

Die Geschichte des Universums

Inhalt

Kapitel	Seite
Die Galaxienflucht	2
Geburt aus dem Nichts?	5
Musik im Kosmos	8
Das Standard- Modell	11
Geschlossenes oder offenes Universum?	12
Die Planck- Ära	12
Supersymmetrie und Inflation: GUT- Ära	13
Der Teilchenzoo	15
Baryogenese	17
Quark- Ära	21
Hadronen- Ära	21
Leptonen- und Strahlungsära	22
Nukleosynthese	23
Strukturen	26
Die Zukunft	30
Weltmodelle	32
Weltpostulat	34
Das Virgo- Konsortium	35
Die Simulation	37
Kosmische Geschichte	38

Die Geschichte des Universums

Teil 1

Die Galaxienflucht

Wir wissen heute aufgrund vieler Beobachtungsdaten, dass unser Universum irgendwann in der Vergangenheit einen Anfang hatte. Es existiert nicht seit ewigen Zeiten, sondern ist mit 13,7 Milliarden Jahren sogar als noch recht jung zu bezeichnen. Bis zu [Einsteins](#) revolutionären Gedanken nahm man Raum und Zeit als unveränderliche Größen hin, ja man sah das gesamte Universum als beständige, sich in alle Ewigkeit nie ändernde Einrichtung. Für uns fast unbegreiflich, bestand das gesamte Universum bis in die frühen Jahre des 20. Jahrhunderts lediglich aus der Milchstraße, zu der auch die seltsamen "[Nebelflecke](#)" gehörten. Erst als man diese als eigenständige Sternsysteme - weit entfernte Galaxien - erkannte, begann man die ungeheure Ausdehnung des Kosmos zu erahnen.

Der erste Schrecken über Einsteins neue Erkenntnisse war noch nicht ganz überwunden (er glaubte selbst anfangs noch an ein statisches, unveränderliches Universum),

entdeckte [Edwin Hubble](#) (1889 bis 1953) 1929 aufgrund seiner Messungen der



[Rotverschiebungen](#), dass sich (fast) alle [Galaxien](#) im Universum von uns und voneinander entfernen. Das gab bereits einen ersten Hinweis auf einen gemeinsamen Ursprung. Hubble hatte sich inzwischen einen Namen gemacht, als er 1923 am Mount-Wilson-Observatorium nachwies, dass die Andromeda-Galaxie M 31 weit außerhalb der Milchstraße liegt und ein eigenständiges Sternsystem ist. Erstmals konnte er auch die Entfernung zur Andromeda-Galaxie bestimmen, wenn auch aufgrund der damaligen Ungenauigkeit der Abstand mit 1,5 Millionen Lichtjahren viel zu gering war.

Aus den Messungen der Rotverschiebungen leitete Hubble auch seinen wichtigsten Beitrag ab, die [Hubble-Konstante](#). Durch sie war jetzt klar geworden, dass wir in einem expandierenden Universum leben.

Grund für die Flucht der Galaxien voneinander ist *nicht* eine gemeinsame, gerichtete Eigenbewegung. Vielmehr werden sie quasi durch den sich ausdehnenden [Raum](#) mitgerissen. Um sich dies besser verdeutlichen zu können,

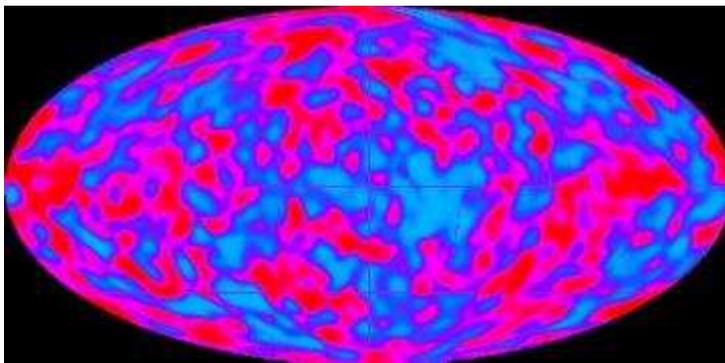
wird vielfach das Beispiel eines Hefeteigs mit Rosinen verwendet. Wenn der (Raum-)Teig aufgeht, sich also ausdehnt, werden die (Galaxien-)Rosinen dabei mitgenommen und alle entfernen sich voneinander. Es ist bei einer solchen *RaumTeig*-Expansion nicht möglich, dass sich zwei *GalaxienRosinen* einander nähern! Doch gibt es auch Ausnahmefälle im All, nämlich dann, wenn sich zwei Galaxien gravitationsbedingt nähern und sogar kollidieren können. Das steht beispielsweise unserer Milchstraße in etwa 3 Milliarden Jahren bevor, wenn sie mit der Andromeda- Galaxie verschmelzen wird.

1 1948 veröffentlichte der Wissenschaftler **George Gamow** (1904 bis 1968) seine Theorie eines heißen Anfangs des Weltalls, nach der alles in einem heißen Urbrei (er nannte dies **Ylem**) begann, der irgendwann expandierte.



Den entscheidenden Beweis für den Urknall lieferten dann 1965 zwei US- Ingenieure (**Arno Penzias** und **Robert Wilson**), als sie die so genannte **3 [K]- Hintergrundstrahlung** (exakter: 2,725 [K], entsprechend rund -270 [°C]) entdeckten (zur Strahlung eines Körpers siehe auch [Schwarzer Körper](#)).

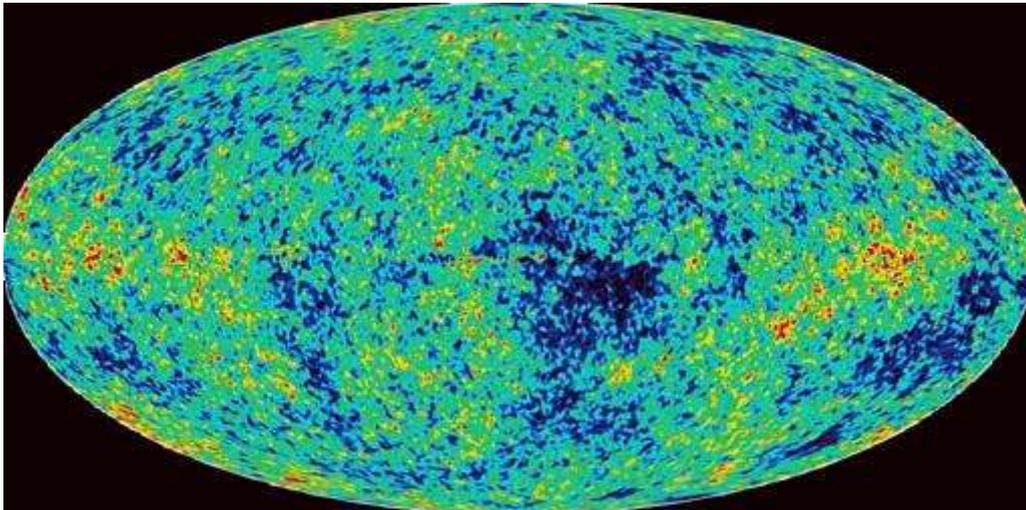
Gamow hatte in seiner Theorie bereits vorhergesagt, dass aus dem von Strahlung dominierten Urbrei auch heute noch Reste vorhanden sein sollten. Die hier nun entdeckte neue Strahlung im Mikrowellenbereich kam aus allen Himmelsrichtungen mit gleicher Intensität (obwohl heute bekannt ist, dass die Strahlung entsprechend dem weiter unten beschriebenen Standardmodell in verschiedenen Richtungen um einige Tausendstel [K] differiert). Möchten Sie diese Strahlung einmal sehen? Schalten Sie den Fernseher ein, ohne dass ein Sender eingestellt ist. Etwa 1% des "Schneegeflimmers" auf dem Bildschirm stammt aus der kosmischen Hintergrundstrahlung!



Nebenhin Bild zeigt, wie der Satellit **COBE** (Cosmic Background Explorer) 1992 die feinen Unterschiede - bis zu einem Hunderttausendstel [K] - der Hintergrundstrahlung "sah". Wärmere Regionen erscheinen rot, kältere blau. In dieser Ansicht zieht sich die galaktische Ebene horizontal durch die Bildmitte. Dieses Bild ist eine Zeitreise in die jüngste Vergangenheit des Universums, weiter können wir nicht

zurück blicken. Der Mikrowellenhintergrund ([CMB](#), [Cosmic Microwave Background](#)) und die Galaxienflucht sind neben einigen anderen überzeugende Argumente dafür, dass alles, was unser Universum enthält, einmal in einem winzig kleinen Raumgebiet komprimiert war und es dort einen Beginn der Expansion gab.

Mit freundlicher Genehmigung von DMR, COBE, NASA



Mit freundlicher Genehmigung von NASA/WMAP Science Team

Im Jahre 2001 wurde die [Wilkinson Microwave Anisotropy Probe](#) (WMAP) in eine Sonnen- Umlaufbahn gebracht. Die Empfindlichkeit und das Auflösungsvermögen dieses Geräts waren gegenüber COBE deutlich gesteigert worden, WMAP hatte bei einer Auflösung von $0,3^\circ \times 0,3^\circ$ eine Empfindlichkeit von max. 20 $[\mu\text{K}]$, das sind 20 Millionstel $[\text{K}]$! Rot in diesem Bild des Himmels bedeutet wärmer, blau kälter. Nun mag man auf den ersten Blick denken "Aha, ein nettes Bild, aber was sehe ich hier?" Zunächst einmal ist das die Ansicht des Universums, als es gerade 379 000 Jahre alt war. Zu diesem Zeitpunkt war der Kosmos bereits auf etwa 3000 $[\text{K}]$ abgekühlt. Bis hin zu dieser Temperatur lag alle Materie vollständig ionisiert vor, d.h. es existierten noch keine Atome, sondern Protonen, Neutronen und Elektronen führten ein eigenständiges Leben. Das aber war von der Strahlung beherrscht! Die Photonen der Strahlung kollidierten ständig mit den Teilchen, wurden von ihnen absorbiert, sogleich wieder emittiert und erneut absorbiert usw. Diese **Streuung** der Photonen "glättete" das noch junge Universum, geringe Schwankungen der Dichte und Temperatur wurden sogleich ausgeglichen.

Nun aber, ab 3000 $[\text{K}]$, änderte sich schlagartig alles! Die Protonen konnten jetzt die Elektronen einfangen und Atome bilden (überwiegend Wasserstoff und Helium). Die Streuung der Photonen an den geladenen Teilchen hörte damit schlagartig auf und das Universum wurde **durchsichtig**. Denn nun konnten die Photonen frei ihrer Wege ziehen und sich ungehindert bewegen. Genau diesen Moment der kosmischen Geschichte sehen wir auf dem Bild. Sterne oder

Galaxien konnten zu diesem frühen Zeitpunkt noch gar nicht existieren und sind deshalb auch nicht zu sehen. Wieso aber sind die feinen Temperaturunterschiede so wichtig für uns, dass man solch kostspielige und empfindliche Geräte wie die WMAP entwickelte? Nun, der Theorie zufolge sollten im jungen Kosmos geringe Schwankungen der Dichte bzw. Temperatur auftreten, die so genannten **Fluktuationen**. Wie schon gesagt, wurden sie durch den Strahlungsdruck lange Zeit geglättet. Nach der **Rekombination**, der Vereinigung von Elektronen und Protonen war das nicht mehr der Fall und die Fluktuationen "froren" aus. Aus den etwas dichteren, heißeren Zonen sollten sich später die Galaxienhaufen bilden, die etwas dünneren Gebiete wurden dann zu den großen Leerräumen, die wir heute beobachten. Doch zunächst wollen wir sehen, wie und woraus das Universum überhaupt entstehen konnte.

Geburt aus dem Nichts?

