsprechend sind die ursprünglichen Zentren der Schallausbreitung umgeben von einer Hülle geringfügig erhöhter Dichte. Dies ist eine Kugelschale, deren Radius der Laufstrecke des Schalls entspricht. Da Bereiche erhöhter Dichte Ausgangspunkt verstärkter Galaxienbildung waren, erhält man für die Anzahldichte von Galaxien als Funktion des Abstands eine Korrelation. Analog zum akustische Peak in der Kosmologischen Hintergrundstrahlung spricht man von einem baryon-akustischem Peak in der Anzahldichte der Galaxienverteilung. Der Radius dieser nur schwach ausgeprägten Korrelation liegt heute bei knapp 500 Millionen Lichtjahren, eine Folge der kosmischen Expansion. Dies sind Maßstäbe bekannter Länge im Raum. Gelingt es diese auch in großem Abstand zu beob-

achten, so können wir an ihnen unsere Vorstellungen über die Expansion des Raums in der Zeit direkt überprüfen.

#### D. Die ersten Sterne, Entstehung der Galaxien

Die ersten Sterne, man spricht von denen der Population III, entstanden nach etwa 200 Millionen Jahren in Bereichen besonders hoher Konzentration Dunkler Materie. In diesen traf Gas auf Grund der Beschleunigung durch das Schwerefeld mit sehr hohen Geschwindigkeiten aufeinander, bei ihrer wechselseitigen Abbremsung entstanden Temperaturen, bei denen Wasserstoff und Helium im kurzwelligen Ultraviolett Wärmeenergie abgestrahlt konnten, sodass Sternbildung einsetzte. Die ersten Sterne begannen mit einer Masse von zumindest mehreren 100 Sonnen. Entsprechend schnell brannten sie ab, und endeten nach wenigen Millionen Jahren als Schwarze Löcher oder als gigantische Supernovae:

In Sternen von mehr als 250 Sonnenmassen war die Temperatur so hoch, dass die durch Fusion gebildeten schwereren Elemente wieder desintegrierten. Das bedeutet, dass im Innern dieser Sterne keine Energie mehr freigesetzt wurde, die abgestrahlte Energie führte zur Kontraktion, die kein Ende hatte. Es gab keinerlei Explosion, die Systeme endeten als entsprechend massereiche Schwarze Löcher.

Für Massen kleiner als 250 Sonnenmassen waren die Temperaturen geringer, sodass Fusion bis hin zu Nickel erfolgen konnte. Jedoch wurde in Systemen mit Massen knapp unter 250 Sonnen im Zentrums die Temperatur so hoch, dass die Gammastrahlen des thermischen Felds Elektron-Positron Paare erzeugten. Es stellte sich ein Gleichgewicht zwischen Gammastrahlung und Elektron-Positron Paaren ein. Diese Erzeugung von Ruhemasse reduzierte den thermischen Druck, und löste damit den Kollaps aus. Dies geschah nach der Bildung von Kohlenstoff und Sauerstoff, in der Phase des Kollaps durchlief das System wie bei einer Supernova vom Typ Ia den thermonuklearen Fusionsprozess bis hin zu Nickel und Eisen. Auf Grund der freigesetzten Energie und der Schnelligkeit des Prozesses endete dies in einer Explosion, bei der kein Restkern verblieb. Mit großer Geschwindigkeit wurden einige zehn Sonnenmassen an Nickel und Eisen ausgestoßen. Man spricht hier von Supernovae auf Grund der Paar-Instabilität. Voraussetzung für diese Art von Supernova ist, dass das anfängliche Material frei ist von schweren Elementen. Man glaubt, dass auch heute noch die Kompression großer Bereiche von primordialem Gas in nahen Zwerggalaxien realisiert sein kann, und erklärt so die Beobachtung einer Supernova im Jahr 2007 (SN 2007bi) mit vergleichbaren Eigenschaften.

In den abgesprengten Hüllen der Supernovae gab es, erstmals im Universum, die schwereren Elemente. Dieses

Material bewegte sich entgegen der Richtung des Schwerefelds, das durch die Dunkle Materie vorgegeben war, und der damit verbundenen Richtung des einströmenden Gases. So ergaben sich turbulente Strömungsmuster und verdichtete Bereiche ausserhalb des Zentrums des Schwerefelds. Diese wurden zu weiteren Zentren von Sternentstehung.

Man hebt gerne hervor, dass mit diesen ersten Sternensystem eine dunkle Zeit von etwa 200 Millionen Jahren, andere sagen 400 Millionen Jahre, Es "wurde Licht" im Kosmos. Und verbunden damit war die Ionisation des umgebenden Gases, man spricht von Reionisation. Über die Intensität der 21 cm Linie misst man den Anteil des verbliebenen atomaren Wasserstoffs.

Die ersten Sterne entstanden in Bereichen besonders starker Konzentration Dunkler Materie. Zu diesen blieb der weitere Zufluss an Materie besonders groß. Mit dem verstreuten Material der Hüllen begann, etwa 500 Millionen Jahre nach dem Urknall, die Entstehung von Sternen der zweiten Generation, der sogenannten Population II. Die dem Gas beigemischten schwereren Elemente ermöglichten nun die Abstrahlung von Wärme bereits bei niederen Temperaturen, und damit die Bildung kleinerer Sterne. Damit begann ein Feuerwerk an Sternentstehung und Supernovaexplosionen. Diese Phase war vor etwa 10 Milliarden Jahren abgeschlossen. Sie endete, weil das für die weitere Sternbildung verbliebene Gas zu heiss geworden war. Diese heute sehr alten Sterne entstanden in Bereichen ganz unterschiedlicher Größe. Die sehr alten Sterne zeigen in ihrer Hülle nur relativ wenige schwere Elemente, vorwiegend sogenannte Alpha-Kerne, die in einer Sterneneration früher nach der Fusion von Helium, Kohlenstoff und Sauerstoff mit den äußeren Schalen weggeblasen wurden.

Die Galaxien damals waren kompakte Systeme, mit einer rasch abfallenden Dichteverteilung. Interessant ist, dass es vor etwa 10 Milliarden Jahren viele galaxienartige Bereiche aus Wasserstoff mit der Masse von typisch einer Milliarde Sonnen gab, in denen noch keine Sternbildung stattgefunden hatte. Man findet sie auf Grund ihrer Beleuchtung durch Quasare. Die heutigen, aus den Quasaren hervorgegangenen elliptischen Galaxien sind wesentlich ausgedehnter und massereicher, sie bildeten sich ab dieser Zeit durch Zufluss von Materie von Außen.

Dies war Zufluss von Gas, Kugelsternhaufen und Galaxien. Dabei wurde das Gas in den Galaxien so heiss, dass die Sternbildung endete. In dem turbulenten Szenario akkretierte das zentrale Schwarze Loch Materie in großem Umfang. Die akkretierten alten Sterne bilden den massereichen, ausgedehnten äußeren Bereich der riesigen elliptischen Galaxien. In den Spiralgalaxien entspricht deren ausgebauchter zentrale Bereich (Bulge) einer elliptischen Galaxie geringerer Masse. Für alle diese elliptischen Systeme steht ihre Masse einem festen

Verhältnis, von etwa tausend zu eins, zur Masse des zentralen Schwarzen Lochs.

Nur in der Scheibe von Spiralgalaxien gibt es Sternbildung aufgrund von zugeströmtem kaltem Gas. Die jungen Sterne koexistieren mit den alten Sternen aus den akkretierten Kugelsternhaufen, die ihre Identität weitgehend verloren haben. Diese alten Sterne sehen wir auch im Halo sowie in der dicken Scheibe, sowie in den heute noch vorhandenen, räumlich getrennten Kugelsternhaufen. Etwa 60 Prozent aller Sterne findet man in diesen alten, sphärischen Systemen.

