

Kosmologie, einfach

Gerhard Graw

Fakultät für Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München

Contents

I. Die Geschichte von Erde und Sonne	2	B. Quantitative Aussagen über den Kosmos	29
A. Die Planeten	3	C. Strukturbildung im expandierenden Kosmos	31
B. Erde und Mond	6	D. Die ersten Sterne, Entstehung der Galaxien	33
C. Energietransport in der Sonne	6	X. Die erste halbe Stunde	34
D. Nukleares Brennen	7	A. Die primordiale Elementsynthese	35
E. Fraunhofers Linien	8	XI. Überlegungen zum Anfang	36
II. Die Milchstraße, Galaxien	8	A. Das Horizontproblem	37
A. Struktur der Milchstraße	9	B. Planck-Skala, der Anfang	37
B. Die Sonne in der Milchstraße	10	C. Inflationäre Expansion	38
C. Das nähere Umfeld der Milchstraße	10	D. Kosmische Quantenfluktuationen	39
III. Supernovae	11	E. Gravitationswellen?	40
A. Die Entwicklung von Sternen	11	F. Zum Konzept	40
B. Der Supernova Mechanismus	12	G. Elementarteilchenphysik und Experimentelle Strategien	41
C. Neutrinoastronomie	12	1. Stringtheorie	41
D. Supernovae, der weitere Ablauf	13	2. Supersymmetrie	41
E. Kosmologische Bedeutung der Supernovae	14	3. Zum Higgs-Mechanismus	42
F. Zoo der Soperovae	14	4. Dunkle Materie	42
G. Verteilung der Elementhäufigkeit	15	XII. Resümee	43
H. Zeitangaben	15	XIII. Dank	44
I. Pulsare, Magnetare, Gravitationswellen	16	XIV. Nachtrag: Physikalische Grundlagen	44
J. Zur Sternentstehung heute	16	A. Teilchen und Felder	45
IV. Schwarze Löcher	18	B. Feldquanten	46
A. Wie entstehen Schwarze Löcher?	19	Literatur	46
B. Gammablitze	19		
C. Quasare und massereiche Schwarze Löcher.	19		
D. Das Zentrum der Milchstraße, ein Schwarzes Loch	20		
E. Eine Zwischenbilanz	21		
V. Magnetfelder, Kosmische Strahlung	21		
VI. Gravitationswellen	22		
VII. Verteilung der Galaxien, Dunkle Materie	23		
A. Galaxiengruppen und Galaxienhaufen	23		
B. Dunkle Materie	24		
C. Gravitationslinsen, der Bullet-Cluster	25		
D. Mittlere Eigenschaften	25		
VIII. Der expandierende Kosmos	26		
A. Hubbles Entdeckung	26		
B. Allgemeine Relativitätstheorie	26		
C. Die kosmische Rotverschiebung	28		
IX. Die Kosmische Hintergrundstrahlung	28		
A. Das Gesetz von Planck	29		

Für Sterne interessierten sich die Menschen schon immer, Sterne gaben Orientierung im Weglosen, und waren Projektionsfläche für Vorstellungen aller Art. 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 mathematischer Form, das System von Sonne, Erde und Planeten erscheint als physikalische Einheit. Dessen raum-zeitliches Verhalten ist vollständig beschrieben. Wir sprechen noch heute von den Keplerschen Gesetzen. Die physikalische Begründung dieser «Gesetze» gelang 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 haben wir begründete Vorstellungen, wie vor viereinhalb Milliarden Jahren das System von Sonne, Erde und Planeten entstanden ist: Ausgangspunkt war das interstellare Gas der Milchstraße, dessen mittlere Dichte liegt bei etwa einem Wasserstoffatom pro Kubikzentimeter. In den Spiralarmen, den Regionen der Sternentstehung, ist sie größer. 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 größer als die Bewegungen auf Grund der Strömungen, so nimmt die anfängliche Verdichtung in einem sich selbst verstärkenden Prozess zu. Der Prozess wird gedämpft durch den sich dabei aufbauenden Druck des Gases, welcher der Schwerkraft entgegen wirkt.

Die erste Folge von Verdichtung ist ein schnelleres Erreichen des thermodynamischen Gleichgewichts. Dazu gehört die Bildung von molekularem Wasserstoff, da der Beitrag der Bindungsenergie nun den der Entropie dominiert. Zusammen mit den anderen molekularen Gasen wie Kohlenmonoxyd und Wasser wird Abstrahlung im Bereich des Infraroten möglich, die Temperatur sinkt auf typisch 10 Kelvin. War eine Erhöhung der Dichte anfangs von aussen getrieben, erfolgt sie nun auf Grund der Abstrahlung in einem sich selbst verstärkenden

Prozess, dem ersten 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. Da Sternbildung in einem kalten Medium erfolgt, wird die Absorption der Strahlung durch Staub effektiv. Man sieht nicht mehr von aussen in den Bereich der weiteren Sternbildung ein, sie ist von Staub-Wolken verborgen. Man ist auf die Beobachtung von Strahlung im Millimeter-Bereich angewiesen.

Als Folge steigender Temperatur im Zentralbereich werden die Moleküle dissoziiert, dann die Atome ionisiert. Diese Prozesse nehmen Energie auf, die damit verbundene Abkühlung unterstützt die rasche Zunahme der Dichte. Im Aussenbereich strömt Materie auf Grund der Gravitation nach, jedoch ist dies eingeschränkt durch die Erhaltung des Drehimpulses. Das Geschehen im Zentrum stabilisiert sich, wenn die nukleare Energieerzeugung ein für lange Zeit wirkendes Gleichgewicht bewirkt.

Die hohen Dichten und Temperaturen, die das Zünden nuklearer Brennprozesse bewirken, wurden nach wenigen zig Millionen Jahren erreicht. Bedingung 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. Bei der Bildung einer anfänglichen Konzentration aus kaltem Gas und Staub hatten sich einige Teilbereiche, aus verschiedenen Richtungen einfallend, eher streifend auf das sich bildende gemeinsame Zentrum hin bewegt. Relativ zum Zentrum hat jeder dieser Teilbereiche Drehimpuls. 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 aller 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. Diese protostellare Scheibe unterscheidet sich ganz wesentlich von der Rotation eines starren Diskus, denn die Bereiche nahe der Sonne drehen sich wesentlich schneller als die ferneren. Dies ist die Aussage des dritten Keplerschen Gesetzes.

Die Physik dieser protoplanetaren Scheibe ist durch Gravitation, Drehimpulserhaltung und Reibung bestimmt, man spricht von Akkretion. Diese beschreibt den Fluss von Materie hin zum Zentrum, verbunden ist er mit dem Transport von Drehimpuls nach aussen. Entscheidend

sind die dissipativen Prozesse, die mit dem Begriff Reibung zusammengefasst werden. Kinetische Energie wird dissipiert, letztlich in Wärme, die abgestrahlt wird. Der Verlust an Energie bewirkt insgesamt eine Bewegung hin zum Gravitationszentrum. Die Erhaltung des Impulses bei der dissipativen Wechselwirkung bewirkt den Transport von Drehimpuls nach aussen.

Alles beruht auf der Wechselwirkung benachbarter Bereiche, dazu gehören insbesondere die gravitative Anziehung größerer Objekte, turbulente Strömungen, und magnetische Wechselwirkungen. Gemeinsam ist diesen allen, dass sie die inneren, und deshalb schnelleren Bereiche bremsen und die langsameren äußeren beschleunigen. Die freigesetzte Reibungsenergie zeigt sich in der Erhöhung der Temperatur, sie entspricht der freigesetzten Gravitationsenergie auf Grund der Trennung der benachbarter Kreisbahnen. 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 jeweiligen Ablaufs.

Im zentralen Bereich spielen magnetische Felder eine wichtige Rolle: Wann immer Medien an einander streifen, werden Elektronen übertragen. Unterscheiden sich die Medien in ihrer Temperatur oder stofflicher Zusammensetzung, ist eine Richtung des Transfers bevorzugt, so 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 die magnetischen Felder. Entsprechend dem Prinzip des Dynamos wird die Energie von Bewegungen in die Energie magnetischer Felder gewandelt. 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 anfäng-

lichen 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.