Was war vor dem Urknall, was also vor dem Beginn unseres Universums? Das ist eine der am häufigsten gestellten Fragen, auf die es keine nachprüfbare Antwort geben kann. Lassen wir zunächst vor unserem geistigen Auge den Film der kosmischen Entwicklung rückwärts laufen. Das All zieht sich dabei immer mehr zusammen, bis alles schließlich in einem winzigen, fast unendlich kleinen Punkt verschwindet, der **Singularität**. Diese würde entstehen, wenn wir alles bis zum Zeitpunkt Null zurück rechnen. Die Frage ist dabei, gibt es überhaupt Singularitäten im Kosmos? Wenn ja, erübrigt sich die Suche nach dem **DAVOR**, denn wir wissen nicht, durch welchen Prozess solch eine Singularität entstehen könnte. Es gibt aber viele andere Möglichkeiten, die von verschiedenen Wissenschaftlern in Betracht gezogen werden und die z.T. auch gleich eine Aussage über die künftige Entwicklung mitliefern:

- **Gabriele Veneziano/Maurizio Gasperini** gehen von der **Superstringtheorie** aus und postulieren ein Stringvakuum als einfachsten Grundzustand. Wie wir wissen, ist das Quantenvakuum Fluktuationen ausgesetzt, und irgendwann könnte sich eine höchst kritische Energiedichte ausbilden. Das kann zu einem Kollaps führen und zum Abschnüren eines Universums. Nach diesem Modell könnte es unzählige Kosmen geben.
- **Albert Einstein** ging noch von einem **statischen Universum** aus. Es war immer da und bleibt ewig so, wie es ist. Einstein verwarf diesen Gedanken jedoch nach Hubbles Entdeckungen.
- **Fred Hoyle, Thomas Gold** und **Hermann Bondi** riefen bereits 1948 die **Steady State Theorie** ins Leben, die ebenfalls von einem nahezu unveränderlichen All ausgeht. Da die Galaxien aber auseinander driften, postulieren sie ein "Schöpfungsfeld", welches die Expansion verursacht und aus dem genau soviel Materie erschaffen wird (aus der neue Galaxien gebildet werden), wie Galaxien aus dem Universum durch die Expansion verschwinden. Nach einer Neufassung dieser Theorie, der **Quasi-Steady-StateTheorie**, an der auch **Geoffrey Burbidge** beteiligt war, gibt es kein umfassendes Schöpfungsfeld mehr und auch keine gleichmäßige expansive Entwicklung (**Big Stream**) des Universums, sondern lokale Schöpfungsfelder, die spontan Materie (Wasserstoffatome)

hervorbringen. Das soll möglicherweise durch so genannte **Weißer Löcher** vollzogen werden, die auf irgendeine Weise mit **Schwarzen Löchern**, die sich in anderen Raumzeiten befinden, korrespondieren sollen. Im Gegensatz zum Schwarzen Loch kann das Weiße dabei nur und ausschließlich Materie ins All abgeben, doch ist die tatsächliche Existenz solcher Exoten mehr als fraglich. Übrigens stammt der Begriff **Big Bang** (Urknall) von Fred Hoyle, der ihn allerdings mehr als Schimpfwort für die Gegner seiner Theorie verstand. Heute hat die Steady State- Theorie kaum noch eine Bedeutung, zu viele Fakten, wie die Hintergrundstrahlung oder dass die Galaxien eine Entwicklungsgeschichte haben, sprechen dagegen. Die Theorie des Urknalls, wie sie im Folgenden beschrieben wird, ist aufgrund vieler Fakten die wohl wahrscheinlichste:

- **Stephen Hawking, Alexander Friedmann** und **Roger Penrose** offerieren uns den Urknall (Big Bang). Wie der Fantasy- Autor Terry Pratchett formuliert:

Am Anfang war das Nichts - und das ist dann explodiert

Der Kosmos entstand demnach aus einer Singularität, wie schon angedeutet und expandiert seitdem. Ist die Massendichte des Universums groß genug, wird aufgrund der Eigengravitation die Expansion irgendwann gestoppt und umgedreht. Das All implodiert wieder bis zur Singularität im so genannten **Big Crunch** ("**Großes Knirschen**").

Eine andere Version des Urknalls geht vom **Big Whimper** ("**Großes Wimmern**") aus. Die Eigengravitation des Kosmos ist zu klein, um die Expansion anzuhalten, so dass es ewig expandiert und den Kältetod stirbt.

- Ein anderes Modell, der **Big Bounce** ("**Großer Aufprall**") wurde von **W. Priester, H.-J. Blome, J. Hoell** 1989 entwickelt. Hier geht man von einem unendlich ausgedehnten, homogenen und materiefreien Anfangsuniversum aus, bestehend aus einem hochenergetischen Quantenvakuum. Dieser vakuumdominierte Kosmos kontrahiert irgendwann bis zu einem kleinen, aber endlichen Volumen, um daraufhin zu expandieren. Nun bildet sich unser gewohntes, strahlungs- und materiedominiertes Universum aus.
- Geht das herkömmliche Urknallmodell vom Big Crunch oder Big Whimper aus, findet **Robert Caldwell** eine weitere Variante des **Big Rip** ("**Großes Zerreißen**"). Unser aktuelles Wissen deutet mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf hin, dass der Kosmos ewig expandieren wird (Big Whimper-Modell). Nach dem Big Rip könnte die Expansion jedoch zeitlich begrenzt sein, wenn eine exotische Form der schon befremdend genug anmutenden **Dunklen Energie**, die so genannte **Phantom- Energie**, künftig bis zu schier unendlich hohen Energiedichten anwächst. Die Folge davon wäre ein Zerreißen von allem, was sich im Universum befindet: Galaxien, Sterne, Planeten, Menschen, Hühner, ja selbst Atome und Elementarteilchen würden zerrissen! Einfach deshalb, weil diese Phantomenergie alle anderen Naturkräfte übertrumpft. Ein solches Ende des Universums könnte in etwa 50 Milliarden Jahren bevorstehen.

- Das **Zyklische Universum** nach **Paul Steinhardt** geht nicht von einer Singularität aus, sondern dass unser Kosmos eine **Bran** (abgeleitet von **Membran**) darstellt, die sich in einem aus 4 Raum- und einer Zeitdimension bestehendem **Bulk- Universum** bewegt. Diese Bran könnte mit einer anderen zusammenprallen, was eine Art Urknall auslöst. Nun expandieren beide Branen und entfernen sich gleichzeitig bis zu einer maximalen Distanz, um daraufhin wieder mit einer neuen Annäherungsphase zu beginnen.
- Ebenfalls von **Paul Steinhardt** stammt die Theorie des **Ekpyrotischen Universums**. Ähnlich wie im vorstehenden Modell kollidieren zwei Branen, bleiben jedoch aneinander "kleben" und die enorme, freigesetzte Energie bildet den Urzustand unseres Universums.
- Ein Universum kann gewissermaßen auch aus sich selbst entstehen, meinen **Richard Gott III** und **Li-Xin Li**. Nämlich dann, wenn die Zeit nicht immer in derselben gewohnten Richtung - linear - geflossen ist, sondern einmal kreisförmig verlief, in sich geschlossen. War das der Fall, so ist irgendwann diese Zeitschleife aufgebrochen und verläuft seitdem linear in die Zukunft. Das Universum hätte damit einen Anfang gehabt, wäre aus sich selbst entstanden und nicht aus einem Anfangszustand.

Es gibt noch eine ganze Reihe weiterer Ideen zur Entstehung und Zukunft des Universums, die genannten sollen zur Orientierung aber genügen. Alle Modelle basieren auf der Allgemeinen Relativitätstheorie oder gehen von einer noch nicht gefundenen Theorie der **Quantengravitation** aus. Mehr oder weniger sind das alles Spekulationen, wenn auch auf hohem wissenschaftlichen Niveau, jedoch ist keine der gemachten Aussagen in irgendeiner Form nachprüfbar. Was wir aber machen können, ist eine fundierte Analyse der WMAP- Daten, die uns wenigstens etwas über die Frühzeit unseres Universums verrät. Eines steht jedenfalls fest: Alle gemachten Beobachtungen weisen darauf hin, dass einst unser gesamtes Universum aus einem winzig kleinen Raumgebiet entstand.

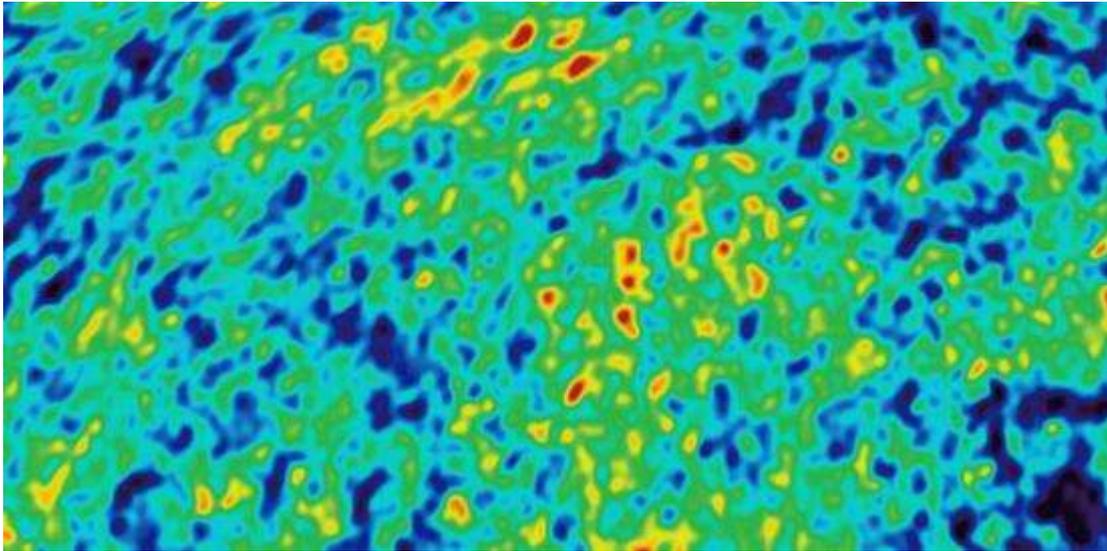


Vielleicht gibt es Windows schon viel länger als bisher geglaubt - und der Anfang der Welt war ganz anders...

Quelle: Unbekannt

Musik im Kosmos

Wie bereits oben gezeigt, entdeckte Cobe Schwankungen in der kosmischen Hintergrundstrahlung. Noch aufregender sind die Details winziger lokaler Schwankungen, die der Satellit WMAP fand. In nachstehendem Bild sehen wir eine höhere Auflösung einer WMAP- Aufnahme:

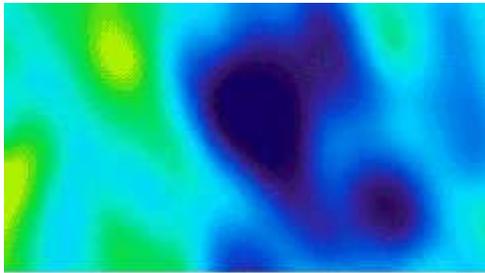


Mit freundlicher Genehmigung des NASA/WMAP Science Team

Die Schwankungen des Mikrowellenhintergrundes entsprechen den Erwartungen des kosmologischen Standardmodells. Ende der 1960er Jahre erkannte **Philip James Edwin Peebles**, dass der CMB feine Schwankungen aufweisen müsste. Unabhängig davon kamen zur selben Zeit die Moskauer Astrophysiker **Yakov Borisovich Seldowitsch** und **Rashid A. Sunjajew** zur selben Voraussage. Die feinen Schwankungen, Fluktuationen der Dichte des frühen, sehr heißen Plasmas aus Photonen und den Elementarteilchen, pflanzten sich wie in einem normalen Gas fort. Das waren sich ausbreitende Folgen von Verdichtungen und Verdünnungen. Wenn so etwas in der uns umgebenden Luft stattfindet, so nennen wir dies Schall, und nichts anderes durchlief damals den Kosmos. Zur Zeit der Rekombination, als die Photonen nicht mehr an der Materie streuten, wurde das von den Schallwellen erzeugte Muster im CMB fixiert, quasi eingefroren.

Der charakteristische Klang eines Musikinstrumentes entsteht, weil zur Grundschiwingung eines Tones zahlreiche Obertöne entstehen. Das sind Schwingungen mit z.B. $\frac{1}{2}$ oder $\frac{1}{4}$ der Grundwellenlänge, also einem ganzzahligen Vielfachen.