Die riesigen elliptischen Galaxien finden wir in den Zentren von Galaxienhaufen. Man geht davon aus, dass in der sehr intensiven Phase der Sternbildung in den ersten Milliarden Jahren so viel Energie frei gesetzt wurde, dass aus allen diesen Systemen das restliche Gas weitgehend fortgeblasen wurde. Das heute beobachtete Gas ist später eingeströmt. Dabei wurde die Gravitationsenergie in thermische gewandelt. Wegen der geringe Dichte ist diese bis heute nur teilweise abgestrahlt worden, sodass wir heute das intergalaktische Gas im Röntgenbereich sehen. Für jede weitere Sternbildung war das Gas zu heiss. In allen elliptischen Galaxien findet sich im Zentrum ein supermassereiche Schwarzes Loch. Die Schnelligkeit ihrer Bildung ist Gegenstand der Forschung. So wird in einer 13 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie von einem Schwarzen Loch von von 2 Milliarden Sonnenmassen berichtet. Eine so kurze Zeitskala weist darauf hin, dass es einen Auftakt gegeben haben muss mit einem direktem Kollaps von Gas zu einem «mittelschweren» Schwarzen Loch von einigen hunderttausend Sonnenmassen.

Deutlich anders ist die Situation bei Spiralgalaxien. Diese bildeten sich in Bereichen deutlich geringerer Konzentration Dunkler Materie. Mit der Erzeugung der Population II Sterne im zentralen Bereich sind Supernovae, Jets, und starke Erhitzungen verbunden, sodass viel Gas abgestoßen wurde. Dies betrifft den Bulge der Galaxie. Die Scheibe entstand aus anschließend zugeströmtem Material aller Art, dies reicht von Gas bis zu Kugelsternhaufen. Abschätzungen sprechen von einem komplexen Muster gleichzeitigen Zu- und Abfließens. Die Galaxie und der intergalaktische Raum stehen in einem dynamischen Bezug zueinander. Die jüngeren Sterne unsere Galaxie entstanden aus zugeströmtem intergalaktischem Gas. Dies Gas mit eine beträchtliche Konzentration an schwereren Elementen verdichtet sich, kühlte durch Strahlung ab und ging in Teilbereichen in den molekularen Zustand über. Aus diesem bildeten sich die Sterne der Population I, zu denen auch unsere Sonne gehört. In der Scheibe heute hat das interstellare Gas eine Masse, die im Vergleich zur Masse der bereits gebildeten Sterne nur etwa ein Fünftel beträgt. Sehr interessant sind Messungen, denen zufolge die Masse der Dunklen Materie, die der Galaxis zugeordnet

wird, wohl zumindest doppelt so groß sein soll als auf Grund der Masse der Sterne und des interstellaren Gases zu erwarten wäre. Dies würde zeigen, dass durch den späteren Massezufluss, aus welchem die Scheibe hervorging, der Masseverlust an erhitztem Gas in der Population II Phase noch nicht ausgeglichen worden ist. Fasst man das alles zusammen, so versteht man auch, dass die derzeitige Rate der Sternentstehung um eine Größenordnung geringer ist als vor etwa 10 Milliarden Jahren.

Mit dem Hubble Satelliten-Teleskop gelangen sogenannte Deep Field Aufnahmen in drei ausgewählten Bereichen. In diesen schaut man in Tiefen von bis zu 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. Die Wellenlänge der von ihnen emittierten Strahlung ist auf Grund der nachfolgenden Expansion des Kosmos sehr stark gedehnt und erfordert spezielle Detektoren. Entsprechend hoch ist die Erwartung an neue Teleskope auf Satelliten. Der aktuelle Rekord liegt in der Beobachtung einer Galaxie, bei der die Wellenlänge des Licht um das 8,5 fache vergrößert ist. Es wurde 600 Millionen Jahre nach dem Urknall emittiert.

Die Angaben der Entfernungen von Galaxien und damit auch von Alter beruht auf gemessenen Rotverschiebungen und auf der Modellierung des Ablaufs der kosmologischen Expansion.

## X. DIE ERSTE HALBE STUNDE

Eine dritte Beobachtung, die das Modell der kosmischen Expansion 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. Um deren Verlauf darzustellen, beginnen wir mit Temperaturen, die weit oberhalb der Energien lagen die uns an Teilchenbeschleunigern zugänglich sind. Expansion bedeutete Abnahme der Energiedichte und als Folge davon Abkühlung. Die Temperatur gibt an die mittlere Energie pro Freiheitsgrad. Ihr Verlauf resultiert aus dem jeweils sich einstellendem thermodynamischen Gleichgewicht. Damit ist gemeint, dass ein System bei vorgegebener Energiedichte maximaler Entropie hat: Alle Zustände, die das System bei vorgegebener

Energie einnehmen konnte, sollten gleich wahrscheinlich realisiert sein. Dabei ist der Begriff des Zustands durch die Quantenmechanik definiert. So kann man, im Prinzip, die Zahl der Zustände als Funktion der Energiedichte abzählen, das Verhältnis dieser beiden Größen bestimmt die Temperatur. Diese Definition der Temperatur verlangt eine ausreichend große Zahl von Wechselwirkungen. Falls eine vorhandene Teilchenart an diesen Wechselwirkungen nicht mehr teilnahm, sodass ihre Zustände sich nicht mehr änderten, so bildete diese ein thermodynamisch unabhängiges System.

Während der Expansion änderten sich sowohl die Temperatur als auch die Zusammensetzung der Materie. Bei sehr hohen Temperaturen lagen die elementaren Teilchen, die drei Familien der Quarks und Leptonen (Elektronen, Neutrinos), und ihre Antiteilchen, frei vor in dem Strahlungsfeld, welches die Wechselwirkungen vermittelt. Dies bestand aus den Feldquanten der Starken, Schwachen und Elektromagnetischen Wechselwirkungen, das sind die Gluonen, die W und Z Bosonen, und die Photonen. Man spricht von einem Quark-Gluon-Plasma. Mit der Temperatur nahm die Dichte der Feldquanten, ebenso wie die Dichte der Teilchen-Antiteilchenpaare, ab. Verbunden damit waren Phasenübergänge: Quarks und Leptonen aus Familien mit hoher Masse zerfielen durch Schwache Wechselwirkung in solche mit kleiner Masse, freie Quarks und Gluonen verbanden sich zu Protonen oder Neutronen, die Z-Bosonen zerfielen in Neutrino-Antineutrino-Paare, die W-Bosonen, entsprechend ihrer elektrischen Ladung, in Elektron-Antineutrino-Paare oder deren Antiteilchen, und die Elektron-Antielektron-Paare in zwei Photonen. Die bei jedem dieser Phasenübergänge frei gesetzten Energien bewirkten eine Zunahme der Temperatur, diese war ihrer kontinuierlichen Abnahme überlagert. Die Phasenübergänge erfolgten bei Temperaturen, die sich aus den jeweils frei gesetzten Energien bestimmten. Mit sinkender Temperatur wurde die Symmetrie von gleich viel Protonen und Neutronen verschoben zu Gunsten der Protonen, da diese um etwa ein Promille leichter sind.

Bei einem kosmischen Alter von 0.2 Sekunden war die Dichte so weit gefallen, dass Reaktionen von Neutrinos unwahrscheinlich wurden. Dies hatte wichtige Konsequenzen. Die Neutrinos verblieben auf Grund des Fehlens weiterer Wechselwirkungen in ihren Zuständen. Das besagt, dass sie sich ab diesem Zeitpunkt verabschiedet hatten aus dem thermodynamischen Gleichgewicht. Danach nahm ihre Energie ab allein auf Grund der Expansion des Raums. Das Ausbleiben von Reaktionen mit Neutrinos beendet auch das eben beschriebene thermodynamische Gleichgewicht von Protonen und Neutronen. Den weiteren Verlauf bestimmte nun der radioaktive Zerfall von Neutronen zu Protonen, mit einer Halbwertszeit von etwa 10 Minuten.