Der Vorläufer der Sonne nahm aus der protoplanetaren Scheibe durch Akkretion Materie auf, bis durch das nukleare Brennen und den solaren Wind die Verbindung zum äußeren Bereich unterbrochen war. Die Vorläufer der Planeten entstanden in diversen Prozessen der Differenzierung in der Gas-Staub Scheibe. Man nimmt an, dass dies ein stabiler Mechanismus ist, und versucht, diesen in aktuellen Sternentstehungsgebieten zu beobachten. Wegen des Staubs erfordert dies die Beobachtung von extrem langwelligem Licht. Inzwischen gibt es Bilder, welche von protostellarer Scheiben die Oberflächen zeigen, von der Seite, und auch von oben. Deren innerer Bereich, in der Ebene der Scheibe, ist nicht zu sehen. Die Ausdehnung der Scheiben ist typisch 100 AE, vergleichbar dem Sonnensystem. Die Ausdehnung senkrecht zur Ebene nimmt mit dem Abstand zu. Die Temperatur nahe der Ebene der Scheibe ist bestimmt durch die Temperatur des damals sehr kalten, zuströmenden interstellaren Gases, und deren Erhöhung durch den Prozess der Akkretion. Da dieser Bereich optisch dicht ist, beeinflusst die Strahlung des entstehenden Zentralsterns nur den äußeren Bereich, sodass es an der Oberfläche heißer ist als im Innern der Scheibe. Die rotationssymmetrischen Scheiben zeigen Lücken. Ob in diesen sich Planeten befinden, ist offen.

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 letzteren finden wir diese Elemente etwa 20 Prozent häufiger als bei der Sonne. Der Staub klumpt durch Kräfte der Adhäsion relativ schnell zu Objekten von einigen Zentimetern Durchmesser. Der Übergang zu größeren Objekten von bis zu einem Kilometer, zu den Planetesimalen, ist ein noch nicht verstandenes «meter size barrier paradox». Unter dem Einfluss der Gravitation bildeten sich aus den Planetesimalen 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 diesen von Adhäsion ausgehenden Vorstellungen zur Sternbildung ist der gravitative Kollaps von Teilbereichen nicht auszuschließen, dies gilt insbesondere für schwere Planeten, sodass dort die Situation ähnlich der bei der Sternbildung gewesen wäre.

Meteoriten sind wichtig als Zeugen. Im Allende Meteoriten, der am 18.2.1969 in Mexiko niederging, finden sich

Kalzium-Aluminium Einschlüsse, wie in einigen anderen Meteoriten auch. Die Isotopenverhältnisse bestätigen ihren Ursprung als Kondensation aus dem heißen Gas des frühen Sonnensystems, das als gut durchmischt gilt. Radiochronologisch konnte ihr Alter, der Zeitpunkt ihrer Kondensation, zu 4567 Millionen Jahren bestimmt werden. Diese frühe Mineralbildung ist der älteste Zeuge eines Geschehens im Sonnensystem. Eingeschlossen in diese finden sich kristalline Nanokristalle aus extrem hitzebeständigem Material. Diese zeigen abweichende Isotopenverhältnisse, man denkt an das Umfeld einer einzelnen Supernova. Deren Altersbestimmungen weisen auf eine zeitnahe Bildung hin, sodass die Supernova auch verantwortlich gewesen sein kann für die Verdichtung von Gas und Staub, aus der anschließend das Sonnensystem hervorging.

Die Planeten der Sonne reihen sich in Merkur, Venus, Erde und Mars, die vier leichten Felsplaneten mit 5, 81, 100 bzw. 11 Prozent der Erdmasse. Denen folgen die Gasriesen Jupiter und Saturn mit 318 bzw. 95 Erdmassen, und weiter außen die Eisriesen Uranus und Neptun mit 15 bzw. 17 Erdmassen. Vergleicht man mit den bisher identifizierten Exoplaneten von Sternen, die der Sonne vergleichbar sind, und differenziert nach der Masse, so zeigen die Planeten des Sonnensystems systematisch wesentlich größere Abstände vom Zentrum. Wahrscheinlich ist dies ein Artefakt infolge der eingeschränkten Möglichkeiten zur Beobachtung.

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, 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 unzähligen Staub-Eis Objekten dort haben knapp Hunderttausend einen Durchmesser von Hundert Kilometern und mehr. Das größte von ihnen ist Pluto. Werden solche Objekte durch Stöße fragmentiert oder aus ihrer Bahn geworfen, und erreichen sie, im Fall einer stark exzentrischen Bahn den Bereich nahe der Sonne, das sind die Kometen. Hülle und Schweif entstehen durch Verdampfen des Eises im Sonnenlicht. Sie werden sichtbar durch den dabei mit freigesetzten Staub, der das Licht reflektiert. Der Schweif wird getrieben vom solaren Wind, deshalb zeigt er von der Sonne weg. 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 katastro-

phale Folgen. Im Jahrestakt durchquert die Erde den Bereich eines Kometenschweifs, der Staub im Schweif bewirkt in der Erdatmosphäre lokale Erhitzungen, die wir als Sternschnuppen bewundern.

Das heute als geordnet erscheinende System von Planeten und Gürteln hatte sich in den ersten 200 Millionen Jahren eingestellt, durch wiederholte Wechselwirkungen einzelner Bereiche. 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 Oort'schen Wolke. Aus dieser stammen diejenigen Kometen, die nur alle paar Tausend Jahre das Innere des Sonnensystems erreichen und so beobachtbar werden. Die Oort'sche 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 (AE) 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 mit 5000 K wesentlich kälter ist die Heliosphäre dort. Voyager registrierte einen koronalen Massenauswurf der Sonne, der 13 Monate vorher erfolgte. 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 dabei 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, die aus der freigesetzten Gravitationsenergie des insgesamt vom Zentrum angezogenen Materials stammt. Diese wird durch magnetische Wechselwirkung auf einen Teilbereich des Materials übertragen, welches dann den Jet bildet. Die Bildung von Jets ist eine Alternative 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 mit der beginnenden Bildung von Planeten deren Symmetrie gebrochen. Die von den Planeten erzeugten zusätzlichen Gravitationsfelder beeinflussen die Bahnen und deren sich schliesslich einstellende Ordnung. Somit erfahren Planeten und sonstige Objekte das Gravitationsfeld als sich periodisch ändernd. Geschieht dies im Takt mit dem Umlauf, so treten Resonanzeffekte auf, und die Bahn wird instabil. Dabei kann ein Planet einem anderen Planeten nahe kommen, 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 von Doppelsternsystemen, und die Frage, ob letztere Planeten haben, sind Fragen der aktuellen Forschung.

Das Studium der planetaren Begleiter von Sternen ist eines der ganz großen Forschungsziele. So hat man für einen Stern bereits sechs zugehörige Planeten identifiziert. Folgende Effekte werden dabei genutzt: (i) Da Stern und Planeten sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt bewegen, ändern sich die Position und vor allem die Geschwindigkeit des Sterns periodisch; (ii) der Planet schattet, bei geeigneter Lage der Bahn, das Licht des Stern periodisch wiederkehrend kurzzeitig ab; (iii) 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 ein gut erdschwerer Planet unseren nächsten Nachbarstern Alpha Centauri B in etwas mehr als 3 Tagen. Für das Planet-Stern System definiert man eine sogenannte habitable Zone, und inzwischen gelingt es in dieser Planeten zu finden. Aus 4 Jahren Beobachtungen mit Herschel zeichnet sich ab, dass sehr viele Sterne planetare Begleiter haben. Man sagt, jeder fünfte. Letztendlich geht es bei der Exoplaneten-Forschung um die Frage, ob Leben, in welcher Form auch immer, ausserhalb der Erde existieren kann. Dies ist ein Thema, das seit Giordano Bruno im 17. Jhd. aktuell war, und mit dem sich noch der junge Kant befasste, bis er schließlich resümierte, dass man mit Geistesschärfe allein hierzu nichts aussagen kann. Denkt man sich das Leben als basierend auf der Photosynthese, so versucht man deren Produkte, Sauerstoff und Methan als Biomarker, nachzuweisen.