Auch die Schallwellen im Universum wiesen solche Obertöne auf. Wenn sich Schall in einem Medium ausbreitet, so geschieht dies durch Stöße einzelner Teilchen. Ist die Wellenlänge kleiner als die Distanz der einzelnen Teilchen, kommt die Welle zum Erliegen, da sie sich nicht mehr fortpflanzen kann. In der Luft sind diese Abstände winzig klein, im frühen Kosmos, der durch eine inflationäre Phase ungeheuer aufgebläht war (dazu später mehr), waren die Teilchenabstände bereits auf 10 000 Lichtjahre angewachsen. Zu dieser Zeit, der



Rekombination, manifestierten sich die Schallwellen in der Hintergrundstrahlung. Die Größe der heißen und kalten Flecken verraten den Kosmologen nun die Frequenzen der Schallwellen. Die größten Strukturen zur Zeit der Rekombination hatten Durchmesser von 1 Million Lichtjahren und sind durch die Expansion auf heute 1 Milliarde Lichtjahre angewachsen. Diese heißen und kalten Flecken entsprechen der Grundschwingung, während kleinere Details auf die Obertöne schließen lassen.

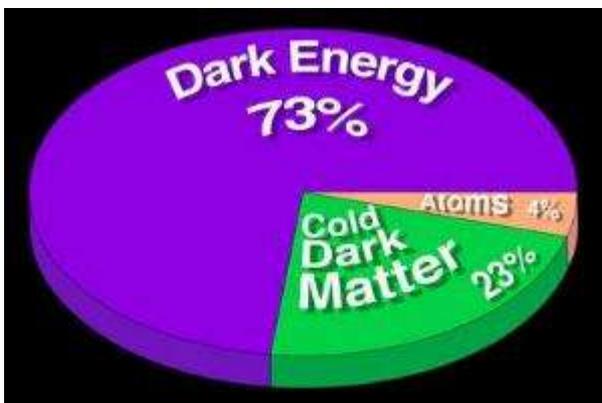
Aus diesen auf den ersten Blick so unscheinbaren Flecken können die Kosmologen noch viel mehr ableiten. Durch die Schallwelle und uns als Beobachter wird ein Dreieck aufgespannt, und man kann daraus errechnen, wie groß die Winkelsumme ist. Wozu? Nun, nur die Winkelsumme in einem euklidischen Dreieck beträgt exakt 180° , ist die Raumzeit des Universums dagegen [positiv oder negativ gekrümmt](#) ist sie kleiner oder größer. Das ist direkt abhängig von der Energiedichte des Kosmos, die den Messungen nach nahe der kritischen Dichte von $10^{-29} \text{ [g/cm}^3\text{]}$ liegt. Demnach leben wir in einem offenen, ewig expandierenden Universum, denn unser Kosmos ist euklidisch!

In der zu sehenden Bildsequenz werden verschiedene Entwicklungsphasen des Universums dargestellt. Die Hintergrundstrahlung kennen wir schon. Aus den Fluktuationen bilden sich nun materieverdichtete Zonen und verdünnte Räume. Die Schwerkraft sorgt dafür, dass sich nun mehr und mehr Materie in bestimmten

Strukturen anordnet und die verdünnten **voids**, die riesigen Leerräume, immer mehr leergefegt werden. Galaxienhaufen strukturieren sich, erste Sterne zünden bereits 200 Millionen Jahre nach dem Urknall und Galaxien bilden sich aus.

Bilder: Mit freundlicher Genehmigung des NASA/WMAP Science Team

Die Strukturen der Hintergrundstrahlung haben den Kosmologen noch eine weitere Bestätigung ihres Modells der Entwicklung des Universums geliefert. Wir wissen heute, dass die Masse der leuchtenden Materie - also Sterne, Galaxien oder Gaswolken - den geringsten Anteil am Aufbau des Universums hat. Dabei haben die Sterne noch den kleinsten Anteil, die Hauptmasse ist in den Gaswolken versammelt. Aus differenzierten Analysen der Oberton- Schallwellen konnte man nun den Aufbau des Universums sehr genau bestimmen. Die sichtbare Materie macht demnach nur etwa 4% aus. Schon lange bekannt ist die Existenz einer für uns unsichtbaren [Dunklen Materie](#), was man z.B. durch Messungen von Bahngeschwindigkeiten der Sterne in Galaxien ableiten kann. Ihr Anteil liegt bei 23%.



Unserem heutigen Verständnis nach bildete die Dunkle Materie zur Zeit der Rekombination filamentartige Strukturen aus. Weil sie seinerzeit der dominante Part im Universum war, musste sich aufgrund ihrer gravitativen Wirkung alle Materie entlang dieser Strukturen anordnen. Der Löwenanteil aber von 73% kommt den Auswertungen der WMAP- Wissenschaftler zufolge

heute der mysteriösen Dunklen Energie zu. Durch die Beobachtung und genaue Entfernungsbestimmung von Supernovae in den vergangenen Jahren müssen wir uns mit dem Gedanken anfreunden, dass sich die Expansion des Kosmos weiter beschleunigt. Die treibende Kraft für diesen Effekt stellt die Dunkle Energie dar. Sie ist eines der größten Rätsel der modernen Kosmologie. Vielleicht löst sich dieses jedoch in Luft auf, wenn einer neuen Überlegung zufolge diese Dunkle Energie aus Gravitationswellen des frühen Universums besteht...

Bild: Mit freundlicher Genehmigung des NASA/WMAP Science Team

Die Geschichte des Universums

Teil 2

Das Standardmodell

Häufig wird die Frage gestellt, wo denn im Universum der Ort zu finden ist, an dem der Urknall stattfand. Gibt es ihn tatsächlich? Wer das vorherige Kapitel gelesen hat kann die Antwort vielleicht schon geben: Einen solchen Ort gibt es nicht. Den Urknall selbst kann keine physikalische Theorie beschreiben, aber wir wissen, dass erst mit ihm die Materie, Raum und Zeit entstanden. Welche der z.T. recht fantasievollen Spekulationen auch zutreffen mag, alles deutet darauf hin, dass unser Kosmos einmal in einem unfassbar kleinen Zustand begann. Dieses winzige Etwas expandierte irgendwann (der Begriff *irgendwann* ist an sich schon irreführend, da er eine Zeitangabe macht. Die Zeit entstand jedoch erst mit dem Urknall) und durch irgendeinen Auslöser. Wir befinden uns heute irgendwo mitten in diesem Geschehen, und damit ist der *Ort des Urknalls* überall im Universum, er ist das Universum.

Sehen wir uns aber nun die Geschichte des Kosmos ein wenig näher an, das **Standardmodell** zur Entstehung des Universums.

Viele Gründe sprechen heute für dieses Standardmodell:

- Wie bereits besprochen, die **kosmische Hintergrundstrahlung** (CMB),
- die **Rotverschiebung der Galaxien**, die auf eine fortschreitende Expansion des Universums hinweist,
- das **Grenzalter der ältesten Sterne**, es finden sich keine Sterne, die älter als etwa 13 Milliarden Jahre sind,
- und nicht zuletzt die **Verteilung der Elemente** im Kosmos (vor allem von Wasserstoff, Helium und Deuterium), die sehr gut mit den theoretischen Voraussagen übereinstimmt.

Jede Expansion muss einen Anfang haben, so auch unser Kosmos, der zum Zeitpunkt Null entstand. Darauf kommen wir, wenn wir die Geschichte des Universums wie in einem Film rückwärts laufen lassen. Alles zieht sich zusammen, wird immer kleiner bis sich schließlich ein Punkt (?) zum Zeitpunkt Null ergibt? Nein, hier versagen alle physikalischen Gesetze. Wir können den Anfangszustand nicht beschreiben, der den Startschuss vor 13,7 Milliarden Jahren gab. Die Bezeichnung **Urknall** verleitet häufig dazu, von einer gewaltigen **Explosion** auszugehen. Eine Expansion wie die unseres Kosmos ist jedoch etwas völlig anderes, denn hier wurde nicht etwas durch eine Kraft zerstört und in alle Richtungen weggeschleudert.

Geschlossenes oder offenes Universum?

Die Expansion des Universums muss mit gewaltiger Kraft stattgefunden haben, da sie ja noch heute anhält. Die Größe der Expansionsgeschwindigkeit verrät uns die [Hubble-Konstante](#), sie ist abhängig von der im gesamten Kosmos vorhandenen Masse und Energie, kurz Energieinhalt genannt. Ist er groß genug, wird eines fernen Tages die Expansion durch die Eigengravitationswirkung (auch Energie wirkt gravitativ!) zum Stillstand kommen und sich umkehren. Dann wird eine Kontraktion einsetzen, die alle Materie wieder letztendlich in einem Punkt, einer Singularität zusammenzieht (**Big Crunch**). Damit dies geschehen kann, muss die Energiedichte über der so genannten **kritischen Dichte** von 10^{-29} [g/cm³] liegen. Ein solches Universum nennt man **geschlossen**, da es nur bis zu einer bestimmten, durch die Gravitation der Gesamtmasse erlaubten Größe expandieren kann und anschließend wieder kontrahiert.

Im Gegensatz dazu steht ein **offenes Universum**, wenn die kritische Dichte unterschritten wird. Es würde bis in alle Ewigkeit weiter expandieren und den Kältetod sterben. Irgendwann wäre der gesamte Kosmos auf den absoluten Nullpunkt (0 [K] oder -273 [°C]) abgekühlt, stockfinster und ohne jegliche Strahlung, in 10^{14} Jahren würden die letzten Sterne erlöschen. Nur Schwarze Löcher gäbe es noch im All, kalte Neutronensterne, Schwarze Zwerge und natürlich völlig verwaiste, tote Planeten. Nach 10^{64} Jahren lösen sich in einem solchen Szenario die Galaxien auf und vielleicht nach 10^{600} (!) Jahren wäre selbst der härteste Eisenkern zerfallen. Zu diesem Zeitpunkt, der auch bis 10^{1000} Jahre währen kann, verdampfen auch die größten Schwarzen Löcher.

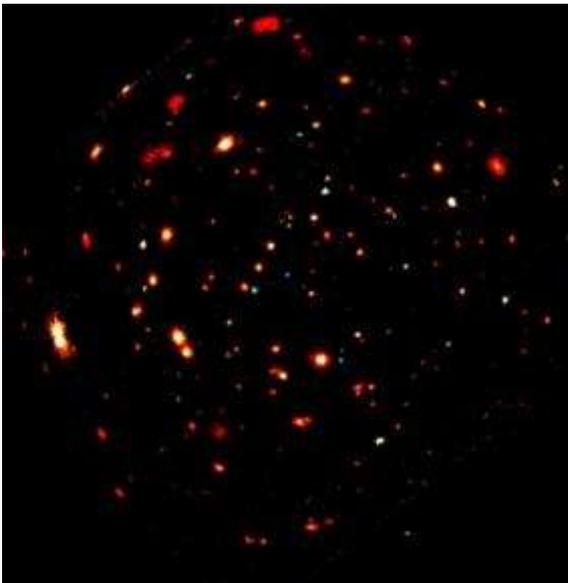
Wird der Wert der kritischen Dichte gerade erreicht, leben wir in einem **flachen Universum**. Demnach könnte durch die Eigengravitation der Materie und Energie im All die Expansion irgendwann zwar zum Stillstand kommen, sich jedoch nicht mehr zu einer Kontraktion umkehren. Auch hier wäre der Kältetod unausweichlich. Den WMAP-Messungen nach ist die kritische Dichte jedoch knapp unterschritten, womit das Universum bislang als ein offenes gilt.