Nach einem kosmischen Alter von etwa einer Sekunde war

die Energie des Strahlungsfelds nicht mehr ausreichend, Elektron-Antielektron-Paare zu bilden. Die Elektron-Antielektron-Paare verschwanden, sie zerfielen in zwei Photonen. Dieser Phasenübergang bewirkte eine signifikante Zunahme der Zahl der Photonen. Danach blieb ihre Anzahl konstant. Nach diesem Phasenübergang gab es Milliarden mehr Photonen als Protonen und Neutronen. Alle Energien, die von diesen in nachfolgenden Reaktionen freigesetzt wurden, waren jedoch klein verglichen mit der Energie des Strahlungsfelds, sodass sie dessen Temperatur nicht beeinflussten. Sie folgte allein dem Gesetz der Expansion. Da die Neutrinos vor der Elektron-Antielektron-Annihilation freigesetzt wurden, ist deren Temperatur um einen Faktor 1,4 niedriger.

#### A. Die primordiale Elementsynthese

Die freien Protonen und Neutronen wurden gebunden durch die Starke Wechselwirkung, bevorzugt zu Kernen des Heliums. Diese sind mit zwei Protonen und zwei Neutronen besonders stabil. Die Reaktion dazu erfolgte jedoch in Schritten. Dabei erwies sich der erste Schritt als ein Flaschenhals, der den zeitlichen Ablauf beherrschte. Da Systeme aus nur zwei Protonen oder nur zwei Neutronen nicht stabil sind, bestand der erste Schritt immer in der Verbindung eines Protons mit einem Neutron. Die so gebildeten Kerne des schweren Wasserstoffs, Deuterium, sind jedoch vergleichsweise schwach gebunden. Bei hohen Temperaturen wurden sie so schnell dissoziiert, dass weitere Reaktionsschritte hin zum Drei- und Vier-Nukleonensystem keine Rolle spielten. Dies änderte sich erst, als die Temperatur unter den Wert von einer Milliarde Grad gefallen war, nach etwa 100 Sekunden. Die weiteren Reaktionen waren dann so schnelle Prozesse, dass die verbliebenen Neutronen rasch gebunden waren. Somit wurden die Kerne des Heliums innerhalb einer sehr kurzen Zeitspanne erzeugt. Ihre Anzahl entspricht dem Verhältnis von freien Neutronen zu Protonen zu diesem Zeitpunkt, den viel zitierten 3 Minuten. Die Teilchendichte des Gases damals war bereits niedrig, sie lag unterhalb der eines Gases bei Zimmertemperatur und Atmosphärendruck. Die Energiedichte jedoch war riesig, denn diese blieb noch lange von den Photonen (und Neutrinos) dominiert.

Die Bildung der Heliumkerne beinhaltet das Zusammenfügen der elektrischen Ladungen von zwei Protonen gegen ihre elektrische Abstoßung. Dies wurde durch die rasch sinkende Temperatur erschwert, sodass Reste von Deuterium und des radioaktiven Tritiums im Promille Bereich und darunter verblieben. Noch viel stärker unterdrückt war die Bildung der nächst schwereren chemischen Elemente. Verstärkt wurde dies durch den Umstand, dass alle Kerne der Massezahl 5 oder 8 instabil sind. Somit hatte sich nach etwa 30 Minuten die primordiale Elementhäufigkeit eingestellt.

Unter Verwendung von Labordaten wird die primordiale Elementsynthese rechnerisch nachvollzogen. Mit den Daten zur Materie- und Photonendichte aus der Kosmischen Hintergrundstrahlung und mit unseren Vorstellungen über das zeitliche Verhalten der Expansion folgt die Vorhersage von vier 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.

## XI. ÜBERLEGUNGEN ZUM ANFANG

Der Ablauf in den ersten Minuten und die Zeit danach gilt seit langem als gesichert. Will man die Zeit davor physikalisch diskutieren, dann 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, oder ein Neutrino und sein Antineutrino. 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 heute in der Materie vorhandenen Quarks und Leptonen um viele Größenordnungen übertraf, schätzungsweise um einen Faktor von einer Milliarde. Dies zeigt die immense Energiedichte des damals alles beherrschenden Strahlungsfelds. Dieses bestand nun aus Photonen, den freien Feldteilchen der Elektromagnetischen Wechselwirkung, und aus Gluonen, den Feldteilchen der Starken Wechselwirkung. Diesen Zustand bezeichnet man als Quark-Gluon Plasma. Zu diesem kamen dann noch die Feldteilchen der Schwachen Wechselwirkung. Waren diese aufgrund entsprechend hoher Temperaturen freigesetzt, so war die Reichweite der Schwachen Wechselwirkung nicht mehr eingeschränkt, vielmehr wurde sie in ihrer Stärke mit

der Elektromagnetischen vergleichbar. Man spricht vom Elektro-Schwachen Phasenübergang.

Der Energieinhalt des Kosmos war umso größer, je weiter wir in der Zeit zurück denken. Verständlich wird diese Aussage nur, wenn man sich klar macht, dass dieser Energieinhalt im Gleichgewicht stand zu der potentiellen Energie, die sich aus der Gravitation ergab. Diese Beiträge zur Energie addierten sich näherungsweise zu Null. Dabei zeigt sich die potentielle Energie der Gravitation als Quelle des Energieinhalts des Universums.

Damals war die Energie des Strahlungsfelds, zusammen mit den paarweise erzeugten Teilchen/Antiteilchen um sehr vieles größer als die Ruhe-Energie der Gesamtheit aller Elementarteilchen, aus denen die Materie heute besteht. Diese riesige Zahl der Teilchen-Antiteilchen-Paare lässt die Zahl der Teilchen, die nach der Vernichtung übrig geblieben sind, als minimal erscheinen, als nahezu vernachlässigbar.

Dies ist nun ein weiterer ganz wichtiger Punkt. Die von den Kosmologen diskutierten Konzepte der Bildung des Kosmos gehen aus von einer völlig symmetrischen Anfangssituation, entsprechend der des Strahlungsfelds, und führen dann die Annahme ein, dass der minimale Überschuss an Teilchen sich im Rahmen der kosmischen Evolution erst entwickelt hat, auf Grund einer Wechselwirkung, welche diese Symmetrie bricht. In der Tat beobachtet man bei bestimmten Mesonen radioaktive Zerfälle, welche diese Teilchen/Antiteilchen-Symmetrie verletzen. Dies zeigt, dass es die uns bekannte Physik erlaubt, einen Vorgang dieser Art anzunehmen. Jedoch ist die aus diesem Mesonzerfall abgeleitete Stärke nicht ausreichend um diesen, für die Kosmologie entscheidend wichtigen Vorgang, auch quantitativ zu beschreiben. Diese Frage ist ein aktuelles Ziel der Forschung von Teilchenphysikern und Kosmologen. Es besteht eine Art von Konsens, dass dieses Problem sich lösen wird.

Alle weiteren Überlegungen zum Anfang gehen über den Rahmen der heute gesicherten Physik hinaus. Sie haben zu erklären, was physikalisch gesichert: Die Homogenität und Isotropie des beobachteten Universums, die Fluktuationen fraktaler Struktur als Ausgangspunkt der Strukturbildung, und die extrem hohen Temperaturen in früher Zeit. Die Gegebenheit, bzw. das Ereignis, ab dem aus dieser Situation heraus alles weitere Geschehen folgt bezeichnet man heute zuweilen als «hot big bang». Einen Zeitpunkt dafür kann man nur aus dem Geschehen davor ableiten.

Konsistent mit der Allgemeinen Relativitätstheorie möchte man die Entstehung beschreiben als einen kontinuierlichen Prozess, auch wenn die Zeitskala dafür extrem eng ist. Alles hat als kausal bedingt zu folgen. Man geht aus von möglichst einfachen Verhältnissen am Anfang, sodass alle die spezifischen Eigenschaften der Ma-

terie und der Wechselwirkungen erst in der Folge entstanden sind. Dies ist ein natürliches Konzept, denn bei den höchsten Temperaturen sind Unterschiede aufgrund der Masse der elementaren Teilchen oder der Masse der elementaren Quanten der Wechselwirkung bedeutungslos. Erst mit der Abnahme der Temperatur wurden diese signifikant.