B. Erde und Mond

Der Mond entstand, die Erde war noch keine 100 Millionen Jahre alt, durch den Aufprall eines planetenartigen

Körpers. Der Stoß war streifend und dabei wurde die Drehachse der Erde 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 schnell 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 nicht so regulär war, stand die Erde unter einem massivem Bombardement von Kometen, die genügend viel vereistes Wasser enthielten, um die Ozeane damit 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. Isotopenverhältnisse, soweit sie gemessen werden konnten, unterstützen dies. Wegen des Verlusts flüchtiger Stoffe in der Frühzeit ist jedoch der Anteil leichter Elemente 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 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 dem sich 40 Prozent der Masse befinden (und 60 Prozent der Energie innerhalb der innersten 10 Prozent der Masse). Die Temperatur der Sonne fällt zur Oberfläche hin ab. Von dieser aus emittiert sie elektromagnetische Strahlung, bei einer Temperatur von 5800 Grad Kelvin, als kontinuierliches Spektrum mit einem Maximum bei einer Wellenlänge von 560 nm. Unser Auge ist empfindlich für den Bereich von 380 nm (violett) bis 780 nm (rot).

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 25 Prozent des Weges zur Oberfläche hin wird die Konvektion entscheidend. Die Konvektion beginnt bei 2 Millionen Grad. Der Transport von Wärme ist verbunden mit dem Transport von Materie, diese steigt in sich lokal bildenden Kreisläufen auf und ab. An der Oberfläche erscheinen die Strömungszellen sehr eng, und 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 Konvektionszone, der sogenannten Tachocline, etwa 0,75 Sonnenradien vom Zentrum entfernt. 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 des dipolaren Magnetfelds. Dessen Stärke an der Oberfläche der Sonne ist vergleichbar mit dem des Erdfeld, jedoch wechselt es alle 11 Jahre die Richtung. Um bis zu 4 Größenordnungen stärker sind die lokalen Magnetfelder, die wir in den Bereichen der dunklen Sonnenflecken beobachten.

Die Häufigkeit ihres Auftretens ist verbunden mit dem Wechsel der Polarität des solaren magnetischen Dipolfelds, dementsprechend zeigt sie alle 11 Jahre ein Maximum. Dies korreliert mit Perioden verstärkter Strahlungsintensität auf Grund einer entsprechend wirkungsvolleren Konvektion. Auf der Erde wechselt die Intensität der Sonnenstrahlung mit einer Amplitude von einem halben Promille.

Das Magnetfeld der Sonne ist durch die elektrischen Ströme erzwungen, die aus der differentiellen Rotation im Bereich der Tachocline folgen. Dementsprechend ist der polar gerichtete magnetische Fluss auf eine vergleichsweise dünne zylindrischen Schale nahe der Tachocline beschränkt. Sobald sich Inhomogenitäten zeigen, brechen Teilbereiche des magnetischen Flusses

aus, in Richtung weg vom Zentrum, hinein in die Zone der Konvektion. Sie bilden relativ enge Schläuche, wegen des elektrisch gut leitenden Mediums. Die Corioliskraft verzerrt sie in äquatorialer Richtung, "wickelt" sie auf, wie die Fasern eines Seil. Das reduziert ihre wechselseitige magnetische Abstoßung.

Sonnenflecken entstehen, wenn diese Schläuche an die Oberfläche gedrückt werden, und aus dieser in einer Schleife heraustreten. Die Stärke ihres magnetischen Feldes behindert die Konvektion, deshalb sind ihre Ein- und Austrittsbereiche an der Oberfläche um etwa Tausend Grad kälter. Diese Erscheinung sehen wir als Sonnenflecken. Die Orte, an denen Sonnenflecken auftreten, sind zufallsbedingt, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens verknüpft mit dem Zyklus der Sonne. Zwischen der nördlichen und südlichen Hemisphäre gibt es charakteristische Unterschiede. Sonnenflecken können rasch verschwinden, aber auch über Monate anwachsen zu Bereichen viel größer als ein Erddurchmesser.

Die Magnetfelder der Schleifen binden heisses, ionisiertes Material. Falls an der Oberfläche Teile von Schleifen mit entgegengerichteter Flussrichtung sich zu nahe kommen, schliessen sie sich spontan kurz, so wie ein senkrecht stehender Bleistift spontan aus dem labilen in das stabile Gleichgewicht kippt. Gleichzeitig schließt sich der magnetische Fluss ausserhalb der Oberfläche zu einem Ring, der mitsamt seinem Plasma von der Oberfläche abgestoßen wird. Man spricht von magnetischer Neuverbindung (Rekonnexion). Die Rekonnexionen können in benachbarten Bereichen die Schwellen zur Annäherung solcher Felder absenken, sodass die Umordnungen große Bereiche erfassen und insgesamt erhebliche Energien freisetzen, am 4. November 2015 waren es 10^{23} Joule. 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 die 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 weg, bis sich am "termination shock" ein Gleichgewicht von Wind- und Gasdruck 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, deshalb auch die Bezeichnung Schwach. Neutrinos unterliegen neben der Gravitation nur der Schwachen Wechselwirkung, folglich durchdringen sie größte Materieschichten. 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 dabei 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, wäre alles Leben auf der Erde versengt.

E. Fraunhofers Linien

Die Zusammensetzung der ursprünglichen Gas-Staubwolke sehen wir in der äußeren Atmosphäre der Sonne. Die erste Beobachtung hierzu gelang Joseph Fraunhofer 1813 in Benediktbeuern. Er analysierte mit

einem Prisma und einer Anordnung von besonders guten Linsen das Licht der Sonne. Dabei sah er das Spektrum des Regenbogens, und in diesem sehr enge Bereiche, sogenannte Linien, die weniger hell sind. Licht mit dem Spektrum des Regenbogens wird von jedem genügend heißen Körper erzeugt. Linien von der beobachteten Art sieht man in diesem, falls sich zwischen Lichtquelle und Beobachter freie Atome oder Moleküle befinden, die das Licht bestimmter Wellenlängen absorbieren. Diese sind für die Substanz charakteristisch, Chemiker nutzen diese Eigenschaft zur Identifikation von Stoffen. Mittlerweile versteht man es, Fraunhofers Linien im Sonnenlicht in quantitative Information über die Zusammensetzung der äußeren Sonnenatmosphäre zu übersetzen. 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 das Gemälde von Adam Elsheimer in der Alten Pinakothek, noch im gleichen Jahr in Rom gemalt: In künstlerischer Freiheit stellte er die Milchstraße dar als Häufung von Einzelsternen. Auf Grund von Sternzählungen erkannte Wilhelm Herschel 1785 die Scheibenform der Galaxis. Von dieser Information begeistert, folgte der junge Immanuel Kant, dass die mit astronomischen Fernrohren zu erkennenden elliptisch oder kreisförmig, neblig erscheinenden Objekte am Himmel Galaxien seien, ähnlich unserer Milchstra-

ße. Inzwischen weiß man auch, dass alle die 6000 ohne Fernrohr 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, wie diese sich unter verschiedenen Blickwinkeln zeigen. So wie die Sonne ein Stern ist unter vielen, 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, und 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 im Bereich der Sonne 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.

Eine quantitative Analysen aktueller Daten (Diss. Portal, 2016) nennt als Sternmasse der Galaxis $51 \cdot 10^9 M_S$. Unterscheidet man die sich überlagernden morphologischen Strukturen, dann fallen davon auf die Zentrale Masse $2 \cdot 10^9 M_S$ und auf die Summe der Sterne von Bulge und Balken $17 \cdot 10^9 M_S$. Davon ist der Anteil des Balkens außerhalb des Bereichs der Bulge $5,5 \cdot 10^9 M_S$.