Die Planck- Ära

Doch zurück zum Urknall. Zum Zeitpunkt Null interpolieren wir das gesamte Universum als in einem einzigen Punkt, einer Singularität, vereinigt. In diesem Zustand gingen die Ausdehnung gegen unendlich klein, Druck und Temperatur gegen unendlich groß. Unter diesen Bedingungen war es ohne Zeit und Raum, denn Zeit als Kontinuum und auch der Raum verlieren unterhalb der [Planckzeit](#) (10^{-43} [s]) bzw. der [Plancklänge](#) (10^{-35} [m]) ihre Eigenschaften. Den Zeitraum zwischen Null und der Planckzeit nennt man die **Planckära**. Möglicherweise gab es so etwas wie ein primordiales (*urzeitliches*) Quantenvakuum von vollkommener Symmetrie und mit beliebig vielen Dimensionen. So wie in einem

uns geläufigen Vakuum spontan [virtuelle Teilchenpaare](#) entstehen können, war es im primordialen Quantenvakuum vielleicht möglich, dass spontane Symmetriebrechungen auftraten. Aus einer solchen Symmetriebrechung könnte das Universum entstanden sein - zumindest hilft uns diese Vorstellung, die Singularität zu vermeiden. Welche Entwicklungen sich im Kosmos während der Planckära abspielten, ist mit unserer bisherigen Physik nicht erfassbar. Auch ist es bisher nicht gelungen, hierzu eine Theorie zu entwickeln. Erst mit dem Ende der Planckära setzt die kosmische Entwicklung ein, die für uns beschreibbar ist. Nun entstehen viele aufeinander folgende, einzelne kurze Entwicklungsphasen, deren Betrachtung höchst interessant ist.

Zur Planckzeit ist der Kosmos 10^{32} [K] heiß, hat eine Größe von 10^{-35} [m] und eine Dichte von 10^{94} [g/cm³]. Aufgrund der [Unschärferelation](#), welche besagt, dass man niemals gleichzeitig den Aufenthaltsort und den Energieinhalt eines Teilchens beliebig genau bestimmen kann ist das All noch so klein, dass man nicht entscheiden kann ob es ein Teilchen umschließt oder nicht. Es muss irgendwie "verschmiert" gewesen sein, völlig undefiniert.

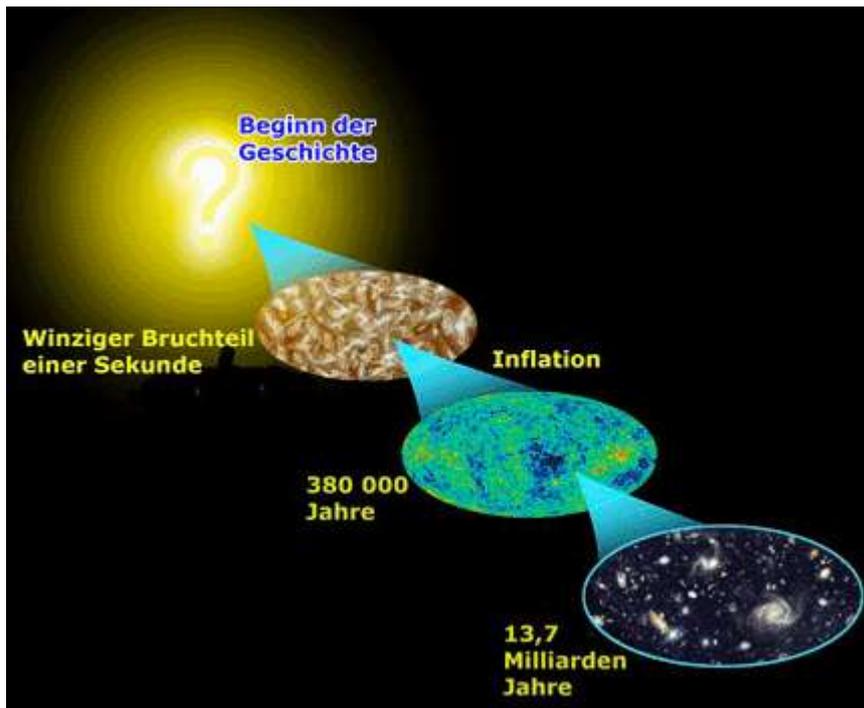


Einen tiefen Blick in den jungen Kosmos gestattet diese Aufnahme des [XMM-Newton](#)- Röntgenteleskops. In der Falschfarbendarstellung sieht man schwache Quellen in Rot, ihre Energie ist "nur" 500- fach höher als im sichtbaren Licht. 10 000- Mal heller strahlen Quellen in den Farben grün und blau. Diese hellen Röntgenstrahler zeigen Schwarze Löcher in weit entfernten Galaxien. Hier wird die harte Röntgenstrahlung erzeugt, weil Materie durch die Reibung in Akkretionsscheiben extrem erhitzt wird und anschließend in das Schwarze Loch einfällt. Bedingt durch die hohen Temperaturen strahlt die Materie überwiegend im Röntgenbereich.

Mit freundlicher Genehmigung von G. Hasinger (AIP) et al., XMM-Newton, ESA

Supersymmetrie und Inflation: GUT- Ära

Alle Naturkräfte (Gravitation, elektromagnetische Kraft sowie starke und schwache Wechselwirkung) sind bis zur Planckzeit noch in einer einzigen Kraft, der [Urkraft](#) vereinigt, Energie und Materie bis zur Unkenntlichkeit verzerrt. Man spricht hierbei von der [Supersymmetrie](#) des Alls, weil die einzelnen Kräfte nicht mehr unterscheidbar sind. Im Alter von 10^{-43} [s] spaltet sich die Gravitation aus der Urkraft, der Vereinigung der Naturkräfte, ab. Die drei anderen Wechselwirkungen bleiben weiterhin in einer einzigen Kraft ununterscheidbar vereinigt, nach der so genannten [GUT](#) (*Grand Unified Theorie, Große Vereinheitlichung*) als [X- Kraft](#) bezeichnet. Damit schließt sich an die Planckära die [GUT- Ära](#) an.



Die einzelnen Wechselwirkungen werden durch Austauschteilchen übertragen, die man **Bosonen** nennt. So beispielsweise die elektromagnetische Kraft durch Photonen als Austauschteilchen. Die X-Kraft, die nur eine extrem kurze Reichweite hatte, wurde von z.T. superschweren Bosonen, den **X-Bosonen** und

den **Y-Bosonen** übertragen. Von jeder Sorte gab es jeweils 3 verschiedene Teilchen sowie die zugehörigen Antiteilchen. Zusammen bezeichnet man sie als **Leptoquarks**, weil sie später in Quarks und Leptonen (Leptonen sind z.B. Elektronen oder Neutrinos) zerfallen. Im Alter von 10^{-36} [s] spaltet sich die Starke Wechselwirkung ab, es findet eine **Symmetriebrechung** statt. Das kann man sich als einen Phasenübergang vorstellen, ähnlich dem, wenn flüssiges Wasser in kristallines Eis bei Abkühlung übergeht. Wir sollten uns dabei vor Augen halten, dass unser Universum zu diesem Zeitpunkt noch immer aus "purer Energie" besteht und ungeheuer kompakt und dicht ist.

Die Starke Wechselwirkung ist für den Zusammenhalt der Kernteilchen verantwortlich. Wenn wir Wasser unter Druck abkühlen, so erstarrt es nicht bereits bei 0 [°C] zu Eis, sondern bleibt weiterhin flüssig - es ist unterkühlt. Die Kristallisation tritt verzögert ein, dann aber wird überschüssige Energie spontan freigesetzt. Ähnliches geschah auch im Alter von 10^{-36} [s], als sich die Starke Wechselwirkung abkoppelte. Bei dieser Symmetriebrechung wurde Energie freigesetzt, die zu einer Beeinflussung des so genannten **Quantenvakuums** führte. Bisher war es ein *normales* Vakuum, durch die Unterkühlung kippt es jedoch um und wird in ein **Falsches Vakuum** verwandelt. Die Energiedichte dieses Vakuums bleibt unverändert, aber sein Druck wird negativ und wirkt gravitativ abstoßend. Das bläht nun unseren Kosmos exponentiell auf! Alle 10^{-35} Sekunden verdoppelte er seine Größe, der ganze Zauber war aber bereits im Alter von 10^{-33} [s] wieder vorüber, das falsche Vakuum ging wieder ins echte über und die Expansionsrate normalisierte sich.

Diesen Zeitabschnitt nennen wir die **Inflationsphase**.



Das Modell des inflationären Universums geht auf den Physikprofessor **Alan Guth** zurück. Zwischen den Zeitabschnitten 10^{-35} [s] und 10^{-33} [s] dehnt sich das Universum um etwa den Faktor 10^{30} auf. Das bedeutet, dass es sich in einem Zeitraum von nur 10^{-32} [s] vom Durchmesser 10^{-52} [cm] auf 10 [cm] aufbläht. Das Universum ist aber immer noch so heiß, dass sich gemäß Einsteins berühmtester Gleichung **$E = mc^2$** ständig Teilchen und Energie (die in Form von Strahlung das All erfüllt) ineinander umwandeln - Teilchen und Energie befinden sich im **thermischen Gleichgewicht**.

Der Teilchen- Zoo

Bevor wir uns weiter in der Geschichte des Universums vorwärts bewegen, ist es sinnvoll, wenn wir uns mit den wichtigsten Teilchen vertraut machen, aus der unsere Materie aufgebaut ist und die in der Natur eine Rolle spielen. Gemeint sind damit natürlich nicht die leckeren Süßspeisen, die wir so gerne zum Kaffee vernaschen!

Unter elementaren Teilchen verstehen wir winzige Partikel ohne messbare innere Struktur, sie sind also nicht weiter in Subpartikel teilbar. Eine grobe Einteilung können wir anhand des **Spins** vornehmen, unter dem man sich eine Art Eigendrehimpuls vorstellen kann, der jedoch quantisiert ist und Werte von 0, $\frac{1}{2}$, 1, 2 usw. annehmen kann.

Teilchen mit halbzahligem Spin - Fermionen

Fermionen sind die Grundbausteine unserer gewohnten Materie und haben den Spin $\frac{1}{2}$. Zu jedem Fermion existiert ein Antiteilchen mit entgegengesetzter Ladung. Zum Standardmodell der Teilchenphysik zählen 12 Fermionen, die wir in **Quarks** und **Leptonen** einteilen. Quarks weisen dabei eine **Farbladung** (rot, blau und grün, die Ladung hat in Wirklichkeit aber nichts mit einer Farbe zu tun) auf, die Leptonen dagegen nicht:

Quarks existieren in 6 "Geschmacksrichtungen" ("**flavour**", die Physiker sind manchmal nicht zimperlich bei der Namensgebung von Eigenschaften) und wechselwirken über die Farbladung:

- up- Quark (Antiup- Quark)
- down- Quark (Antidown- Quark)
- charm- Quark (Anticharm- Quark)
- strange- Quark (Antistrange- Quark)
- top- Quark (Antitop- Quark)
- bottom- Quark (Antibottom- Quark)

Leptonen wechselwirken nicht über eine Farbladung, kommen aber auch in 6 Geschmacksrichtungen vor:

- Elektron (Positron oder Antielektron)
- Myon (Antimyon)
- Tauon (Antitauon)
- Elektron- Neutrino (Antielektron- Neutrino)
- Myon- Neutrino (Antimyon- Neutrino)
- Tau- Neutrino (Antitau- Neutrino)

Die **Supersymmetrie** sagt weitere Fermionen voraus, von denen bislang jedoch noch keines nachgewiesen werden konnte:

- **Neutralino**, ein Superpartnerteilchen diverser Teilchen des Standardmodells, ein heißer Kandidat für die [Dunkle Materie](#)
- **Photino**, ein Superpartner des Photons
- **Gravitino** (Spin $3/2$), ein Superpartner des Gravitons (welches ein Boson ist)

Teilchen mit ganzzahligem Spin - **Bosonen**

Bosonen sind die Austauscheteilchen der 4 Wechselwirkungen, dazu gehören:

- **Photon** (Spin 1) - es überträgt die elektromagnetische Kraft
- **W^+ , W^- und Z^0 - Bosonen** (Spin 1) sind die Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung, man nennt sie auch **Weakonen** (abgeleitet von *weak force = schwache Kraft*). Das W^+ - Boson mit positiver elektrischer Ladung ist das Antiteilchen des W^- - Bosons. Beides sind sehr schwere Teilchen mit extrem kurzer Lebensdauer. Im Gegensatz zum Z^0 - Boson, das elektrisch neutral ist und sein eigenes Antiteilchen, ist die Existenz der beiden W - Bosonen nachgewiesen.
- 8 **Gluonen** (Spin 1) übertragen die starke Wechselwirkung. Sie sind verantwortlich für den Zusammenhalt der Quarks, die ihrerseits die Bausteine der Hadronen (Baryonen (Protonen und Neutronen) und Mesonen) sind. Sie tragen Farbladungen (rot, grün, blau) und können daher mit anderen Teilchen mit Farbladungen wechselwirken, somit auch untereinander.
- Das **Higgs- Boson**, bislang nur theoretisch vom Standardmodell vorausgesagt, verleiht den Teilchen ihre Masse. Man hofft, es mit dem neuen [LHC \(Large Hadron Collider\)](#) am Cern nachweisen zu können. Es ist 100 bis 250- mal schwerer wie ein Proton, hat keine elektrische Ladung und den Spin 0.