### A. Das Horizontproblem

Aus jeder Überlegung zum Beginn des Universums muss folgen, dass der Kosmos in seinem großskaligen Verhalten homogen ist. Es geht also um die Frage: woher kommt die Isotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung? Kausal begründen kann man diese nur, wenn es eine Situation gegeben hat, in der alle diese Bereiche sich in physikalisch bedingter Wechselwirkung befunden hatten. In der Vorstellung von einem Kosmos, der vom Anfang an verzögert expandierte, ist dies jedoch nicht möglich. Vom anfänglichen Plasma, das wir über die Kosmische Hintergrundstrahlung beobachten, wissen wir bereits, dass die akustischen Wellen maximal solche Strecken zurückgelegt hatten, die wir heute unter einem Abstand von nur einem Bogengrad sehen. Demnach sollten alle größeren Bereiche unverbunden sein. Da die Geschwindigkeit der akustischen Wellen von der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit war, kann man dies als Aussage für jede Art von Wechselwirkungen nehmen.

Um diese Frage einzuordnen, vergleichen wir drei verschiedene Arten der Expansion. Dabei wird der Begriff des Horizonts entscheidend. Das Hubble'sche Gesetz sagt, dass alle Bereiche des Raums sich von einander entfernen, und deren Geschwindigkeiten relativ zueinander proportional sind zu den Entfernungen. Wenn nun, von einem bestimmten Ort aus gesehen, diese Geschwindigkeiten größer werden als die des Lichts, so sind von diesem Ort aus Ereignisse dort grundsätzlich nicht mehr wahrzunehmen. Man sagt, diese Bereiche liegen hinter dem Horizont. Man bezeichnet diesen Abstand als Hubble-Radius. Ereignisse hinter dem Horizont können auf diesen Ort nicht mehr einwirken, und umgekehrt. Je schneller die Expansion, desto kleiner der Raum innerhalb des Horizonts.

Nimmt man etwa an, dass mit der Expansion des Raums die Energiedichte des Universums sich gerade so änderte, dass die Geschwindigkeiten der Expansion zeitlich konstant bleibt, dann würde der Horizont immer den gleichen Bereich des expandierenden Raums umfassen. Falls wir uns die Galaxien als schon immer existierende Objekte als ruhend im Raum denken, dann bliebe die Anzahl der sichtbaren Galaxien, innerhalb des Horizonts, während der Expansion konstant.

Nimmt man hingegen an, dass mit der Expansion des

Raums die Energiedichte stark abnimmt, dann wäre die Expansion verzögert, wie wir diskutiert hatten. Bei einer Reise in die Vergangenheit würden die Fluchtgeschwindigkeiten der fiktiven Galaxien immer größer, und der Horizont würde entsprechend schrumpfen: Alle diese Galaxien würden zunehmend hinter dem Horizont verschwinden.

Ein anderer Grenzfall wäre die Situation einer konstanten Energiedichte, wie sie formal durch eine kosmologische Konstante beschrieben werden kann. Dies de Sitter Universum 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 wäre in der Vergangenheit in immer kleinere, physikalisch nicht verbundene Bereiche vereinzelt. Man bezeichnet dies als das Horizontproblem.

Die Lösung des Problems sieht man darin, dass die zunächst hohen Geschwindigkeiten der Expansion entstanden sind in einer voraus gegangenen Phase beschleunigter Expansion. Statt eines instantanen Urknalls denkt man an einen graduellen Prozess, in welchem der Verzögerung eine Beschleunigung vorausging. Aus diesem Gedanken heraus entstand um 1980 das Modell der Inflation. Dieses theoretische Modell erklärt jedoch deutlich mehr als nur die Isotropie. Um dies alles in den richtigen Zusammenhang zu stellen, wird zuvor auf einfache Überlegungen zu einem Anfang im eigentlichen Sinne Bezug genommen.

### B. Planck-Skala, der Anfang

Aus der durch Beobachtungen gesicherten Annahme eines homogenen und isotropen Universums folgt auf Grund der Allgemeinen Relativitätstheorie als Anfang eine Singularität: alle Abstände des Raumes sind Null. Diese mathematisch formale Aussage widerspricht dem physikalischen Denken. Zunächst einmal setzt sie voraus, dass alle elementaren Teilchen ohne räumliche Ausdehnung, punktförmig, sind. Das entspricht der experimentellen Kenntnis, jedoch erfasst diese nicht in die hier angesprochenen Größenordnungen. Man kann es eher so sehen, dass die Kosmologie hier eine Aussage macht über Eigenschaften elementarer Teilchen. Es bleibt die grundsätzliche Frage, wie kleine Dimensionen sind physikalisch noch sinnvoll? Hierbei sind Gravitations- und Quantenphysik angesprochen. .

Auch wenn wir noch keine Theorie haben, die Allgemeine Relativitätstheorie und Elementarteilchen-Physik vereint, macht man gerne einfache Abschätzungen: Die Quantenmechanik und Heisenbergs Unschärferelation besagen, dass bei extremer Beschränkung des Raums der Impuls und damit die Energie in diesem Raum sehr groß wird. 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. Ein Gedankengang dieser Art führt zu einer Länge von  $10^{-35}$  m. Diese betrachtet man als den kleinsten, physikalisch noch sinnvollen Wert für die Angabe eines Abstands. In die Berechnung gehen ein die Konstanten der Gravitation, der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie. Diese Länge, die sich ausschließlich aus fundamentaler Physik bestimmt, bezeichnet man 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,  $10^{19}$  GeV, und die davon abgeleitete Energiedichte, welche extrem hoch ist,  $10^{32}$  K (D. Lüst), wenn man in die Temperatur eines fiktiven Strahlungsfelds übersetzen würde.

### C. Inflationäre Expansion

Das Modell der Inflation geht davon aus, dass es zu Anfang, aus nicht verstandenen Gründen, einen sehr kleinen Bereich gab mit Energiedichten in der Größenordnung der Planck-Skala. Manche sehen in der Erzeugung dieses anfänglichen Bereichs eine Art von Quantenfluktuation von Feldern oder von Objekten, die wir nicht kennen. Modellmäßig beschrieben werden nur die Vorgänge nach dem Anfang. Die Expansion des anfänglichen Bereichs folgt den Gesetzen der Allgemeinen Relativitätstheorie. Entscheidend ist nun die Annahme, dass sehr bald nach dem Anfang ein Feld wirksam wurde, dessen Energiedichte nur wenige Größenordnungen kleiner war als die Planckdichte, und dass diese Energiedichte sich für eine gewisse Zeitdauer der Expansion nur wenig änderte. Diese näherungsweise Konstanz der Energiedichte dieses Feldes, ein ganz eigenartiges Verhalten, ist die zentrale Aussage des Inflationsmodells. Manche stellen sich vor ein skalares Feld mit einer Energiedichte entspricht einer quantenmechanischen Nullpunktsenergie, nur sehr hoch. Deswegen wird dieses Feld als metastabil oder als falsches Vakuum bezeichnet. Ihm entspricht eine Raum-Zeit Dynamik, wie sie eine kosmologische Konstante erzeugen würde, die jedoch nur für eine gewisse Zeitspanne wirksam ist. Dem sehr hohen Wert der Energiedichte entspricht eine extreme Schnelligkeit

der Expansion mit näherungsweise konstant bleibender Beschleunigung, wir hatten dies beim Friedmann Modell der Allgemeinen Relativitätstheorie als de-Sitter Universum kennengelernt. Die Phase der Expansion, in der die Energiedichte so langsam abnahm, dass sie näherungsweise noch wie eine Konstante erscheint, wird als "slow roll" bezeichnet. Danach folgte der Übergang diese Energiedichte in ein Strahlungsfeld sehr hoher Temperatur. Aus diesem gingen die uns bekannten Elementarteilchen hervor. Der Übergang wird als auch als "reheating" bezeichnet. Früher wurde zuweilen von einem Phasenübergang gesprochen. Aus einem sehr einfachen, möglicherweise quantenmechanisch geordneten Zustand entstand ein wesentlich komplexerer, Entropie war zugenommen. Formal erfasst man dies, indem die Potentielle Energie des Feld von einer Feldgröße abhängt, die als dynamische Variable zu betrachten ist, sodass der zeitlichen Ablauf durch die Abhängigkeit der potentiellen Energie von der Feldgröße und durch die kinetische Energie, auf Grund der Änderung der Feldgröße bestimmt ist. Letztere erfordert die Definition eines Trägheitsparameters. Der Übergang von Slow roll zu Reheating entspricht dem Übergang von hoher, nahezu feldunabhängiger potentieller Energie zu minimaler Feldenergie bei gleichzeitigem Anwachsen der kinetischen Energie. Die freigesetzte thermische Energie im Phasenübergang entspricht der kinetischen. Je nach Modell können auch mehrere Feldgrößen in die Theorie eingehen.