Begrenzt man sich hingegen auf den vom Bulge eingenommenen Raum, dann addieren sich dort die Beiträge von Zentraler Masse, innerer Scheibe, Bulge und Balken zu $15 \cdot 10^9 M_S$ Sternmasse und $3 \cdot 10^9 M_S$ Dunkle Materie. Der Anteil der Sterne der inneren Scheibe ist $13 \cdot 10^9 M_S$, davon fallen $2 \cdot 10^9 M_S$ in den Bulge Bereich.

Unsere Galaxie besteht aus etwa 200 Milliarden Sternen (diese Zahl entspricht in etwa der Anzahl von Neuronen, mit denen wir denken) aus interstellarem Gas und aus 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. Dies 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. Anders als die galaktische Scheibe ist der Halo weitgehend frei von Staub. Im Halo gibt es alte Sterne und Gas sehr geringer Dichte. Innerhalb dieser Sphäre kennt man etwa 150 Kugelsternhaufen (globular clusters). Dies sind dicht gepackte, sich gravitativ bindende Ansammlungen von einigen Zehntausend bis zu etwa einer Million Sternen, die etwa 12 Milliarden Jahre alt sind, vergleichbar den alten Sternen im Bulge. Sie sind entstanden, als der Vorläufer der Galaxis mit anderen Systemen kollidierte, sodass eine Starburst-Situation entstand. Die Kugelsternhaufen verlieren Sterne auf Grund der Wechselwirkung einzelner Sterne und durch Gezeiteneffekte. Sie laufen um das galaktische Zentrum auf gestreckten elliptischen Bahnen, ohne dabei einer einheitlichen Richtung zu folgen.

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 lässt sich in manchem vergleichen mit einer frühen planetarischen Scheibe, als Folge von Wechselwirkungen migrieren die Sterne, sodass der Radius ihrer Kreisbewegungen sich ändert. Dabei entweichen auch Sterne aus der dünnen in die dicke Scheibe.

Zentriert um die Achse der Milchstrasse hat man auf beiden Seiten der Scheibe 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. Die räumlichen Verteilung von Dichte, Temperatur und Bewegung ist strukturiert. Sie 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 und die der planetarischen Nebel, zeitlich integriert sind energetisch

vergleichbar mit der abschliessende Supernova-Explosion. Sie bestimmen die kurzen Zeitskalen. Im interstellaren Medium finden sich heisse, warme, kalte und sehr kalte Bereiche, mit Temperaturen von 1 Million Kelvin, Zehn- bis Fünftausend Kelvin, 300 Kelvin, und unter 20 Kelvin. Verbunden mit der Temperatur sehen wir den Übergang vom Plasma zu atomarem Gas, zu Staub und zu 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 Phase 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 liegen zwischen wenigen Lichtjahren und einigen hundert, mit Massen von mehr als Tausend bis zu einer Million Sonnen.

Supernovae und Strahlungsdruck ionisieren die Materie und treiben sie weg, unter Bildung einer Stoßfront. 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 schwereren Elemente wichtig. Die tiefen Temperaturen der molekularen Wolken beobachten wir über die Rotationsbande der polaren CO Moleküle. Die H II Gebiete identifiziert man über zweifach ionisierten Sauerstoffatome, die dort auf Grund der hohen Temperatur entstehen. Wegen der niedrigen Dichte werden verbotene optische Übergänge aus metastabilen Zuständen sichtbar, wie der bei 500,7 nm.

Wegen der hohen Dichte an Staub sind die molekularen Wolken 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, sie entsprechen einem turbulenten Prozess, der fraktale Muster zeigt. 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 sogenannten Lokalen Blase. Diese ist durch mehrere Supernova-Explosionen entstanden, mehrere davon gab es vor 2 bis 3 Millionen Jahre im Abstand von 100 Lichtjahren, also relativ nah. Material aus deren Stoßfronten wurde auf Erde und Mond deponiert. Der Vorgang wurde durch Messungen am Münchener Tandembeschleuniger durch Kollegen der TU rekonstruiert über den Nachweis des radioaktiven 60-Eisen Isotops in geologischen Proben.

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

Nahe der Milchstraßensysteme gibt es Zwerggalaxien und irreguläre Galaxien. Man unterscheidet Zwerggalaxien von Sternhaufen, indem man, abgesehen von der Größe, nur ihnen Dunkle Materie zuordnet. Die bekanntesten Zwerggalaxien sind die Große und die Kleine Magellansche Wolke, mit denen die Milchstraße über den Magellanschen Strom verbunden ist. Dies ist eine Brücke aus Wasserstoffgas, mit einer Länge von etwa 300.000 Lichtjahren. 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, bald wird sie von ihr einverleibt sein. Ähnlich verlaufen die Prozesse bei der 50.000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum entfernten Sagittarius-Zwerggalaxie. Auch auf diese Weise wächst die Masse der Milchstraße weiter an.

Mit zwei weiteren Spiral-Galaxien, dem Andromeda-Nebel, 2,5 Millionen Lichtjahre entfernt, und dem Dreiecksnebel, 3 Millionen Lichtjahre entfernt, sowie einigen kleineren Galaxien bildet die Milchstraße die 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 Jah-

ren 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 ein 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. Dies beschreibt eine 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 der 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. Vergleicht man mit den Neutrinos der Sonne, so brauchten diese für die Reise zu uns nicht 8 Minuten, sondern 170.000 Jahre. Aus der Beobachtung der Neutrinos kennen wir den Zeitpunkt des Ereignisses und haben eine vergleichsweise solide Grundlage, den Mechanismus dieser Supernova zu diskutieren.

Direkte Zeugen einer früheren Supernovaexplosion beobachten wir auch in Ablagerungen auf dem Meeresgrund. In Schichten, die geologisch etwa 2 Millionen Jahre alt sind, lässt sich ^{60}Fe nachweisen. Dies schwere Isotop des Eisens mit einer Halbwertszeit von 2,6 Millionen Jahren kann nur in einer Supernovaexplosion vom Typ II gebildet worden sein, und ermöglicht deren Datierung.

A. Die Entwicklung von Sternen

Die Entwicklung des Vorläufersterns 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 Reaktionkette besteht aus vier Einfangreaktionen von Wasserstoff begleitet von zweimaligem radioaktivem Betazerfall, das Reaktionsprodukt danach zerfällt 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 Energienachschub, um den Druck aufzubauen, der der Gravitation standhält. 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 schrumpfen. Dabei werden die äußersten Schalen sehr heiss, sodass sie sich aufblähen und das Gravitationsfeld als planetarische Nebel verlassen. Dieser irreführende Name ist historisch bedingt.

Den aktuellen Entwicklungsstand eines Sterns entnimmt man dem Hertzsprung-Russel 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 Gewinn 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 bewirken Verzögerungen der Neutrinos im Sekundenbereich. Aus den genannten Werten zur kollabierenden Masse und zum Durchmesser des verbleibenden Kerns lässt sich die insgesamt freigesetzte Energie, wie auch Anzahl und mittlere Energie der erzeugten Neutrinos, abschätzen. Das absolut Beeindruckende ist nun, dass diese Neutrinos genau so, als sekundenkurzes Ereignis und in der richtigen Anzahl, beobachtet worden sind! Es gab 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 freigesetzten 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 Riesen, 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 primordialem 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 die Beimengungen zu Wasserstoff und Helium, und werden 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 β -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 einen Teil dieses Wegs durchschritten haben, bis sie 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, auf diese Weise 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}C und ^{22}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 in dem sgn. planetarischen Nebel freigesetzt.

Die beobachtete Verteilung der Isotope zeigt, dass es neben dem s-Prozess zumindest einen weiteren Mechanismus der Erzeugung schwerer Elemente gegeben haben

muss. Dieser hat die Genese der beobachteten neutronenreichen Atomkerne zu erklären, die ausserhalb des Bildungspfad der s-Prozess-Kerne liegen, und 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 Labordaten 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 erzeugt, 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, Gravitationswellen

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 um bis zu eine Milliarde die in Laboratorien erzeugten Feldstärken. 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, die einem fernen Beobachter als eine im Takt des Umlaufs pulsierende Quelle erscheinen, wie der Strahl eines Leuchtturms.