Neuere Theorien postulieren weitere Bosonen, deren Existenzbeweis noch aussteht:

- Das **Graviton** ist Botenteilchen der Gravitation und spielt eine wichtige Rolle in der Quantengravitation. Es hat den Spin 2.
- Das **Graviphoton** ist ein weiterer Superpartner des Gravitons mit Spin 1.
- Als Superpartnerteilchen werden so genannte **Sleptonen** und **Squarks** vorausgesagt.

- 3 **X-** und 3 **Anti- X- Bosonen** sowie 3 **Y- Bosonen** mit ihren Antiteilchen werden von der GUT vorausgesagt. Man bezeichnet sie auch als **Leptoquarks**, weil sie in Leptonen und Quarks zerfallen. Zwar auch noch nicht nachgewiesen, ist ihre Existenz sehr wahrscheinlich, da sie am Ende der GUT- Ära in genannte Bestandteile zerfielen und so erst die uns bekannte Materie entstehen konnte. Insgesamt liegen damit 24 Bosonen vor uns, 12 des Standardmodells (1 Photon, 3 Weakonen und 8 Gluonen) und die 12 schweren Bosonen, die bis über tausendmal schwerer als ein Proton sein konnten.

Bisher haben wir nur elementare Teilchen betrachtet, die nicht weiter teilbar sind. In der Natur haben wir es jedoch häufig mit Teilchen zu tun, die aus anderen, eben den elementaren Bausteinen zusammengesetzt sind. Da ist zunächst die Gruppe der **Hadronen**, Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen und aus Quarks zusammengesetzt sind. Bestehen sie aus je einem Quark und einem Antiquark, sprechen wir von **Mesonen**, je 3 Quarks setzen sich zu einem **Baryon** zusammen (bzw. 3 Antiquarks zu einem Antibaryon):

- **Mesonen** haben den Spin 0 oder 1 und sind sehr kurzlebige Teilchen. Zu ihnen zählen z.B. das Pion, das Kaon oder das Eta- Meson.
- **Baryonen** haben einen halbzahligem Spin und gehören damit der Klasse der Fermionen an (alle Teilchen sind entweder ein Fermion oder ein Boson, da entweder halbzahligem oder ganzzahligem Spin). Fermionen unterliegen dem **Pauli- Prinzip** und zu ihnen zählen wir neben den Baryonen wie Proton und Neutron auch die Leptonen und Quarks.

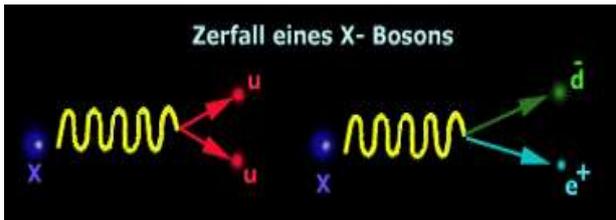
Der "Teilchenzoo" beinhaltet heute noch weitere, exotisch anmutende Teilchen wie

- **Tetraquarks**, Partikel aus je 2 Quarks und Antiquarks, **Pentaquarks** bestehen aus zwei Up-, zwei Down- und einem Antistrange-Quark
- So genannte **Glueballs** sind zwar noch nicht nachgewiesen, ihre Existenz ist jedoch wahrscheinlich. Sie sind ausschließlich aus Gluonen zusammengesetzt, tragen eine Farbladung und unterliegen der starken Wechselwirkung
- **Hybriden** bestehen aus einem oder mehreren Quark- Antiquarkpaaren und einem oder mehreren Gluonen.

Insgesamt kennt man heute einige Hundert verschiedene Teilchen, doch wollen wir uns mit dieser Übersicht begnügen. Damit haben wir nun das Rüstzeug, um in unserer Geschichte des Universums fortzufahren:

Baryogenese

Unter der **Baryogenese** versteht man den kosmischen Zeitabschnitt, in welchem die baryonischen Teilchen entstanden. Er ist gekennzeichnet durch das Auftreten der schweren Bosonen und damit identisch mit der GUT- Ära.



Am Ende der GUT- Ära, also als das Universum ein Alter von 10^{-36} [s] erreicht, können die schweren Bosonen und Antibosonen nicht länger existieren und beginnen in Quarks und Leptonen sowie deren

Antiteilchen zu zerfallen. Nebenstehend ist skizziert, wie ein solches Boson beispielsweise in up- Quarks oder in Antidownquarks und Positronen zerfallen kann.

Wenn aber ein Materie- auf ein Antimaterieteilchen trifft, so zerstrahlen sich beide sofort zu hochenergetischen Photonen (*Annihilation*)! Das Universum war zu diesem Zeitpunkt noch sehr kompakt und die Teilchenkollisionen daher höchst häufig. Eigentlich sollte man meinen, dass Materie und Antimaterie jetzt exakt im selben Verhältnis auftraten. Zu unserem Glück bestand aber eine Asymmetrie in diesem Verhältnis, sonst würde das Universum heute keine Materie enthalten!

Wie aber ist das Missverhältnis von Materie zu Antimaterie zu erklären? Materieteilchen sollten exakt dieselben Wechselwirkungen zeigen wie ihre Antiteilchen, da beide gleich sind bis auf ihre spiegelverkehrten Eigenschaften.



Der russische Physiker **Andrei Dmitriyevich Sacharow** (1921 bis 1989) hat dazu eine Erklärung gefunden. Wenn wir uns einmal in einem Spiegel betrachten und unseren Körper in Gedanken exakt in eine rechte und linke Hälfte spalten, so erscheinen uns beide Hälften auf den ersten Blick spiegelsymmetrisch zu sein. Erst bei genauerem Hinsehen erkennen wir kleine Unterschiede, z.B. Sommersprossen. Nun stellen wir uns naiv ein Teilchen als kleines kugelförmiges Gebilde vor. Es sollte noch mehr als unsere Körperhälften symmetrisch sein, und zwar in

allen Richtungen. Das trifft in der Tat auch auf die meisten Teilchen und ihre Wechselwirkungen zu, man sagt die **Parität** (P) sei erhalten (*Parität = Gleichwertigkeit*). Eine Ausnahme macht dabei aber die schwache Wechselwirkung. Teilchen haben neben dieser räumlichen noch eine andere wichtige Eigenschaft, ihre Ladung. Auch hier gibt es eine Symmetrie, denn zu jedem Teilchen existiert ein entgegengesetzt geladenes Antiteilchen. In unsere Welt übersetzt würde das bedeuten, dass es neben Hühnern auch Antihühner gäbe. Seien wir froh, dass uns zum Frühstück keine Antieier serviert werden*! Diese als **Ladungskonjugation** bezeichnete Symmetrie (C, *von engl. charge, Ladung*) verwandelt also ein Teilchen in ein Antiteilchen unter Umkehr der Vorzeichen aller elektrischer Ladungen. Die schwache Wechselwirkung ist auch hier wieder für Ausnahmen zuständig.

* Man könnte zu diesem Zeitpunkt die Vorliebe des Autors für dieses gefiederte Vieh in jedweder Zustandsform vermuten, womit man gar nicht so falsch liegt...

Sacharow fand nun heraus, dass im frühen Kosmos die **CP- Symmetrie** bei der Paarvernichtung verletzt gewesen sein muss, und zwar um einen Faktor von 6×10^{-10} . Der oben angedeutete Zerfall der X- Bosonen (sowie der dort nicht aufgezeigten Antibosonen) muss also leicht asymmetrisch gewesen sein. Das bedeutet im obigen Beispiel, dass die Wahrscheinlichkeit des Zerfalls in zwei up-Quarks etwas wahrscheinlicher war als derjenige in ein Positron und ein Antidown- Quark. Konkret haben die Teilchenphysiker eine solche CP-Verletzung bislang beim Zerfall so genannter **K- Mesonen** ("Kaonen") nachgewiesen. Sacharow (richtig geschrieben eigentlich Sakharov) stellte nun 3 Bedingungen auf, die erfüllt sein mussten, damit aus dem symmetrischen Anfangszustand des Universums eine Asymmetrie während der Baryogenese auftreten konnte:

- **B-Verletzung**

Hierunter versteht man eine Verletzung der Nettobaryonenzahl. Das bedeutet, dass zwischen Baryonen und Antibaryonen irgendwie ein Missverhältnis entstanden sein muss. Dieser offensichtliche Zustand ist im frühen Kosmos eingetreten, aber schwierig zu erklären. Denn bis heute wurde noch kein Prozess mit einer B- Verletzung beobachtet.

- **CP-Verletzung**

Das kombinierte Zusammenwirken von Parität und Ladungskonjugation verwandelt ein Teilchen in sein Antiteilchen. CP ist dabei symmetrisch, muss jedoch verletzt gewesen sein. Nehmen wir als Beispiel ein Teilchen **X**, welches in Protonen zerfällt. Dann muss auch sein Antiteilchen in Antiprotonen zerfallen, wobei die Anzahl beider Teilchensummen identisch sein sollte. Bei einer CP- Verletzung tritt Asymmetrie auf:

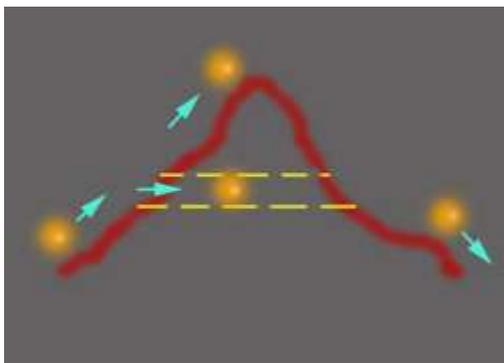


- **Verletzung des thermischen Gleichgewichts**

So lange sich das Universum im thermischen Gleichgewicht befindet, muss statistisch gesehen die Anzahl der Teilchen mit derjenigen der Antiteilchen übereinstimmen. Das ist deshalb so, weil die einzige intrinsische Eigenschaft der Teilchen, von der die Gleichgewichtsverteilung abhängt, die Teilchenmasse ist. Es gibt nicht den kleinsten Hinweis darauf, dass wir glauben müssten, die Massen von Teilchen und ihren Antiteilchen seien unterschiedlich. Da sich aber ein Überschuss von Teilchen ergab, muss das thermische Gleichgewicht verletzt gewesen sein.

Das eine CP- Verletzung auftreten kann, haben wir schon weiter oben am Beispiel der Kaonen gesehen. Sie allein ist jedoch nicht ausreichend, den Materieüberschuss zu erklären, zu wenigstens muss auch eine B- Verletzung stattgefunden haben.

Nach der Abspaltung der starken Wechselwirkung blieben noch die elektromagnetische Kraft und die schwache Wechselwirkung zur **elektroschwachen Kraft** vereinigt übrig. In ihr könnte die Ursache zur Erschaffung unserer Materie liegen. Denn diese Kraft erlaubte Wechselwirkungen zwischen Quarks, also Baryonen, und Leptonen. Solche Wechselwirkungen bezeichnet man als **Sphaleron-Prozess** bzw. -Übergang. Botenteilchen dieser Wechselwirkungen waren die bereits oben erwähnten X-Bosonen. Der Sphaleron-Prozess ist ähnlich dem Quantentunneln von Teilchen.