Die Phase des reheating stellt den heißen Urknall (den hot big bang) dar, und mit ihr beginnt die verzögerte Expansion. Mit abnehmender Temperatur wurde die Physik der elementaren Teilchen und ihrer Wechselwirkungen relevant. Dies alles ist eine Beschreibung des Anfangs, keine Erklärung, denn wir kennen weder die physikalische Natur des Felds der inflationären Phase noch die Gründe für das Ende dieser Phase. In Berechnungen mit Modellen hat man in irgendeiner Form die Abnahme der Energiedichte am Ende der inflationären Phase zu parametrisieren.

Die Inflation ist Ursache dafür, dass sich aus einem mikroskopisch klein gedachtem Beginn ein Kosmos entwickelt, der sehr viel größer ist als der heute beobachtbare. Den Kosmos in der Gesamtheit können wir nicht beschreiben, wir haben uns auf den uns zugänglichen und vergleichsweise kleinen Ausschnitt zu beschränken. So erledigt sich das Problem einer Krümmung des Raums: Das beobachtete euklidische Verhalten ergibt sich aus der einfachen Tatsache, dass ein sehr kleiner Bereich eines insgesamt irgendwie gekrümmten Raums immer noch als geradlinig erscheint. Der in der inflationären Phase neu erzeugte Energieinhalt ist riesig, verglichen mit dem davor. Da dieser homogen verteilt ist, sind etwaige räumliche Inhomogenitäten des Anfangs so stark verdünnt, dass der beobachtbare Kosmos als homogen erscheint. Weiterhin wurden exotische Teilchen, die bei den Energiedichten der Planckskala möglicherweise

erzeugt worden sind, räumlich so stark getrennt, dass sie allein schon deswegen heute nicht zu beobachten sind.

Der Energieinhalt des Kosmos entstand in dieser Phase der Inflation gemeinsam mit dem Feld der Gravitation. In der Sprache der Newtonschen Mechanik heben sich der Energieinhalt des Kosmos und das Feld der Gravitation gegenseitig auf. Wir haben also ein Entstehen beinahe aus dem Nichts, verursacht durch die Eigenschaften des Anfangs, dem die Rolle eines Keims, eines Katalysators, zukommt. Energiedichte, Gravitation und Expansion des Raums sind untrennbar miteinander verkoppelt. Das, was im verzögert expandierenden Kosmos als Feinabstimmung von Energiedichte und Expansion angesehen werden mag, ist somit Folge und nicht Ursache.

#### D. Kosmische Quantenfluktuationen

Für die beschleunigte Expansion nimmt man extrem hohe Werte an. Dann war das physikalische Geschehen an einem bestimmten Ort nur noch von seiner unmittelbaren Umgebung bestimmt. Alles, was nach sehr kurzer Zeit, auf Grund der beschleunigten Expansion des Raums, hinter dem Horizont mit Lichtgeschwindigkeit verschwand, konnte nicht mehr auf diesen Ort zurückwirken.

Wichtig ist, dass dieser Horizont, der Hubbleradius, eine Längenskala vorgibt, in der die Heisenbergsche Unbestimmtheitsbeziehung relevant wird: Die Quantenmechanik erlaubt es einem System, kurzzeitig in einen anderen Zustand überzugehen und dabei die Forderung nach Erhaltung der Energie zu verletzen. Die Verletzung der Energieerhaltung darf dramatisch sein, sofern nur die Zeitdauer der Verletzung entsprechend kurz ist. Beobachtbare Effekte ergeben sich nur dann, wenn die Rückkehr des Systems in den ursprünglichen Zustand verhindert ist. Auf diese Weise versteht man, z.B. in der Quantenelektrodynamik, die beobachteten Wechselwirkungen: Elektrisch geladene Teilchen erzeugen ständig Feldquanten, die sich anschliessend an diesen wieder vernichten. Nur wenn die Vernichtung des Feldquants an einem anderen elektrisch geladenen Teilchen erfolgt, wird eine Wechselwirkung vermittelt. Diese wird sichtbar, weil der Impuls des Feldquants von einem Teilchen auf das andere übertragen wird. Im Fall der Inflationären, d.h. beschleunigten Expansion geht es um Bereiche, welche die Erhaltung der Energie verletzen, aber den Horizont überschreiten. Für diese wird die Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands unmöglich.

Im Inflationären Feld sind Quantenfluktuationen Fluktuation der Feldgröße, die ihrerseits Fluktuationen der Energiedichte bewirken. Wichtig ist, dass die Fluktuation der Feldgröße den Horizont überschreitet.

Im Rahmen der Allgemeinen Relativitäts-Theorie ist eine Quantenfluktuationen der Energiedichte äquivalent einer lokalen Fluktuation der Metrik von Raum und Zeit .

Wir betrachten Fluktuation der Metrik, die im Raum ruhen, und mit diesem expandieren. Ihre Stärke ist gemäß der Heisenbergschen Unbestimmtheits-Relation verknüpft mit ihrer zeitlichen Dauer. Energetisch sehr starke Fluktuationen existieren nicht lang genug, um den Horizont zu überschreiten, dementsprechend haben sie keine Folgen. Den Horizont überschreiten nur solche Fluktuationen, deren Energie unter einem Wert liegt, der allein von der Größe des Horizonts bestimmt ist. Wichtig ist, dass ausserhalb des Horizonts die relativen Stärken der Fluktuationen der Metrik, und damit der Energiedichte, erhalten bleiben. Dies ist eine generische Folge des Modells ( Mukhanov, Seite 334). Dies ist eine verblüffende Aussage, sie besagt, dass die Zunahme des Energieinhalt des Universums auf Grund der Inflation die relativen Stärken der Fluktuationen nicht verdünnt!

Soweit der Horizont zeitlich konstant ist, bleiben auch die Stärken der Fluktuationen, die diesen überschreiten, konstant. Nimmt jedoch während der Inflationären Phase die Energiedichte des Inflationären Felds mit der Zeit etwas ab, so wächst der Horizont mit der Zeit, und entsprechend schwächer sind die ihn zeitlich später verlassenden Fluktuationen.

Im nachfolgenden Übergang zur verzögerten Expansion blieb die relative Stärke der Fluktuation der Metrik erhalten, sie bleibt verbunden mit der räumlichen Verteilung der Energiedichte. Nun hat diese aber innere Freiheitsgrade, und konnte so ihre eigene Entwicklung nehmen, die wir als Entwicklung des Universums kennen. Quantenmechanisch mikroskopische Strukturen gingen über in makroskopisch kosmologische, und bestimmten die Entwicklung des Universums.