Die emittierte Strahlung umfasst alle Frequenzbereiche. Ihre Quellen sind thermische Röntgenstrahlung aufgrund der Temperatur der Oberfläche des Neutronensterns, Radiowellen aus dem umlaufenden oberflächennahen Plasma, und Synchrotronstrahlung höchstenergetischer Elektronen, die vom bewegten Magnetfeld beschleunigt wurden, und die Strahlung bis hinein in den GeV Bereich erzeugen.

Der erste Pulsar wurde bei einer Suche nach Radioquellen 1967 von Jocelyn Bell entdeckt. Der Nobelpreis dafür ging 1974 nur an ihren Doktorvater, Antony Hewish. Inzwischen kennt man aus Beobachtung in der

Radiostrahlung über 2000 Pulsare. Aus der im Verlauf von 30 Jahren beobachteten Verkleinerung der Pulsfrequenzen erhält man Information über die Abstrahlung. Nach 10 Millionen Jahre sollten die Magnetfelder verbraucht sein. Es gibt ein Doppelsternsystem von 2 Pulsaren. Bei diesem zeigten Russell Hulse und Joseph Taylor (Nobelpreis 1993), dass die beobachtete Abnahme der Umlauffrequenz der Erwartung auf Grund der Abstrahlung von Gravitationswellen entspricht.

Eine direkte Beobachtung publizierte das LIGO-Team 2016. Am 14. September 2015, um 11:50 Uhr deutscher Zeit, passierte eine Gravitationswelle die Erde. Diese transversale Oszillation der Raumzeit ist quadrupolar, und deshalb besonders geeignet zur Detektion mit einem Michelson-Interferometer. In zwei räumlich getrennten Detektoren in den USA wurde sie beobachtet. Wissenschaftler der Max Planck Gesellschaft leisteten entscheidende Beiträge. Die Quelle für das sekundenkurze Ereignis war der Gravitationskollaps zweier sich umkreisender Schwarzer Löcher, mit den Massen von 29 bzw. 36 Sonnen. Das Signal zeigt die Frequenz der Umläufe, die bis zu etwa 100 Hz ansteigt. Die freigesetzte Energie der Gravitationsstrahlung liegt bei 3 Sonnenmassen, sodass trotz des Abstands von 1,3 Milliarden Lichtjahren die Schwingung der Raumzeit auf der Erde zu beobachten ist. Deren Amplitude ist, verglichen mit dem Erddurchmesser gleich dem Durchmesser eines Atomkerns.

Etwa 10 Prozent der Neutronensterne haben Magnetfelder, die nochmal um etwa einen Faktor 1000 stärker sind, man spricht von Magnetaren. Ihre Umlaufzeiten liegen im Bereich von mehreren Sekunden. Die extremen Feldstärken ergeben sich durch Induktion, den Aufbau des Sterns denkt man in Schichten, die z.T. supraleitend sind, kinetische Energie der Rotation wird in Energie des Magnetfelds gewandelt. Entsprechende Umordnungen (Reconnections) der Magnetfelder sind mit heftigen Strahlungsausbrüchen verbunden.

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 offensichtlich soviel Materie abgesprengt, dass der Rest nicht mehr reichte zur 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.). Sternentstehung erfolgt, wenn die thermische Energie des Gases nicht mehr ausreicht dem Druck der gravitativen Anziehung standzuhalten. Dementsprechend kollabieren in kalten, dichten Gasen bereits kleine Bereiche, während dies in dünneren, wärmeren Gasen nur für große Bereiche möglich ist: 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 es das System zerreiht. 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}Na und ^{26}Al . ^{22}Na zerfällt nach einigen Jahren, ^{26}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 niedergegangenen Meteoriten findet sich reichlich ^{22}Ne , das Zerfallsprodukt von ^{22}Na . Das bedeutet, dass ^{22}Na im Meteoriten deponiert war, bevor es im Wolf-Rayet Stern durch Protonenanlagerung in ^{23}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}Al , Magnesium ^{26}Mg . Innerhalb der Halbwertszeit von weniger als 1 Million Jahren gelangte also ^{26}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}Fe , das in wenigen Millionen Jahren zu ^{60}Ni radioaktiv zerfällt. Dies wird ebenfalls in Meteoriten nachgewiesen. Es wird nun berichtet, dass einige Meteoriten ^{26}Al , aber keinen ^{60}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 Schwarzschildradius 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 nach aussen, 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. Falls auf diese aus der Schale Materie zurück stürzt, kann dieser in ein Schwarzes Loch übergehen.

B. Gammablitz

Eine spontane Entstehung eines Schwarzen Lochs kann als Gammablitz beobachtbar werden. Ein 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 diese wiederherum mit der Abstoßung eines eng kollimierten, extrem energiereichen Jets entlang der Rotationsachse. In diesem wird die freigesetzte Gravitationsenergie freigesetzt. 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 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 Beryllium 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 Zufluss 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 inzwischen 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 von 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. Mit gemessenen 13,2 Milliarden Lichtjahren gilt Egsy8p7 als derzeit entferntestes Objekt.

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 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 einströmende 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 zuströmende Sterne einschlossen. 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 verborgen hinter dunklen Gaswolken, 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 unter der Bezeichnung Sagittarius A*. In den letzten 20 Jahren gabes vom Zentrum immer bessere Aufnahmen. Mit den im Jahre 2004 vorhandenen wurde in einer Doktorarbeit in München (ich war Mitglied der Prüfungskommission) erstmals gezeigt, dass in einem sehr kleinen Bereich des Zentrums eine 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

Schwarzen 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 gefunden hatte. 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 Akkretions-scheibe 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 gelegentliche 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 dieser Nuclear Star Cluster einem schweren, sehr alten Kugelsternhaufen entspricht, der vorhanden war noch 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 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 diese das interstellare Gas, sodass dieses mit den Magnetfeldern der bewegten Materie wechselwirkt, und von dieser mitgenommen wird. 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, laufend 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 auf sie einfallende elektrisch geladene schnelle Teilchen, Ionen oder Elektronen, von diesen elastisch abprallen. So wird Bewegungsenergie der Plasmafront übertragen auf die schnellen geladene Teilchen. 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 erfolgen auf Grund der im Raum ruhenden turbulenten Magnetfelder im Aussenbereich der Stoßfront. 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 verstärkt die Magnetfelder. Die Beobachtungsdaten sind konsistent mit modellmäßigen Rechnungen. Der Prozess endet, sobald die schnellen Ionen, auf Grund einer zu hohen Energie, nicht mehr reflektiert werden. Die Stoßfronten sind dünn, die äherungsweise homogene Teilbereiche dieser turbulenten Magnetfeldern sind klein im Vergleich zur Dicke der Stoßfronten.

Der beschriebene Mechanismus der Beschleunigung wirkt auch auf Elektronen. Wegen der geringen Masse

strahlen diese Synchrotron-Strahlung ab, und verlieren so ihre Energie. Sofern man die Synchrotron-Strahlung beobachten kann, sehen wir die Orte, an denen die Beschleunigung stattfindet: Bei der von Tycho Brahe beobachteten Supernova ist es eine 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 unterschieden haben.

Abschätzungen zeigen, dass die Teilchen der so erzeugten 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 beeinflusst.

Auf der Erde ist die kosmischen Strahlung Ursache der Höhenstrahlung, die in Ballonaufstiegen von Victor Hess 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 Atomkerne, insbesondere bei den höchsten Energien. Deren Häufigkeit entspricht der Erzeugung in den Supernovae. Einige von ihnen haben in der langen Zeit ihrer Existenz als schnelle Ionen Nukleonen verloren, in Stößen mit anderen Atomkernen.

Da die Atomkerne durch Magnetfelder abgelenkt werden, sagt die beobachtete Richtung des Einfalls auf die Erde nichts aus über den Ort ihrer Quelle. Dies ist anders bei hochenergetischen Gammaquanten. Erzeugt werden diese nach Protonenstößen im Bereich der Quelle im Zerfall neutraler Pionen. Deren Energie und Richtung wird gemessen über die vom Schauer emittierte Cerenkovstrahlung. Diese Schauer unterscheiden sich etwas von der von Atomkernen. Derzeit gelingt es, in der galaktischen Ebene ca. 60 Quellen kosmischer Strahlung zu identifizieren, den meisten kann man Supernovafronten oder Pulsaren 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. Letztere 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 Strahlung relativ nahen 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 dieses sich als weitgehend unabhängig von der Stärke eines anfänglichen (seed) Felds erweist.