Der Tunneleffekt spielt bei der Fusion von Wasserstoff in der Sonne eine bedeutende Rolle. Normalerweise würden die gleichnamigen, positiven Ladungen der Protonen sich gegenseitig abstoßen. Die Teilchen stehen somit vor einer unüberwindlichen Energiebarriere. Die Natur hat in der Quantenwelt jedoch ein Hintertürchen eingebaut: Ein Teilchen kann hin und wieder diesen "Energieberg" einfach

wie durch einen Tunnel überwinden. Nur hierdurch ist es den Protonen möglich, miteinander zu verschmelzen. Die Wechselwirkung der Baryonen mit den Leptonen stand vor einem ähnlichen Problem. Sie war nur durch den Tunneleffekt möglich, der normalerweise so extrem gering ist, dass wir ihn nicht in der Natur beobachten. Im frühen Kosmos jedoch war so viel an thermischer Energie vorhanden, dass der Übergang stattfinden konnte. Möglicherweise war die Temperatur sogar so hoch, dass die Energiebarriere völlig verschwand. Hierbei trat dann eine B-Verletzung (sowie eine L-Verletzung, Verletzung der Leptonenzahl L) auf. Das Sphaleron zeigt uns damit, dass tatsächlich eine Verletzung der Baryonenzahl und der CP-Symmetrie gegeben war.

Es gibt auch Hinweise darauf, dass gemäß der elektroschwachen Theorie eine Verletzung des thermischen Gleichgewichts möglich war. Wenn man in einen Topf mit kochendem Wasser sieht, erkennt man leicht, dass sich auf dem Boden Blasen von Wassergas bilden. Ähnliches könnte sich damals zugetragen haben, nur unter umgekehrten Bedingungen. "Blasen" könnten sich im abkühlenden All entwickelt haben. Innerhalb dieser Blasen haben Teilchen Masse, die uns gewohnte Physik ist gültig und die Sphaleron-Prozesse sorgen für die Asymmetrie der Baryonenzahl. Sie verlaufen hier jedoch extrem langsam und spielen kaum eine Rolle.

Außerhalb jedoch herrscht ein wahrhaft mysteriöser Zustand - die Teilchen sind masselos. Die Blasen dehnen sich aber aus und verdrängen alles, was außerhalb ist. Dort fehlt aber die Energiebarriere der Sphaleron-Prozesse, weshalb hier eine überaus starke Verletzung der Baryonenzahl auftritt. Bei andauernder Expansion der Blasen müssen die Teilchen durch die Blasenwand ins Blaseninnere diffundieren und erzeugen hier die endgültige Verletzung der Baryonenzahl.

Die Geschichte des Universums

Teil 3

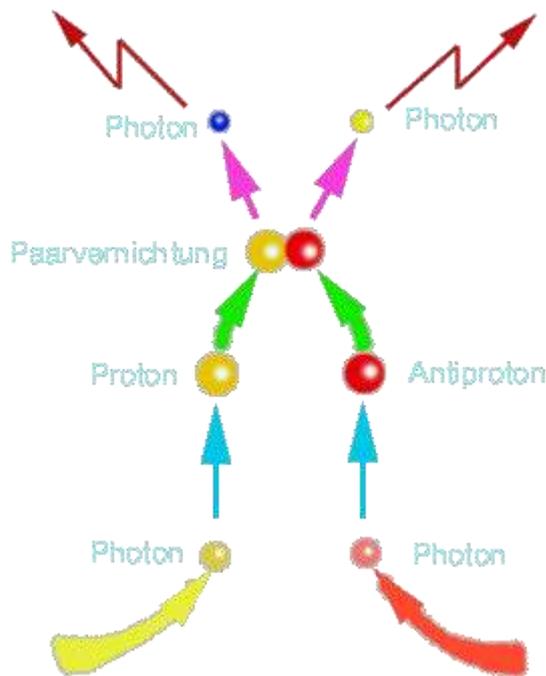
Quark- Ära

Im Alter von 10^{-33} [s] ist das Universum auf 10^{25} [K] abgekühlt, die letzten der schweren X- und Y- Bosonen zerfallen und können nicht mehr neu aus den Photonen gebildet werden. Aus der Strahlung können nun aber **Quarks**, die elementarsten Bausteine der Materie, sowie ihre Antiteilchen, die **Antiquarks** auskondensieren. Daneben existieren bereits die uns schon bekannten Leptonen wie z.B. die Elektronen und Neutrinos. Der Kosmos ist jedoch noch so heiß, dass diese Teilchen ständig und nach kürzester Zeit miteinander kollidieren und deshalb noch nicht die aus den Quarks bestehenden Neutronen und Protonen bilden können. Die uns geläufige Materie kann also noch nicht existieren, sehr wohl aber ein so genanntes **Quark- Gluonen- Plasma**. Gluonen sind die "Kleber-" Teilchen (*glue, engl. "Klebstoff"*), welche die Quarks normalerweise zu Protonen und Neutronen zusammenkitten. In diesem Plasma liegen jedoch all diese Teilchen frei beweglich und ungebunden nebeneinander vor. Bereits im Jahr 2000 konnte am Schweizer **CERN** für extrem kurze Zeit ein solches Quark- Gluonen- Plasma erzeugt und indirekt nachgewiesen werden.

Als das Universum ein Alter von 10^{-12} Sekunden erreicht hat, ist die Temperatur auf 10^{16} [K] abgesunken. Nun spaltet sich auch die noch bis hierhin gemäß der GUT übrig gebliebene **elektroschwache Kraft** in die schwache Wechselwirkung sowie die elektromagnetische Kraft auf. Alle 4 Naturkräfte sind damit voneinander unterscheidbar geworden und von nun an für immer getrennt. Unser Kosmos hat jetzt schon einige einschneidende Ereignisse hinter sich gebracht und tritt anschließend in ein neues Zeitalter ein.

Hadronen- Ära

Im Alter von 10^{-6} Sekunden beträgt die Temperatur noch 10^{13} [K]. Die Quarks können jetzt nicht mehr als freie Teilchen umherschwirren, sondern setzen sich zu den **Hadronen** zusammen und das Quark- Gluonenplasma verschwindet. Je weiter sich der Kosmos nun mit zunehmender Expansion abkühlt, umso mehr sterben die anfangs gebildeten, schweren Hadronen aus und nur Protonen und Neutronen sowie deren Antiteilchen können überleben.



Die Photonen im frühen All waren so energiereich, dass aus ihnen Teilchenpaare entstehen konnten. Hier ist als Beispiel die Bildung eines Proton/Antiprotonpaares skizziert, welches sich alsbald wieder annihiliert und dabei erneut Photonen freisetzt. Man muss sich dabei wieder vor Augen halten, dass Photonen nichts anderes sind als kleinste Energiequanten oder Energiepakete. Nach Einsteins $E = mc^2$ kann unter geeigneten Bedingungen aus Energie Materie entstehen und umgekehrt.

In den heutigen Teilchenbeschleunigern können diese Energien ebenfalls erzeugt werden, wobei spontan Teilchen entstehen. Es ist uns also möglich, die Zustände des frühen Kosmos bis zu dieser Zeit recht genau nachzuvollziehen. Die gebildeten Teilchenpaare vernichten sich ständig gegenseitig in derselben Rate, mit der sie erschaffen werden, denn es sind ja Materie- Antimateriepaare.

Aufgrund der bereits weiter oben genannten Asymmetrie, nach der die Materie um den Faktor 1,000 000 001 stärker vertreten ist als die Antimaterie, vernichten sich die Hadronen weitgehend. Dieser geringe Restanteil von Materie genügt jedoch, um unseren heutigen Kosmos mit allem was darin enthalten ist entstehen zu lassen, damit auch uns Menschen.

Leptonen- und Strahlungsära

Inzwischen ist unser Universum schon 10^{-4} [s] alt, hat sich auf 10^{12} [K] abgekühlt und die Dichte ist auf immer noch beachtliche 10^{13} [g/cm³] gesunken. Protonen verwandeln sich ständig in Neutronen und umgekehrt, wobei eine unübersehbare Zahl von Neutrinos entsteht. Da sie unter den herrschenden Bedingungen kaum noch mit anderer Materie wechselwirken, koppeln sie sich vom Rest des Universums ab. Noch immer kollidieren Teilchen und Antiteilchen und vernichten sich gegenseitig. Die Energie der Photonen reicht nur noch zur Ausbildung von Leptonenpaaren, also beispielsweise Elektronen und Positronen. Damit übernehmen jetzt die Leptonen die Dominanz, und wir nennen diesen Zeitraum die **Leptogenese**. Was nun noch an Protonen und Neutronen übrig bleibt, bildet die Materie unserer heutigen Welt. Die Protonen überwiegen dabei die Neutronen um den Faktor 6, was später für den gebildeten Heliumanteil an Bedeutung gewinnt.

Die kosmische Expansion schreitet weiter voran. Das Universum ist jetzt 1 [s] alt und auf 10^{10} [K] abgekühlt, Neutrinos haben endgültig nichts mehr mit der Materie zu schaffen. Die Paarvernichtung von Protonen und Neutronen mit ihren Antiteilchen ist abgeschlossen. Nun aber vernichten sich auch die Elektronen/Positronenpaare, wiederum bis auf einen Überschuss von 1 Milliardstel zugunsten der Materie. Jetzt sind alle Bausteine vorhanden, um unsere Welt zu erzeugen.

Noch immer jedoch kommt der Strahlung die absolute Dominanz im Universum zu. Wir befinden uns damit weiterhin in der **Strahlungsära**, die auch noch eine ganze Reihe von Jahren anhalten wird! Das Universum enthält jetzt Protonen, Neutronen, Neutrinos, Elektronen, Positronen und natürlich Photonen, welche um den Faktor 10^{10} überwiegen.

Nukleosynthese

Unser Universum ist nun schon 10 Sekunden alt und die Temperatur beträgt noch 1 Milliarde [K]. Unter diesen Bedingungen können jetzt Protonen (p) und Neutronen (n) Kernfusionen durchführen und hierdurch die ersten *primordialen* Atomkerne bilden. Zuerst bilden sich Deuteriumkerne (D), so genannter schwerer Wasserstoff (${}^2\text{H} = \text{D}$), der neben dem Proton noch ein Neutron enthält:



γ bedeutet hierbei ein frei werdendes Gammaquant. Noch sind aber die dominierenden Photonen sehr energiereich und zertrümmern diese Kerne alsbald, die aber sogleich wieder neu entstehen. Protonen, Neutronen und Deuterium sind eine Zeitlang im Gleichgewicht. Erst im Alter von 1 Minute wird Deuterium erzeugt, welches nun nicht mehr zerfällt. Freie Neutronen sind instabil, sie zerfallen mit einer Halbwertszeit von etwa 15 [min] in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino (hier als η dargestellt):



Somit hat der Anteil der Neutronen, der anfangs dem der Protonen entsprach, inzwischen stark abgenommen und beträgt nur noch ein Siebtel. Jetzt, da die Temperatur weiter gesunken ist, werden fast alle verbleibenden Neutronen im Edelgas Helium ${}^4\text{He}$ gebunden. Das Helium wird nicht mehr abgebaut, jedoch kann ein kleiner Teil noch mit Tritium (${}^3\text{H}$ oder T) zu Lithium und mit dem Heliumisotop ${}^3\text{He}$ zu Beryllium reagieren:



Letzteres zerfällt jedoch wieder durch Elektroneneinfang zu Lithium:

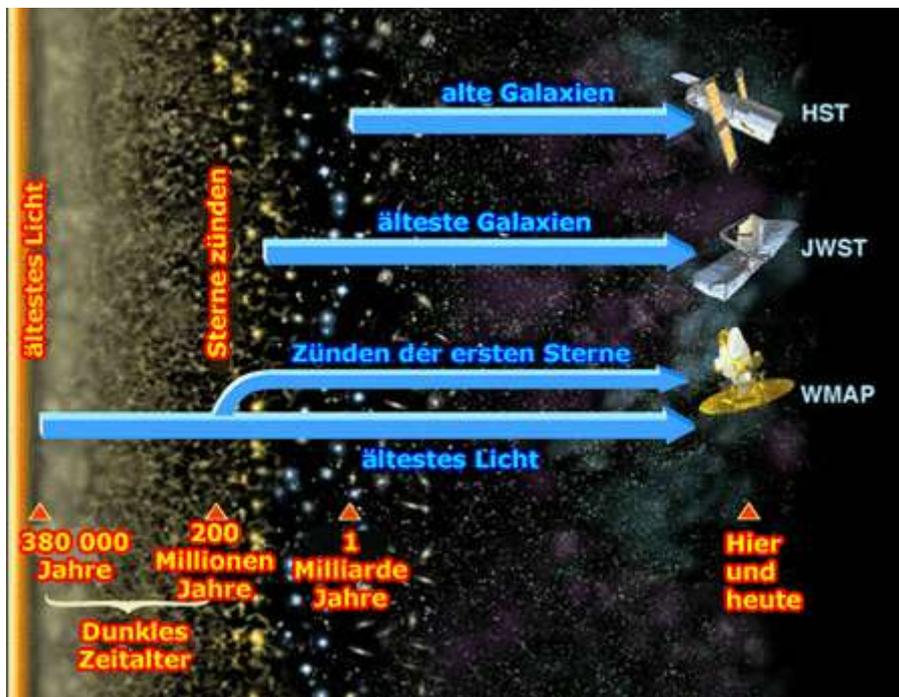


Nun könnte man glauben, dass die gebildeten Heliumkerne weiter zu Kohlenstoff fusionieren könnten



Das ist allerdings schon nicht mehr möglich, weil die Teilchendichte nicht mehr genügend groß ist. Dieser Prozess bleibt den späteren Sternen vorbehalten. Nach etwa 30 [min] ist der ganze Zauber vorüber, es können keine neuen Elemente mehr gebildet werden. An diesem Ende der Nukleosynthese verbleiben 75% aller Kernteilchen als Protonen, die Kerne der späteren Wasserstoffatome. Fast 25% der Materie hat sich jetzt zu Helium zusammengefügt. Ein Tausendstel Prozent nur beträgt noch der Anteil an Deuterium, Spuren von Lithium vervollständigen das Bild.