Fluktuationen ruhen im Raum. Heute unterscheiden sich solche aus früheren Zeitpunkten von denen aus späteren durch ihre räumlichen Ausdehnungen, entsprechend der nachfolgenden Expansion des Raums. Ihre Stärken zeigen nur geringe Abweichungen von einer Skaleninvarianz, einer besonders einfachen statistische Verteilung. Mittlerweile ist es aus der Analyse der Kosmischen Hintergrundstrahlung gelungen, für die zeitlich späteren Fluktuationen die erwartete, etwas geringere Stärke nachzuweisen: der „Spektralindex“ ist etwas kleiner als eins. Im Rahmen des skizzierten Modells zeigt diese Abweichung, dass die Energiedichte des inflationären Felds mit der Feldgröße geringfügig abnahm. Die Anzahl der erzeugten Fluktuationen pro Zeit ist als freier Parameter des Modells anzusehen. Modelliert man die anschließenden, gravitativ ablaufenden ersten Konzentrationsprozesse bis zum Zeitpunkt der Emission der Kosmischen Hintergrundstrahlung, so erhält man die dort beobachtete Verteilung der Korrelationen. Dies betrifft die beobachteten Winkelbe-

reiche kleiner als ein Bogenrad. Sie gehen hervor aus Quantenfluktuationen zu eher späteren Zeitpunkten, und sind durch die beschriebenen (s.o.) Ausgleichsprozesse im Plasma modifiziert. Die beobachteten Strukturen in Winkelbereichen größer als ein Bogenrad hingegen zeigen die Quantenfluktuationen zu früheren Zeitpunkten der inflationären Phase, ohne Modifikation. Sie zeigen die relative Stärken, wie sie damals erzeugt wurden, kurz nach der Planckzeit. Ein faszinierender Aspekt!

### E. Gravitationswellen?

Aus der inflationären Phase sollten nicht nur Quantenfluktuationen der Dichte, sondern auch Quantenfluktuationen der Gravitation hervorgegangen sein. Beim Überschreiten des Horizonts, dem Hubble radius, stellten sich beide dar als Fluktuationen der Metrik, wobei die Quantenfluktuationen der Dichte im expandierenden Raum ruhten, während die der Gravitation sich mit Lichtgeschwindigkeit als Welle im Raum ausbreiteten. Die Symmetrie der Dichtefluktuationen war sphärisch symmetrisch, die der Gravitationswellen quadrupolar. Die Quantenfluktuation der Gravitation entspricht der Erzeugung von Gravitationsquanten, von Gravitonen.

Inzwischen gibt es erste Hinweise auf die Beobachtung von Quantenfluktuationen der Gravitation, der Gravitationswellen. (Ich folge Dominik Schwarz in Physik Journal 13, Nr. 5, 16-17 (2014)). Dies ist interessant, weil das Leistungsspektrum der Gravitationswellen ein direktes Maß ist für die Energiedichte bei der Erzeugung (Starobinski, 1979). Beobachtet wird es über die lineare Polarisation der Kosmischen Hintergrundstrahlung.

Lineare Polarisation entsteht auf Grund von Gradienten der Temperatur. Längs eines konzentrischen Kreises um einen heißen Punkt zeigt die Polarisation in tangentialer Richtung, um einen kalten Punkt in radialer Richtung. Diese bei Punktspiegelung symmetrischen E-Moden wurden beobachtet. Die Gravitationswellen erzeugen auf Grund ihrer quadrupolaren Anisotropie auch B-Moden, die bei Punktspiegelung antisymmetrisch sind. Diese sollten in Kreisen mit dem Durchmesser von 1 Winkelgrad und mehr besonders ausgeprägt sein. Das BICEP2 Experiment kündigt an, diese beobachtet zu haben. Das wäre eine Bestätigung einer Energiedichte (?) von  $10^{16}$  GeV, nur 3 Größenordnungen unter der Planck Skala, und gleich dem Wert, der für eine große Vereinheitlichung genannt wird. Allerdings kann der Effekt vorgetäuscht werden durch Gravitationsfelder auf dem Weg zu uns, denn diese wandeln lineare Polarisation im E-Mode in den B-Mode. Mit zunehmend kleineren Beobachtungswinkeln unterhalb 1 Grad wird dieser Effekt als dominant beobachtet.

Für die Inflation folgt aus der Anpassung an die experimentellen Daten die Annahme eines sehr frühen

Zeitpunkts und einer sehr kurzen Zeitdauer dieser insgesamt extrem schnellen inflationären Expansion. Sie umfasste eine Ausdehnung um mindestens 30 Größenordnungen. In der dann anschließenden Phase der verzögerten Expansion hatte sich der Raum bis heute um mindestens weitere 30 Größenordnungen gedehnt.

Das Konzept der Inflation kann man als ein minimalistisches Modell auffassen. Es erklärt in konsistenter Weise die Homogenität und die Isotropie des beobachteten Kosmos, das Euklidische Verhalten des Raums und insbesondere die Quantenfluktuationen, den Ausgangspunkt aller Strukturbildung. Die aktuelle experimentelle Forschung sucht nach Abweichungen von den einfachsten Modellannahmen.

### F. Zum Konzept

Die anfängliche Situation war bestimmt durch Gravitation und Quantenphysik. Wir haben keine Theorie, die beides umfasst, somit ist der Begriff der Planck Skala eine pauschale Umschreibung. Da mit dem Anfang auch Raum und Zeit entstanden, kommt natürlich die Frage auf, ob auch diese Begriffe quantenhafte Struktur haben, ob sie aus einem Ansatz folgen. Jedenfalls hatte die anfängliche Situation im Bereich der Planck Skala die Eigenschaft, das inflationäre Feld hervorzubringen. Das die Daten erfolgreich beschreibende Konzept eines inflationären Felds führt zu theoretischen Fragen, die offen sind. So entsteht die Frage, ob das Entstehen eines Universums mehrfach erfolgt, ob es noch weitere Universen gibt. Letztlich wird es darum gehen Wege aufzuzeigen, um Aussagen dieser Art potentiell falsifizieren könnten.

Aus dem Inflationären Feld entstand die uns heute bekannte Materie. Dieser Vorgang zeigt Eigenschaften eines Phasenübergangs. Wie dieser Prozess im Einzelnen abläuft ist eine der großen Fragen. Danach gab es nur noch solche Prozesse der Wandlung, die wir physikalisch nachvollziehen können.

Diese Vorstellungen zum Anfang werden als notwendig angesehen um die Eigenschaften des so Entstandenen zu verstehen. Man kann dies als ein induktive, bottom-up Strategie bezeichnen, die ausgeht von den Phänomenen. Eine deduktive, top-down Herleitung aus einem umfassenden Naturgesetz gibt es noch nicht. Diese erst wäre physikalisches Verstehen im eigentlichen Sinne. Dazu allerdings bedarf es neuer Einsichten in die Grundlagen der Physik.

Das Ende der Inflation war verbunden mit der Erzeugung der uns heute bekannten Teilchen und Felder. Hier spielt das Higgs-Feld eine Rolle, vielleicht auch die Supersymmetrie. Das Modell der inflationären Expansion geht explizit aus von einem symmetrischen

Universum. Damit ist gemeint, dass mit dem Ende der Inflation Teilchen und Antiteilchen paarweise entstanden sind. Das Mehr an Teilchen gegenüber den Antiteilchen ist eine Brechung dieser Symmetrie, sie muss sich im Zeitraum dieser Phasenübergänge ergeben haben. Die uns vertraute Materie heute entspricht allein dem Überschuss an Teilchen. Dies zu klären ist eine Aufgabe der Teilchenphysik. Es gibt Vermutungen, dass sich die Lösung im Bereich der Neutrino-Physik finden sollte. Schlagworte sind Majorana-Neutrinos, bzw. rechtshändige Neutrinos.

Das Modell der Inflation beinhaltet eine pauschale Beschreibung der Entstehung des Energieinhalts des Universums. Energiedichte und Gravitation waren so miteinander verknüpft, dass ihre wechselseitige Erzeugung aus dem Nichts heraus physikalisch konsistent ist. Die Energiedichte bestimmt die Raumzeit, die sich als Expansion darstellt.

### G. Elementarteilchenphysik und Experimentelle Strategien

In der kosmischen Expansion durchlief das Feld eine weite Skala von Energiedichten, mit anfangs sehr hohen Werten. Dies schafft einen engen Bezug zur Teilchenphysik.