VI. GRAVITATIONSWELLEN

Falls sich massereiche Schwarze Löcher mit ihren extrem starken Gravitationsfeldern beschleunigt bewegen, werden sie zu Quellen energiereicher Gravitationswellen, vergleichbar der, die am 14. September 2015 die Erde passierten (s.o.). Gravitationswellen sind mit Lichtgeschwindigkeit fortschreitende Kompressionen der Raum-Zeit Geometrie. Man erwartet sie, wenn z.B. nach der Vereinigung zweier Galaxien deren Kerne eine den Doppelsternsystemen analoge Struktur bilden. Bei deren 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 Ruhenergie abgestrahlt werden, wobei die Abstrahlung unmittelbar vor der Vereinigung besonders intensiv ist, es geht hier um eine Zeitskala von weniger als einem Umlauf. Entsprechend hat man dann nicht mehr die durch den Umlauf gegebene Symmetrie der Abstrahlung, es kann vielmehr eine Richtung bevorzugt werden. Berechnungen zeigen, dass diese einseitig gerichtete Gravitationsstrahlung einige Promille der insgesamt 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 Muttergalaxie. 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 mindestens 1300, vermutlich aber über 2000 Galaxien in einem Bereich von 9 Millionen Lichtjahren Durchmesser. Der Virgo-Galaxienhaufen ist 65 Millionen Lichtjahre von uns entfernt. 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 Billiarde Sonnenmassen. Man erhält sie aus der Beobachtungen des Schwerefelds. Die Ausdehnung und damit die Masse wird festgelegt, indem man sich auf einen Bereich bezieht, dessen gemittelte Dichte den Wert 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 sind ein Maximalwert.

Charakteristisch für Galaxienhaufen ist ihr intergalaktisches Gas, ein 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 Gammastrahlung. 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 erlaubt die Frage, 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 Fritz Zwicky schon 1933 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 (Böhringer) sind 87 Prozent Dunkle Materie, 11 Prozent Gas und 2 Prozent sichtbare 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, zur Unterscheidung von der Dunklen Materie bezeichnet man die gewöhnliche Materie als Baryonische Materie. Es ist Konvention, mit dem Begriff Materie alles das zusammenzufassen, was unter dem Einfluss der Gravitation seine Bewegung ändern, und sich infolge dessen 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, ist 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 in diese Bereiche und somit zur weiteren Erhöhung der Dichte. 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 stärker als beim Hineinlaufen, so dass 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 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. Schon 1919 wurde bei einer Sonnenfinsternis die Ablenkung des die Oberfläche passierenden Sternenlichts um 1,7 Bogensekunden gemessen. Vergleichbar lenken Galaxien und Galaxienhaufen Licht ab. Wäre die Verteilung ihrer Masse ideal sphärisch, so würden wir Lichtquellen genau dahinter nicht als Punkte, sondern als konzentrische Ringe sehen, als sgn. Einstein Ringe. Wegen Abweichungen von der Axialsymmetrie, und von einer ideal sphärischen Verteilung kann man von einer Lichtquelle immerhin mehrere kurze Segmente erhalten. Auf Grund der abbildenden Eigenschaften zeigen diese mehr Licht, etwa um einen Faktor 20, als bei direkter Beobachtung. Durch diesen Linseneffekt werden extrem ferne Quasare sichtbar. Gelingt es, den vielen beobachteten Segmente die unterschiedlichen 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

Man spricht vom starken Gravitationslinseneffekt, wenn sich Segmentbögen wechselseitig zuordnen lassen. Das ist eher die Ausnahme. Der Regelfall ist, dass die Sternpositionen etwas verschoben erscheinen, und dass vom Segmentbogen nur eine elliptische Verformung des Bilds der Quelle bleibt. In die Auswertung gehen Modellierungen und statistische Methoden ein. Dieser 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.

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 zeigenden, 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 absoluten 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 zentrale 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, wird irgendwann die Dunkle Energie dominieren. 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. Inzwischen sind so viele davon untersucht worden, in Entfernungen von bis zu 9 Milliarden Lichtjahren, dass als gesichert gilt, dass wir uns gegenwärtig bereits in der Phase der beschleunigten Expansion befinden, dass wir aber vor mehr als 7 Milliarden Jahren noch verzögerte Expansion hatten. Dies wurde mit dem Nobelpreis 2011 an Saul Perlmutter (* 1959), Brian P. Schmidt (* 1967) und Adam Riess (* 1969) gewürdigt.

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 Milli-

arden 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 dieses 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 worden. 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 vorgegebenen 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 bei großen Winkeln einen nahezu konstanten Wert, dem bei kleineren Winkeln, beginnend bei einem Bogengrad, eine Folge von mehreren Maxima überlagert, in abnehmender Stärke. Man spricht von einem nahezu skaleninvariantem Leistungsspektrum, dem akustische Oszillationen überlagert sind. 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. Dies waren Inhomogenitäten der Metrik, sodass anfänglich die Dunkle Materie, des Plasma und die Neutrinos dieselbe Verteilung hatten. Das Geschehen danach war bestimmt von dem Anwachsen des Horizonts, in dem die Gravitation wirksam ist, und durch das unterschiedliche Verhalten der Dunklen

Materie, des Plasmas, des Strahlungsfelds und der Neutrinos:

Die Dunkle Materie folgte dem Gravitationsfeld und konzentrierte sich in diesem entsprechend weiter. Die Neutrinos durchdrangen alles, fast ohne Wechselwirkung, mit Lichtgeschwindigkeit, und hatten so nur geringen Einfluss auf das Gravitationsfeld. Das elektromagnetische Strahlungsfeld 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 dessen Druck. Druck wirkt der ungleichmäßigen Verteilung entgegen. Doch nach etwa 5000 Jahren war die Temperatur soweit gesunken, dass die Kräfte des Gravitationsfelds, erzeugt durch Bereiche hoher Dichte von Dunkler Materie, dominierten. Entsprechend wurde das Plasma in diese Bereiche hineingezogen. Die so erzeugte Konzentration des Plasmas erzeugte Kräfte des Drucks, die stärker wurden als die der Gravitation, dies Maximum des Drucks breitete sich im elastischen Medium aus, mit Schallgeschwindigkeit als Stoßwelle. Es bildete sich ein Muster von Wellen wie bei einem Stein, den man ins Wasser wirft.

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 ist diese gleich der Lichtgeschwindigkeit, dividiert durch die Quadratwurzel von 3.

Die Inhomogenitäten der Dunklen Materie nahmen in dieser Zeit um einen Faktor 30 an relativer Stärke zu. Die beobachtete Kosmische Hintergrundstrahlung aus Bereichen starker gravitativer Anziehung ist zu größeren Wellenlängen hin verschoben, erscheint somit als kälter. Expansion und Konzentration der Dunklen Materie sind so miteinander verbunden, dass die Tiefe dieser Potentialtöpfe erhalten bleibt. Deshalb ist dieser als Sachs-Wolfe Effekt bezeichnete Beitrag des Gravitationspotentials zur beobachteten Temperatur der Strahlung unabhängig vom Zeitpunkt der Lichtemission.