Nun wird es relativ langweilig im Universum. Es expandiert weiter und kühlt dabei immer mehr ab. Mit der Expansion geht auch eine Verdünnung der Energiedichte einher. Hiermit ist nicht nur die Anzahl der Photonen je Volumeneinheit gemeint, sondern auch die Teilchendichte. Materie ist ja gemäß $E = mc^2$ äquivalent einer bestimmten Energie. Weil aber die Teilchen im Gegensatz zu den Photonen eine Ruhemasse aufweisen, nimmt ihre Energiedichte deutlich langsamer ab, so dass nach einer gewissen Zeit nicht mehr die Strahlung dominiert, sondern die Materie das Zepter übernimmt. Das ist im kosmischen Alter von etwa 10 000 Jahren der Fall, die Strahlungsära hat ihr Ende erreicht.



Mit unterschiedlichen Instrumenten erforschen wir die Geschichte des Universums. Während uns das Hubble-Teleskop tiefe Einblicke in den jungen Kosmos gewährt, wird das neue [James Webb Space Telescope](#) (JWST) ab 2012

noch tiefer in die kosmische Vergangenheit blicken. Die allererste Strahlung zeigte uns jedoch schon WMAP.

Bild: Mit freundlicher Genehmigung des NASA/WMAP Science Team

Im Alter von 379 000 Jahren beträgt die Temperatur nur noch 3000 [K]. Bis zu diesem Zeitpunkt streuten die Photonen an den geladenen Teilchen, in erster Linie den noch immer freien Elektronen. Bei einer Kollision wird ein Photon von einem Elektron absorbiert, welches dadurch an Energie gewinnt. Die gibt es alsbald wieder in Form eines Photons frei usw. Das bedeutet im Endeffekt, dass sich die Photonen nicht frei bewegen konnten und das All neblig- trüb war wie Milchsuppe. Nun aber stellten sich die Bedingungen ein, die es den Atomkernen gestattete, die Elektronen einzufangen und "richtige", nach außen neutral wirkende Atome zu bilden. Diesen Vorgang nennen wir die **Rekombination**. Zur Freude der Photonen waren damit die leidigen Elektronen aus dem Weg geräumt und sie konnten fortan frei und ungehindert ihrer Wege ziehen - das Weltall wurde durchsichtig.

Die Rekombination bewirkte zwei entscheidende Vorgänge:

- Die nun freien Photonen verlieren durch die Expansion immer mehr Energie, soll heißen, die Wellenlänge der Strahlung wird ständig größer. Heute können wir diese Strahlung als 3 [K]- Hintergrundstrahlung beobachten und von ihr lernen, was sich im frühen Kosmos ereignete.
- Die ständigen Stöße der Photonen mit den Teilchen wurden erheblich abgeschwächt - Photonen wechselwirken deutlich geringer mit neutralen Atomen wie mit geladenen Teilchen. Hierdurch können sich nun Fluktuationen, Schwankungen von Dichte und Temperatur, in aller Ruhe und ungestört ausbilden. Strukturen frieren gewissermaßen aus und beginnen, das Universum zu formen.

Die Geschichte des Universums

Teil 4

Strukturen

Im Prinzip könnten wir nun zum ersten Teil dieses Beitrags zurückkehren. Unser Universum ist jetzt fast fix und fertig, alles ist vorhanden, was zu einem ordentlichen Kosmos mit all seinen Sternen, Planeten, Gaswolken und großen Leerräumen gedeihen kann. Doch soweit ist die Entwicklung noch nicht voran geschritten, das All feierte ja gerade erst seinen 379 000sten Geburtstag. In den vorangehenden Abschnitten haben wir lediglich die Entwicklung der **leuchtenden Materie** betrachtet, also den Stoff, aus dem wir und alle Sterne bestehen, sowie alles andere, was wir durch irgendeine Beobachtungstechnik erfassen können. Wie wir jedoch schon eingangs sahen, macht der Materieanteil gerade einmal 4% der universalen Gesamtmasse aus. Nach den WMAP-Messungen gibt es aber noch einen ordentlichen Anteil von 23%, den wir bisher in keiner Weise erfassen konnten - die **Dunkle Materie**. Was mag sie mit dem Urknall zu tun haben?

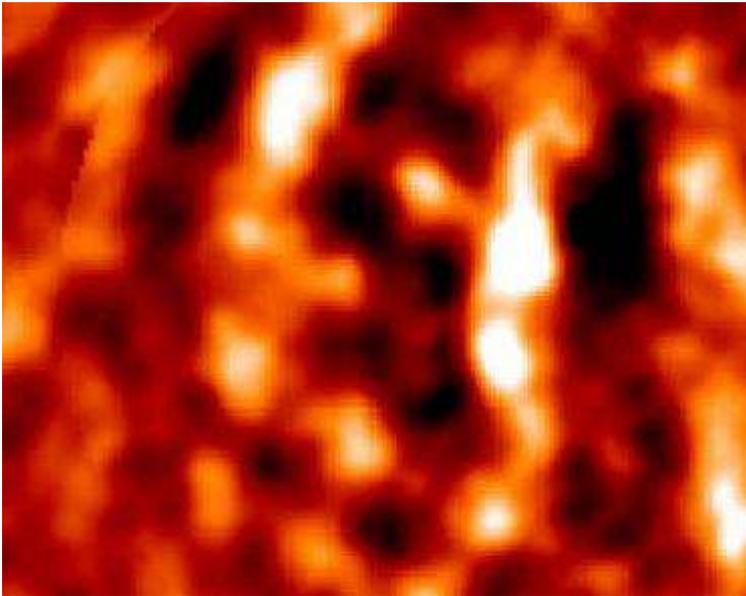
Während der Strahlungsära und bis zu ihrem Ende konnten zwar Fluktuationen entstehen, lokale Änderungen der Energiedichte und damit der Temperatur, diese wurden jedoch sofort geglättet durch die heftigen Kollisionen mit den hochenergetischen Photonen. Die Materie hatte keine Chance, sich an irgendeiner Stelle zu verdichten, oder?

Mit der Materie muss auch die Dunkle Materie entstanden sein. Wir haben bis heute nur sehr vage Hinweise auf ihre Natur. Dass sie aber tatsächlich existiert, hat schon Fritz Zwicky gezeigt. Es ist eher unwahrscheinlich, dass sich diese riesige Masse erst irgendwann nach dem Urknall ausbildete. Weil wir sie nicht sehen können, und das betrifft alle Bereiche der elektromagnetischen Wellen, wird Dunkle Materie nur äußerst schwach wechselwirken. Das war dann sicher auch im frühen Universum der Fall!

Während die Photonen die Fluktuationen der "normalen" Materie glätteten, hatten sie keinerlei Einfluss auf die Dunkle Materie. Sie konnte in aller Ruhe ein Spinnennetz filamentartiger Strukturen - ebenfalls bedingt durch frühe Fluktuationen - entwickeln.

Dunkle Materie hat mit der leuchtenden aber etwas gemeinsam: Sie wirkt gravitativ! Sobald nun der Hexenkessel der heißen Photonen keinen Einfluss

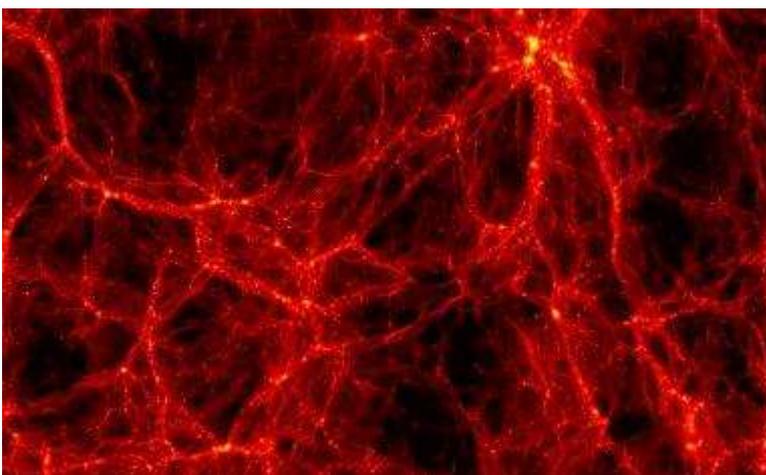
mehr auf die Materie hatte, musste diese sich den gravitativen Wirkungen der Dunklen Materie unterordnen.



Das Very Small Array (VSA) auf dem Berg Teide auf Teneriffa untersucht mit einem Radioteleskop die kosmische Hintergrundstrahlung. Was wir hier sehen, ist der Beginn der Ausbildung der Strukturen im Universum. Dieses verworrene Muster konnte nur entstehen, wenn tatsächlich ein gehöriger Anteil an Dunkler Materie bereits im frühen Universum vorhanden war.

Mit freundlicher Genehmigung von [Very Small Array Collaboration](#)

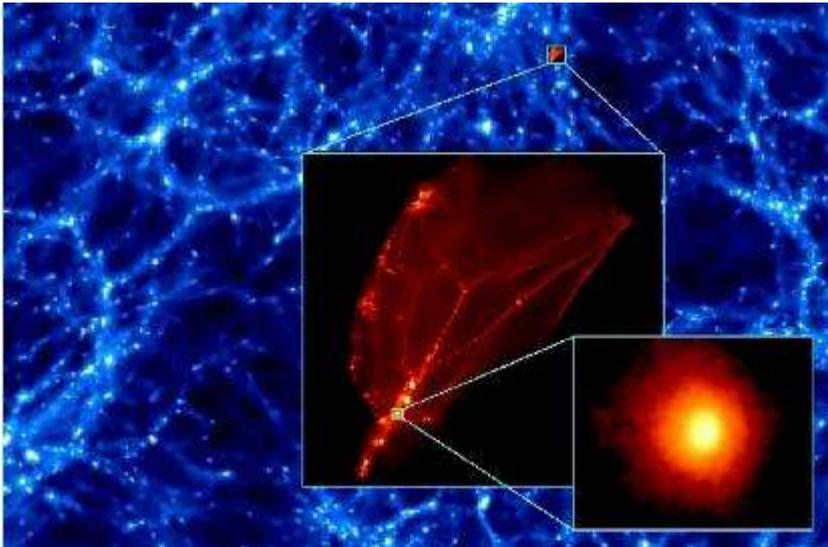
Man darf sich nun nicht vorstellen, dass sich Strukturen schlagartig ausbildeten. Für einen Zeitraum von etwa 20 Millionen Jahren wird das Universum sehr gleichmäßig gewesen sein, die Materie war fast homogen verteilt. Doch nach und nach bildeten sich Zonen Dunkler Materie, in die quasi die Materie hinein floss. So entstanden Raumbereiche, die immer stärkeren gravitativen Einfluss ausüben konnten. Durch ihre Anziehungskraft waren sie in der Lage, die Räume mit geringerer Materiedichte im Laufe der Zeit regelrecht leer zu fegen. Mit weiterer Ausdehnung des Universums bis zur heutigen Größe entstanden so riesige materiefreie Blasen, Leerräume, die wir als **voids** bezeichnen.