Dabei geht es um die Vereinigung von Quantenphysik und Gravitation. Bei kleinsten Abständen und mit der Annahme punktförmiger Elementarteilchen passen Quantenphysik und Gravitation nicht zusammen (D. Lüst). Einen Ausweg sucht man in Vorstellungen, dass auch Raum und Zeit irgendwie quantisiert sind, oder dass alle elementaren Objekte nicht punktförmig, sondern von höherer Dimension sind, und in einem Raum von mehr als 3 Dimensionen wechselwirken. Da zweitgenannte Konzept führt zur heutigen Stringtheorie, die von kleinsten, 1-dimensionalen Objekten (Fäden) und einem Raum von 9 Dimensionen handelt. Wichtig sind geschlossene Fäden, auch können diese Flächen, Brane, bilden. Diese Objekte können sich vereinen oder in mehrere differenzieren. Die energetischen Anregungen der Strings, gedacht wie quantisierte, elastische Schwingungen, erscheinen bei den uns vertrauten Abständen der 4-dimensionalen Raum-Zeit als Elementarteilchen und Feldquanten. Der 9-dimensionale Raum ist kompaktifiziert gedacht, so dass in größeren Abständen nur 3 Dimensionen bleiben, und die anderen irgendwie aufgewickelt sind. Für diese Kompaktifizierung gibt es nahezu unendlich viele Möglichkeiten. Bis jetzt gelingt es nicht, diese auf wenige zu reduzieren, sodass definitive Vorhersagen eher unwahrscheinlich sind.

Kosmologisch gesehen, hatten im Urknall Raum, Zeit und Materie ihren Anfang, die vorhandene Energie entstand mit den Strings, und aus diesen gingen weitere

hervor. Man kann auch denken, dass die Strings, aus denen unser Universum hervorging, selbst aus anderen Strings hervorgegangen sind, und dass aus diesen weitere Strings erzeugt wurden - und werden - die ebenfalls das Potenzial haben, ein wie auch immer geartetes Universum zu bilden. Deren Strukturen und deren explizite Physik (z.B. die Größe der Naturkonstanten) liegen keinesfalls fest. Dann würde auch das aktuelle Bemühen obsolet, die etwa 20 Zahlenwerte für Massen oder Stärke elementarer Teilchen und Wechselwirkungen aus einem Prinzip erklären zu wollen. Sie wären vielmehr eine der nahezu unendlich vielen Lösungen der Theorie. Man könnte dann nur sagen, dass unser Universum sich allein dadurch auszeichnet, dass wir in diesem existieren (können). Diese Banalität bezeichnet man als anthropisches Prinzip.

Es gehört zur Stringtheorie, dass die Existenz von wie auch immer gearteten Universen, deren Genese parallel zu der unserer erfolgte, naheliegend ist. Ob und in welcher Weise diese mir dem unseren in Wechselwirkungen treten, ist offen.

Für die Kosmologie interessant ist eine weitere Strategie, die allerdings den Bezug zur Gravitation ausklammert. Im Modell der Supersymmetrie (SUSY) sollen alle elementaren Wechselwirkungen - mit Ausnahme der Gravitation - und alle elementaren Teilchen einen einheitlichen Ursprung haben. Man beschreibt dies durch entsprechende Symmetrien. Diese Symmetrien jedoch sind gebrochen, sodass bei den uns zugänglichen Energien die Massen der elementaren Teilchen und die Stärken der elementaren Wechselwirkungen, der Elektromagnetischen, der Schwachen und der Starken, sich ganz unterschiedlich darstellen. Dies ist der Higgs-Mechanismus, und Teil des Standard-Modells. Das Standard-Modell ist extrem erfolgreich und experimentell sehr sorgfältig untersucht. Und das Higgs Teilchen wurde 2012 am LHC des CERN entdeckt, noch ist offen, ob es nur eine Sorte oder mehrere verschiedene gibt.

Das Konzept der Supersymmetrie ordnet jedem der bekannten Elementarteilchen und jedem der bekannten Quanten der Wechselwirkungen ein supersymmetrisches Partnerteilchen zu. Diese haben, auf Grund einer starken Brechung der Symmetrie, Massen oberhalb des Bereichs, der uns an Beschleunigern zugänglich ist. Mit den höheren Energien am LHC, dem neuen Beschleuniger am CERN, erhofft man den Nachweis der leichtesten Supersymmetrischen Teilchen. Diese gelten als die natürlichen Kandidaten für Dunkle Materie, und könnten auch deren beobachtete Häufigkeit erklären. Auch beeinflussen sie die Stärken der Wechselwirkungen. Berechnet man deren Verhalten bei höheren Energien unter Berücksichtigung der Supersymmetrischen Teilchen, so sollten diese bei einem entsprechend hohem Wert der Energieskala zusammenfallen. Damit hatte man den Ausgangspunkt verifiziert.

Algebraisch beinhaltet das von Wess und Zumino ausgehende Konzept der SUSY, dass gruppentheoretisch geordnet bosonische und fermionische Freiheitsgrade in Bezug zueinander stehen. Solche Bezüge kann man in verschiedenen Bereichen der Physik suchen. Iacchello entwickelte ein entsprechendes Modell für Anregungsspektren von Atomkernen. Bei der Suche nach Beispielen erfolgreicher Anwendung dieser als dynamisch bezeichnet SUSY gelang mir mit Mitarbeitern am Garching Beschleuniger der erstmalige Nachweis, dass im Bereich von Gold und Platin vier Kerne mit gerader und ungerader Nukleonenzahl aus einem Ansatz beschrieben werden(). Vielfach wird angenommen, dass die Teilchen der Dunklen Materie eine Masse haben, die der Größenordnung nach bei der von schweren Atomkernen liegt. Deren Geschwindigkeiten sollten durch das Gravitationspotential der von ihnen gebildeten Galaxien bestimmt sein. Bisher kennen wir Dunkle Materie nur durch ihren Beitrag zur Gravitation in Systemen von zumindest galaktischen Dimensionen. Davon unabhängige Nachweise erhofft man von Detektoren, in denen die Stöße von Teilchen der Dunklen Materie mit den Atomkernen der Detektoren nachgewiesen werden sollen. Man geht davon aus, dass solche Stöße, falls es sie denn gibt, nur auf Grund der Schwachen Wechselwirkung erfolgen und dementsprechend selten sind. Dabei wäre die auf Atomkerne übertragene Rückstoßenergie zu klein um die umgebende Materie ionisieren. Dementsprechend hat man Rückstöße dieser Art noch nicht beobachtet. Es wird jedoch versucht die geringen Rückstoßenergien über die Erwärmung von Detektor kristallen nachzuweisen. Der Kunstgriff dabei ist, die Wärmekapazität durch Abkühlen auf tiefste Temperaturen extrem zu reduzieren.

Man spricht gerne von Kalter Dunkler Materie. Das bezieht sich auf die Situation, die aus der kosmischen Expansion folgt. Auf Grund der fehlenden Starken und Elektromagnetischen Wechselwirkung hatten sich die Teilchen der Dunklen Materie schon sehr früh vom thermischen Gleichgewicht abgekoppelt, dementsprechend führte die anschließende Expansion heute zu einer sehr tiefen Temperatur. Wegen der fehlenden Streuprozesse einzelner Teilchen blieb diese auch erhalten. Ihre Geschwindigkeiten heute ergeben sich aus den Gravitationsfeldern, in denen sie sich im Laufe ihrer Existenz bewegt haben, und die sich im Laufe der Zeit entwickelt haben. Deshalb hat man in den Galaxien ein Gemisch von Bereichen mit ganz unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu erwarten, die selber jedoch jeweils sehr kalt sind.

Eine andere Strategie des Nachweises Dunkler Materie beruht auf der Annahme, dass diese aus Teilchen und ihren Antiteilchen bestehen. Sie wurden wie alle Materie in der Frühphase paarweise im heißen Plasma erzeugt. Solange Temperatur und Dichte hoch genug waren, standen Erzeugung und Vernichtung im thermodynamischen

Gleichgewicht. Danach jedoch wurde entscheidend, dass die Vernichtung Dunkler Materie nur über die Schwache Wechselwirkung erfolgen konnte und somit entsprechend selten erfolgt. Dementsprechend ergab sich auf Grund der Expansion des Raums bereits zu einem vergleichsweise frühen Zeitpunkt die Situation, dass die paarweise Vernichtung der Teilchen und Antiteilchen der Dunklen Materie keine wesentliche Rolle mehr spielte, ihre Dichte war zu gering dafür, der verbliebene Rest überdauerte die weitere Expansion. Die Situation wäre vergleichbar mit der von kosmischen Neutrinos. Diese wurden in Paaren von Teilchen und Antiteilchen erzeugt und entgingen schon bald ihrer paarweisen Vernichtung auf Grund ihrer geringen Wechselwirkung.