Die kosmische Mikrowellenstrahlung zeigt uns die Temperatur, und damit die Dichte des Plasmas, zum Zeitpunkt der Auflösung des Plasmas, bei etwa 380.000 Jahren. Die Strecke, die der Schall in dieser Zeit zurückgelegt hatte war bestimmt durch die Schallgeschwindigkeit, die Laufzeit und die Expansion des Raums. Im Leistungsspektrum erscheint die Reichweite der Plasmawelle im Winkelbereich des ersten akustischen Peaks, bei etwa einem Bogengrad. 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. Die abnehmende Stärke des

Leistungsspektrums zu sehr kleinen Winkeln hin versteht man als 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 uranfänglichen, (d.h. 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 Anteile von Dunkler Materie und normaler Materie relativ zum Strahlungsfeld dem entsprechen, was wir bereits diskutiert hatten. Die weitere Expansion des Raums ist stark beeinflusst durch die Stärke der Dunklen Energie, die als Kosmologische Konstante parametrisiert wird. Das gemessene Leistungsspektrum zeigt eine ausgeprägte Struktur, und bestimmt die genannten Größen verblüffend präzise. (Planck-Mission, PJ 12 19, 2013). Die beobachtete Skaleninvarianz ist eine spezielle Form von fraktalen bzw. selbstähnlichen Mustern. Sie bedeutet, dass die Verteilung, statistisch gesehen, in jedem Maßstab als gleich erscheint.

Die kosmische Mikrowellenstrahlung zeigt, dass die zugrunde liegenden anfänglichen, statistisch verteilten sphärischen Fluktuationen 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 Bogenrad nicht von Ausgleichsvorgängen beeinflusst ist. Die entsprechenden Inhomogenitäten der Materie existierten bereits im 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 entspricht 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 Gravitationslinseneffekt 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 wick 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, sodass der Bereich von der kosmischen Expansion abkoppelte. 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. Es gibt nur die Wandlung von potentieller Energie in kinetische und umgekehrt, wie bei einem Pendel ohne Dämpfung. Bei normaler Materie hingegen kann der Wandlung in kinetische Energie die in thermische folgen. Wird diese dann 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 (aktuell die Illustris-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 die räumliche Verteilung der Galaxienhaufen ein "Leistungsspektrum" erhält, ähnlich wie für die Kosmische Hintergrundstrahlung. Geht man von den Planck-Daten aus, und berechnet man, wie in der Millenniumsimulation, das heute zu erwartende Leistungsspektrum, so stimmt dies gut mit den Messungen überein. Bei ausreichender Genauigkeit (Böhlinger) sollte sich dabei die Masse der Neutinos bestimmen lassen. Aktuelle Analysen (BOSS, 2016) geben als oberes Limit $0,15 eV/c^2$ an.

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 des 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 Kugelschale geringfügig erhöhter Dichte. Deren Radius entspricht der Laufstrecke des Schalls. 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 Anzahlichte der Galaxienverteilung. Der Radius dieser nur schwach ausgeprägten Korrelation liegt heute bei knapp 500 Millionen Lichtjahren, eine Folge der kosmische Expansion. Dies sind Maßstäbe bekannter Länge im Raum. Gelingt es diese auch in großem Abstand zu beobachten, 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 trotz hoher Anfangstemperatur 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 Sternensystemen eine dunkle Zeit von etwa 200 Millionen Jahren endete, 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 somit 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 Sternengeneration 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 geringen 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 einer beträchtlichen Konzentration an schwereren Elementen verdichtete 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 maximale 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 teilnehmen konnte, sodass ihre Zustände sich nicht mehr änderten, bildete diese ein thermodynamisch unabhängiges System. in Beispiel ist die Abkopplung der Neutrinos.

Während der Expansion änderte sich die Temperatur und damit 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, der 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 erweist sich der erste Schritt als Flaschenhals, der den zeitlichen Ablauf beherrscht. 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, des Deuteriums, 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 diese 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 in der 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. (Mit LHC sind die Energien noch höher geworden.) Übersetzt in Temperaturen und Zeit führt uns dies zurück in ein Alter des Universums von nur einer zehntel Milliardstel Sekunde. Das thermodynamische Gleichgewicht bedingt, 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 noch die Feldteilchen der Schwachen Wechselwirkung. Wegen der hohen Temperaturen spielte die beschränkte Reichweite der Schwachen Wechselwirkung keine Rolle mehr, so war sie in ihrer Stärke mit der Elektromagnetischen WW vergleichbar. Man spricht vom Elektro-Schwachen Phasenübergang.

Je weiter wir in der Zeit zurück denken, desto größer war der Energieinhalt des Universums. Plausibel ist dies, da in gleicher Weise die potentiellen Energie zunahm, sodass beide Beiträge sich näherungsweise zu Null addieren.

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 Konzepte der Bildung des Kosmos gehen aus von einer völlig symmetrischen Anfangssituation, entsprechend des Strahlungsfelds, und führen die Annahme ein, dass der minimale Überschuss an Teilchen sich anschliessend erst entwickelt hat, auf Grund einer Wechselwirkung, welche diese Symmetrie bricht. In der Tat beobachtet man bei K und B Mesonen radioaktive Zerfälle, welche diese Teilchen/Antiteilchen-Symmetrie verletzen. Doch reicht die daraus abgeleitete Stärke nicht aus um diesen, für die Kosmologie entscheidend wichtigen Vorgang auch quantitativ zu beschreiben. Trotzdem besteht eine Art von Konsens, dass dieses Problem sich lösen wird. Die Klärung dieser Frage ist eines der aktuellen Ziel der Forschung von Teilchenphysikern und Kosmologen.

Alle weiteren Überlegungen zum Anfang erfordern neue Physik. Sie hat zu begründen die extrem hohen Temperaturen in früher Zeit, und die Homogenität und Isotropie des Universums im Verbund mit der Existenz von Fluktuationen fraktaler Struktur, dem Ausgangspunkt späterer Strukturbildung. Das erstmalige Auftreten dieser Situation bezeichnet man heute als «hot big bang». Die Frage ist also, was war vor dem hot big bang? Und wie lässt sich dies zeitlich zuordnen?

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

terie und der Wechselwirkungen sich erst in Folge davon gebildet haben. Auch werden sie erst, auf Grund der sich entwickelnden Verhältnisse, in der Folge wichtig. Somit erweist sich dies als ein natürliches Konzept.

A. Das Horizontproblem

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. Solange man sich einen Kosmos vorstellte, der von Anfang an verzögert expandierte, war dies 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 Beobachtungsort aus gesehen, diese Geschwindigkeiten größer werden als die des Lichts, so sind von diesem Beobachtungsort Ereignisse dort grundsätzlich nicht mehr wahrzunehmen. Man sagt, diese Bereiche liegen hinter dem Horizont des Beobachtungsorts. Man bezeichnet diesen Abstand auch als Hubble-Radius. Ereignisse hinter dem Horizont können auf den Beobachtungsort 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, d.h. die Geschwindigkeit einer Galaxie relativ zum Beobachtungsort 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 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 dritter 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 zeigt, dass in einem immer 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. Dies bezeichnet man als das Horizontproblem.

Das Problem verschwindet, falls die hohen Geschwindigkeiten der Expansion entstanden sind in einer vorausgegangenen Phase beschleunigter Expansion. Entsprechend denkt man für den Anfang nicht eine Singularität der Geschwindigkeiten, sondern 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. Dies widerspricht nicht der experimentellen Kenntnis, jedoch erfasst diese nicht die hier angesprochenen Größenordnungen. Man kann es eher so sehen, dass hier die Kosmologie eine Aussage macht über Eigenschaften elementarer Teilchen. Es bleibt für den Anfang die grundsätzliche Frage, wie kleine Dimensionen physikalisch noch sinnvoll sind? Hierbei sind Gravitations- und Quantenphysik angesprochen.

Auch wenn wir noch keine Theorie haben, die Allgemeine Relativitätstheorie und Elementarteilchen-Physik vereinigt, 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, und 10^{32} K entspricht (D. Lüst), wenn man sie 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 Relativitäts Theorie. 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. Man stellt sich vor ein skalares Feld mit einer Energiedichte, die der quantenmechanischen Nullpunktsenergie entspricht, auch wenn diese sehr hoch ist. Deswegen wird es als metastabil oder als Falsches Vakuum bezeichnet. Ihm entspricht eine Raum-Zeit Dynamik, wie sie eine kosmologische Konstante auch 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 kennenge-

lernt. 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 dieser 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 man die Potentielle Energie des Feld von einer Feldgröße abhängen lässt, die als dynamische Variable zu betrachten ist, sodass der zeitlichen Ablauf bestimmt ist durch die Abhängigkeit der potentiellen Energie von der Feldgröße und durch die kinetische Energie, auf Grund der Änderung der Feldgröße. 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 kinetische Energie. Die freigesetzte thermische Energie in diesem Übergang 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, wenn man die Sprache der Newtonschen Mechanik benutzt. Dann kann man auch sagen, dass sich der Energieinhalt des Kosmos und das Feld der Gravitation gegenseitig aufheben. 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. Die Einsteinschen Gleichungen sind so konstruiert, dass Erhaltung von Energie und Impuls sichergestellt ist (SdW Sept.2015). So erweist sich die Gravitation als Quelle des Energieinhalts des Universums. 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 Fluk-

tuation 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 reden von Fluktuationen 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, denn 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 bleibt, sind 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 dies bestimmte 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 Winkelbereiche kleiner als ein Bogengrad. 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 Bogengrad 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.

Es gab 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 wre interessant, weil das Leistungsspektrum der Gravitationswellen ein direktes Maß ist für die Energiedichte bei der Erzeugung (Starobinski, 1979). Beobachtet wird es über die lineare Polarisierung der Kosmischen Hintergrundstrahlung.

Lineare Polarisierung entsteht auf Grund von Gradienten der Temperatur. Längs eines konzentrischen Kreises um einen heißen Punkt zeigt die Polarisierung 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 vergetäuscht werden durch Gravitationsfelder auf dem Weg zu uns, denn diese wandeln lineare Polarisierung im E-Mode in den B-Mode. Mit zunehmend kleinen Beobachtungswinkeln unterhalb 1 Grad wird dieser

Effekt als dominant beobachtet.

Zurück zur Inflation. 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, der Begriff der Planck Skala ist 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 Beobachtungen 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 man Wege aufzeigen müssen, die potentiell Aussagen dieser Art falsifizieren können.

Aus dem Inflationären Feld entstand die uns heute bekannte Materie. Qualitativ erscheint dieser Vorgang wie ein Phasenübergang, doch kann man ihn nicht mit den in der Thermodynamik definierten identifizieren (Böhringer). Was diesen Prozess auslöste, und wie er im Einzelnen ablief ist eine der großen Fragen. Danach gab es nur noch 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. Dies erst wäre physikalisches Verstehen im eigentlichen Sinne. Dazu allerdings bedarf es neuer Einsichten in 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, die mit dem Beginn des heißen Urknalls verbunden ist. 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. Dabei waren Energiedichte und Gravitation 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 zu Anfang sehr hohen Werten. Dies schafft einen engen Bezug zur Teilchenphysik.

1. Stringtheorie

Letztlich 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 energetisch 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 vorhandenen 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.

2. Supersymmetrie

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.

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 natürliche 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().

3. Zum Higgs-Mechanismus

Der Higgs-Mechanismus ist Teil des Standard-Modells. Das Standard-Modell ist extrem erfolgreich und experimentell sehr sorgfältig untersucht. Das Higgs Teilchen wurde vorhergesagt und 2012 am LHC des CERN entdeckt. noch ist offen, ob es nur eine Sorte oder mehrere verschieden gibt. Ich folge Frank Close, *Verborgene Symmetrie, Spektrum der Wissenschaft*, November 2014, Seite 49.

In der Physik gibt es theoretische Vorstellungen, die von einer Symmetrie ausgehen, und von deren Brechung. Bei Elementarteilchen geht es um die Eichsymmetrie. Diese sagt, dass alle elementaren Teilchen, d.h. die Feld-Bosonen und alle Leptonen und Quarks, masselos sind. Die Eichsymmetrie wäre erfüllt, wenn diese alle masselos wären. Die beobachteten Massen der elementaren Teilchen beinhalten eine Brechung dieser Symmetrie, die masselose Feldteilchen Photonen und Gluonen sind davon nicht betroffen.

Um den endlichen Wert der Massen zu erklären, nimmt man ein Higgs-Feld an. Dessen Energie, die Feldenergie des Higgs-Felds, ist eine Funktion der Symmetriebrechung, mit einer funktionalen Abhängigkeit, die der Form eines Sombreros entspricht: Bei verschwindender Symmetriebrechung hat die Feldenergie ein Maximum, mit zunehmender Symmetriebrechung erreicht sie ein Minimum, und nimmt dann wieder zu. Dies bedeutet, dass vollständige Symmetrie energetisch instabil ist, und dass der energetisch stabile Zustand mit einem gewissen Grad an Symmetriebrechung verknüpft ist. Alle elementaren Teilchen befinden sich in diesem Minimum. Je nach den Quantenzahlen dieser Teilchen führt diese Symmetriebrechung zu einem Wert der Masse.

Dies Minimum der Feldenergie entspricht einem Oszillatorpotential (als Funktion der Symmetriebrechung), und dementsprechend muss die Energie dieses Felds quantisiert sein. Das Feldquantum der Anregung in diesem Potential wird gleichgesetzt mit dem Higgsteilchen. Die experimentelle Entdeckung eines Teilchens der Masse von $125 \text{ GeV}/c^2$, im Jahre 2012 am LHC des CERN, ist mittlerweile eindeutig, auch ist Spin Null bestätigt. Ob es nur ein, oder noch weitere Higgsteilchen gibt, ist noch nicht entschieden, Die Kopplung des gefundenen Teilchens an Leptonen und Quarks ist proportional zu deren Masse. Dies alles wird als Bestätigung des Standardmodells gesehen (Nobelpreis 2013 an Englert und Higgs).

Offen ist der Beitrag des Higgsfelds zur Feldenergie des Vakuums. Diese Problematik ist vergleichbar mit der ungelösten Frage der Nullpunktenergie des elektromagnetischen Feldes und anderer Felder. Von einer Vereinigung von Gravitation und Quantenmechanik erhofft man eine Antwort.

4. Dunkle Materie

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 Detektorkristallen 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.

Ende 2014 gibt es aus der Röntgen-Beobachtung von Galaxien (Andromedanebel) und Galaxienhaufen Hinweise, dass Dunkle Materie aus sterilen Neutrinos mit einer Masse nahe 7 keV besteht. Durch Neutrinooszillation gehen sterile Neutrinos in Muon-neutrinos über, wobei ein Röntgenquant die Hälfte der Energie trägt. Die statistische Signifikanz der Linie bei 3,52 keV wird mit 4,5 sigma angegeben.

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 Entdeckung 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 Allgemeinen 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 Pro-

zent 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, von 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.

Die Quantenmechanik spricht von Teilchen und Wellen, im Fall des Lichts von Photonen und von elektromagnetischen Wellen. Was ist nun die Wirklichkeit? Für Aristoteles gehört zur Wirklichkeit nicht nur das Faktische, sondern auch das Potentielle. Nicht nur die Art und Weise, wie etwas sich im konkreten Augenblick darstellt, sondern auch alle die anderen Möglichkeiten, in denen es sich hätte darstellen können. Beobachtet man ein Teilchen, so ist dessen Ort durch die Beobachtung, d.h. den Messprozess, bestimmt. Die Wellennatur sagt aus, mit welchen Wahrscheinlichkeiten das Teilchen auch an anderen Orten hätte beobachtet werden können.

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 Unschärferrelation. 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. In 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.

Die Massen der Feldquanten und der elementaren Teilchen sind Folge des Higgs-Felds. Ohne das Higgs Feld hätten sie alle die Masse Null. Für masselose Teilchen gelten bestimmte Symmetrien, als Folge davon zeigen elementare Teilchen in Näherung chirale Symmetrie.

-
- [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 Vortreffer,
Campus (2008).
- [8] Webseiten der Universitätssternwarte München
www.usm.uni-muenchen.de
- [9] Webseiten des MPA für Astrophysik
www.mpa-garching.mpg.de
- [10] Webseiten des MPE für Extraterrestrische Physik
www.mpe.mpg.de
- [11] Webseiten der ESO
www.eso.org/public/
- [12] Physik Journal,
diverse Beiträge
- [13] Spektrum der Wissenschaften
diverse Beiträge