Ausgehend von einer weitgehend homogenen Verteilung konzentrierte sich die kalte Dunkle Materie in dem diskutierten Prozess der Galaxienbildung. Somit gibt es heute für die Dunkle Materie Bereiche wesentlich gesteigerter Dichte, und man kann erwarten, dass in diesen Prozesse der paarweisen Vernichtung Dunkler Materie mit beobachtbaren Raten stattfinden. Es geht nun darum Zerfallsprodukte zu beobachten, die als Signatur geeignet sind. Kandidaten sind Gamma Strahlen im GeV Bereich. Man muss diese natürlich von der aus anderen Quellen unterscheiden. So darf man auf die Entwicklung gespannt sein.

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

## XII. 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. Saul Perlmutter (\*1959), Brian Schmidt (\*1967) und Adam Riess (\*1969) erhielten „für die Ent-

deckung der beschleunigten Expansion des Universums durch Beobachtungen weit entfernter Supernovae“ 2011 den Nobelpreis. Die Verknüpfung dieser Phänomene zu einer für den gesamten Bereich gültigen Beschreibung erfordert zwei Energie tragende Feldern zu postulieren: das Feld der Inflation, aus dem der gesamte Energieinhalt des Kosmos hervorgegangen war, und das Feld der Dunklen Energie, welches in der gegenwärtigen Spätphase 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 einer kosmologischen Konstanten. Eine solche Konstante wurde von Einstein als verträglich mit der Allgemeine Relativitätstheorie erkannt, unabhängig von ihrem Zahlenwert. Bei Expansion des Raums beschreibt sie eine Zunahme des Energieinhalts des Raums, die aus der ebenfalls zunehmenden Gravitationsenergie gespeist wird. Die Summe dieser beiden Änderungen der Energie ist Null. 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. Sie basiert auf der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie. 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 68 Prozent der wichtigste Beitrag zum Energieinhalt des Universums, wurde formal eingeführt um den Rahmen der physikalischen Gesetze, und insbesondere die der Allgemeinen Relativitätstheorie, nicht zu verlassen. Die Kosmologie fordert dazu auf, die Physik in einen neuen, breiteren Rahmen zu stellen.

Physik ist mehr als die Zurückzuführung neu entdeckter Phänomene auf jeweils neu postulierte Modellvorstellungen. Um neue Modellvorstellungen als 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 ausschliesslich im Laboratorium gelang erst Cavendish (1798) . 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, 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 spannend bleiben.

Denkt man über das, was hier als kosmologisches Geschehen vorgestellt wurde, unter eher weltanschaulichen Gesichtspunkten nach, so vermittelt die Physik der Kosmologie 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 jeden 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 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 dem Stand der Kenntnis heute haben wir für die Massen der elementaren Teilchen und die Stärken der elementaren Wechselwirkungen deren Zahlenwerte 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. Angesichts einer Situation, welche die Entwicklung des Universums, trotz aller stochastischen Prozesse, als zielgerichtet erscheinen lässt, kann man auch an Einsteins viel zitierte Frage denken, ob Gott, als er die Welt erschuf, dabei auch eine Wahl gehabt hätte. Sobald man überlegt, ob eine übergreifende Theorie Spielraum lässt, kann man auch weiter fragen, ob die Natur diesen auch realisiert. Vorstellungen, dass es noch weitere Universen geben könnte, in denen sich die Physik in modifizierter Form darstellt, werden so attraktiv. Um diesen Vorstellungen jedoch den Anspruch von Wissenschaftlichkeit zu geben, hätte man Experimente auszudenken, welche die behaupteten Vorstellungen auch als falsch erweisen könnten. Auch diese hätten davon auszugehen, dass wissenschaftlich begründete Vorstellungen von Raum und Zeit grundsätzlich verbunden sind mit der Entwicklung des

uns bekannten Universums. Im Hinblick auf die Zeit stellt der Anfang eine Barriere dar, da er Kausalität, die Reihung von Ursache und Wirkung, auflöst. Damit ist alle Empirie beschränkt auf den Bereich, aus dem uns Licht erreichen kann.

### XIII. DANK

Diese Niederschrift hat das Ziel, unter Vermeidung von Fachsprache über Beobachtungen und Vorstellungen zu sprechen, die mir zum Verständnis der Kosmologie als wichtig erscheinen, und diese als Physik darzustellen. Sie ist geprägt von dem, was ich im Münchener Umfeld mitbekomme.

Es gibt aktuelle Darstellungen von fachkundigen LMU Kollegen. Die Bücher von Gerhard Börner und von Harald Lesch wenden sich an einen breiteren Leserkreis, ebenso wie das von Günther Hasinger, der immerhin an der LMU begonnen hatte. Der Text von Viatcheslav Mukhanov wendet sich eher an den Fachstudenten. 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.

### XIV. 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 zeitliche 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. Änderungen der Temperatur ergaben 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, das 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 und damit 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 jedoch nur dann möglich, wenn sich die Neutronen 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 hochempfindlichen 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 ist sie bestimmt durch die elementaren Elektromagnetischen Wechselwirkung von Elektronen und Atomkernen. Bei Molekülen und festen Körpern entsteht die Struktur aus den Wechselwirkungen der Atome untereinander. 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 folgen 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 diesen ist die Bewegungsenergie bereits in der Nullpunktsenergie enthalten, und diese folgt unmittelbar aus Heisenbergs Unschärfe-Relation. Die Temperatur kommt erst ins Spiel, wenn man angeregte 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. Auch können sie elektrische Ladung tragen. Die Starke Wechselwirkung wird durch Gluonen vermittelt. Experimentell kann man sie nur indirekt nachweisen, man versteht sie auf Grund ihrer Wirkungen. Im Gegensatz zu den anderen Feldteilchen wechselwirken die Gluonen miteinander, und tragen so zur Masse von Protonen und Neutronen bei, die erheblich größer ist als die Masse ihrer Bausteine, der Quarks. Die Feldquanten der Gravitation sind verknüpft mit der Vorstellung von Gravitationswellen. Es wurden große Apparaturen aufgebaut in der Erwartung, etwas direkt nachzuweisen.

- 
- [1] V.Mukhanov,  
Physical Foundations of Cosmology,  
Cambridge Univ. Press (2005).
- [2] G.Börner,  
Schöpfung ohne Schöpfer?  
DVA (2006).
- [3] S.Weinberg,  
Die ersten drei Minuten,  
dtv (1980).

- [4] G.Hasinger,  
Das Schicksal des Universums,  
C.H.Beck (2007).
- [5] H.-T. Janka,  
Supernovae und kosmische Gammablitz,  
Spektrum Akademischer Verlag (2011).
- [6] H.Lesch und J.Müller,  
Kosmologie für Fussgänger,

- Goldmann (2001).  
Weißt Du wieviel Sterne stehen?  
C.Bertelsmann (2008).  
Kosmologie für helle Köpfe  
Goldmann (2006).
- [7] P.Davies,  
Der Kosmische Volltreffer,  
Campus (2008).
- [8] Webseiten der Universitätssternwarte München  
[www.usm.uni-muenchen.de](http://www.usm.uni-muenchen.de)
- [9] Webseiten des MPA für Astrophysik  
[www.mpa-garching.mpg.de](http://www.mpa-garching.mpg.de)
- [10] Webseiten des MPE für Extraterrestrische Physik  
[www.mpe.mpg.de](http://www.mpe.mpg.de)
- [11] Webseiten der ESO  
[www.eso.org/public/](http://www.eso.org/public/)
- [12] Physik Journal,  
diverse Beiträge
- [13] Spektrum der Wissenschaften  
diverse Beiträge