Man geht heute davon aus, dass sich Dunkle Materie in Halos ansammelte, etwa so schwer wie die Erde und so groß wie das Sonnensystem. In einer Simulation, die eine Größe von 1 Milliarde Lichtjahren umfasst, sehen wir, wie sich unzählige dieser Halos zu riesigen

filamentartigen Gebilden strukturieren. Entlang dieser "Spinnfäden" sammelt sich die Materie und hier entstehen Galaxien, ein Vorgang, der noch 500 Millionen Jahre dauert. Jeder Punkt ist ein Halo, und jeder ist Keimzelle einer Galaxie.

Quelle: [Universität Zürich](#)

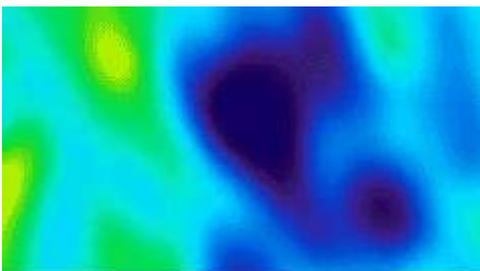


In dieser Darstellung wurde ausgehend von 10 000 Lichtjahren die Struktur jeweils um den Faktor 100 vergrößert. Zum Schluss erblicken wir ein Halo von der Größe des Sonnensystems, die Dunkle Materie hat hier etwa die Masse der Erde. Ihr Zentrum ist sehr

stark verdichtet. Diese Halos bestehen vermutlich aus Neutralinos, supersymmetrischen Teilchen, deren Nachweis noch aussteht.

Quelle: [Universität Zürich](http://www.unizh.ch)

Wir sehen, dass es nun in Siebenmeilenstiefeln vorwärts geht in der kosmischen Geschichte. Waren die ersten Sekundenbruchteile erfüllt von zahlreichen bedeutungsvollen Ereignissen, werden die Zeiträume, in denen sich etwas "bewegt", nun immer größer. Es dauert sicherlich 100 Millionen Jahre, bis sich die Strukturen vollständig ausbildeten, aus denen die Galaxien resultierten. Möglicherweise flammten aber schon 100 000 Jahre nach dem Urknall die ersten Sterne auf.



Hier sehen wir nochmals die Bildsequenz der ersten Seite. Eingangs die Fluktuationen der Hintergrundstrahlung, wie sie von WMAP aufgezeichnet wurden. Sie stellen quasi die Saatkörner des Universums dar.



Im nächsten Bild sehen wir, wie Materie nach und nach kondensiert und sich Regionen von größerer und geringerer Dichte entwickeln. Je weiter das All abkühlt, umso ausgeprägter werden die Dichteunterschiede.



Es sind nun rund 100 bis 200 Millionen Jahre "ins Land" gezogen und die ersten Sterne leuchten auf. Das primordiale Gas kondensierte, verdichtete sich und erhitze sich dabei so hoch, dass Kernfusionen einsetzen konnten.



Vielleicht noch einmal 100 oder 200 Millionen Jahre weiter. Es haben sich noch viel mehr Sterne gebildet und nach und nach formen sich Galaxien entlang der Strukturen, die sich schon im zweiten Bild andeuteten.

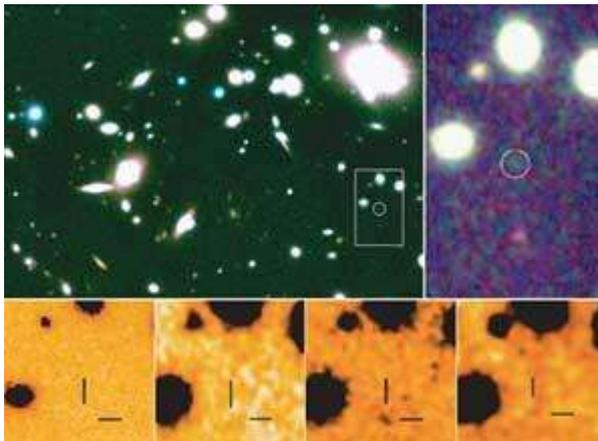


Das Universum hat die begonnene Entwicklung weitergeführt. Viele Milliarden Galaxien sind entstanden mit einer unübersehbaren Zahl von Sternen.

Das Alter von etwa 200 bis 400 Millionen Jahre könnten wir als die "Krabbelphase" des Universums bezeichnen, wollten wir es mit der menschlichen Entwicklung vergleichen. Es ist eine sehr stürmische Phase! Die ersten Sterne sind sehr massereich, 100, 200, ja sogar bis zu 500 Sonnenmassen haben diese wahren Giganten in sich versammelt. Dementsprechend schnell verlaufen ihre Kernfusionen und schon nach ein paar Millionen Jahren explodieren sie mit unvorstellbarer Wucht als [Hypernovae](#). Dabei, und schon vorher durch einen gewaltigen Sternwind, reichern sie das umgebende Medium mit den erbrüteten schweren Elementen an - bis in Entfernungen von einigen Tausend Lichtjahren. Schon im Alter von 300 Millionen Jahren ist das Universum geimpft mit den neuen Elementen. Die können sich nun zu Staubkörnchen verbinden und dafür sorgen, dass bei der Entstehung späterer Sternenerationen ein [Kühleffekt](#) der kollabierenden Gaswolken eintritt. Das lässt künftige Sterne nicht mehr so massereich werden, wodurch deren Brenndauer wesentlich verlängert wird. Und schließlich sind sie die Saatkörner für das spätere Leben...

Wie sicher leicht zu erraten ist, wird am Ende des Lebens der ersten Sternboliden auch die extremste mögliche Endstufe stehen: Das [Schwarze Loch](#). Diese ersten stellaren Schwarzen Löcher werden wohl gleich massenhaft entstanden sein und die "Keime" der bald entstehenden [Quasare](#) darstellen. An Materie als "Futter" war in dieser Zeit noch leicht zu kommen, denn das Universum war noch recht klein und die Massendichte hoch. So könnten in

relativ kurzer Zeit aus den stellaren Überresten supermassereiche Schwarze Löcher entstanden sein, die Antriebsmotore der Quasare.



Das **ISAAC**, Infrarotinstrument von ESO's Very Large Teleskop (VLT) hat unter Zuhilfenahme des Gravitationslinseneffektes die älteste bisher bekannte Galaxie entdeckt. Abell 1835 IR1916 entstand, als das Universum gerade einmal 470 Millionen Jahre alt war. Die Masse der Galaxie ist um den Faktor 10 000 geringer wie die der Milchstraße. Links eine Aufnahme des Hubble-Teleskops, rechts und unten Bilder in

verschiedenen IR-Bändern.

Mit freundlicher Genehmigung der ESO

Die hier gezeigte Galaxie stellt möglicherweise nur eine Ausnahme dar. Wir gehen heute davon aus, dass bis vor etwa 10 Milliarden Jahren das Universum von wenigen, extrem großen Galaxien beherrscht wurde. Sie verschmolzen nach und nach miteinander, was nicht ohne Folgen blieb. Wahrhaft stürmische Sternentwicklung wurde angefacht und Schwarze Löcher wurden mit Gas regelrecht überfüttert. Die Sternentstehung beruhigte sich jedoch langsam und wurde immer mehr von den kleineren Spiralgalaxien übernommen. Die Schwarzen Löcher in deren Zentren wuchsen dabei fast unaufhörlich weiter und konnten Milliarden von Sonnenmassen ansammeln. Die Unmengen von Materie wurden in den Akkretionsscheiben durch die Reibung extrem erhitzt, was die enormen Strahlungsleistungen der Quasare erklärt.

Heute ist das Universum ruhiger geworden, die stürmische Entwicklungsphase ist vorüber. Viele der Schwarzen Löcher in den Galaxienzentren sind inzwischen inaktiv, da sie den umgebenden Raum fast völlig leergefegt haben. Sterne entstehen im Durchschnitt nur noch mit wenigen Sonnenmassen pro Jahr in einer Galaxie, bis auf wenige Ausnahmen (Starburstgalaxien). Nun bleibt uns noch, eine Voraussage für die künftige Entwicklung des Universums zu wagen.

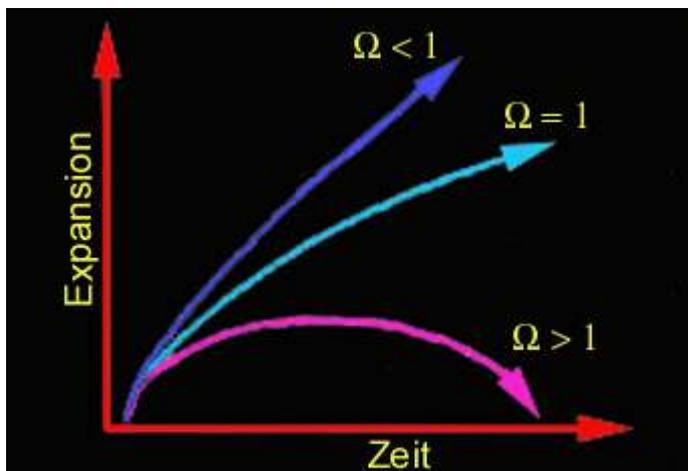
Die Zukunft

Eine Aussage über die Zukunft des Universums zu machen ist keine leichte Aufgabe. Hierzu müssten Daten wie z.B. der Gesamtenergieinhalt genau bekannt sein. Eine solche Bestimmung gestaltet sich als sehr schwierig, da wir nicht alles, was sich im Universum befindet "sehen" können. Dennoch kann man Prognosen wagen.

Für die weitere Zukunft bieten sich lediglich 3 Alternativen:

- **Geschlossenes Universum:** Die enthaltene Materie/Energie wird die Expansion stoppen und in eine Kontraktion umkehren. Die Folge ist ein Hitzetod, das gesamte Universum stürzt wieder in sich zusammen bis zu einer Singularität (*big crunch*).
- **Offenes Universum:** Die Eigengravitation der enthaltenen Materie/Energie kann die Expansion nicht aufhalten, sie wird sich bis in alle Ewigkeit fortsetzen. Der Kosmos vergeht im Kältetod, irgendwann erlöschen alle Sterne, das All kühlt sich auf den absoluten Nullpunkt ab und es werden sogar alle Kernteilchen zerfallen.
- **Flaches Universum:** Die Gravitation bringt irgendwann zwar die Expansion zum Stillstand, es kommt aber nicht zur Kontraktion. Auch in diesem Fall ereilt den Kosmos der Kältetod.

Die Zukunft des Kosmos setzt sich zusammen aus verschiedenen Faktoren. Eine gewichtige Rolle spielt sein Energieinhalt, die Gesamtenergie k . Diese setzt sich aus kinetischer und potentieller Energie zusammen. Sollte die kinetische Energie überwiegen, so wird das All ewig weiter expandieren, es ist offen. Liegt das Gleichgewicht auf Seite der potentiellen Energie, kommt es zum big crunch. Ein weiterer Faktor ist die mittlere Materiedichte p . Nur wenn sie einen bestimmten Wert, die **kritische Dichte** übersteigt, kann das All kontrahieren. Das Verhältnis von tatsächlicher zu kritischer Dichte nennt man allgemein Ω .



Wenn Ω größer als 1 ist, wird sich die Expansion eines Tages umkehren (untere Kurve). Ist Ω kleiner als 1, so haben wir ein offenes Universum, die Expansion ist unendlich (obere Kurve). Doch auch bei $\Omega = 1$ stirbt das All den Kältetod.

Die genauen Werte von k und p kennen wir noch nicht sehr exakt, sie sind sehr schwierig zu bestimmen. Dennoch ist uns inzwischen bekannt, dass die Massendichte knapp unterhalb der kritischen Dichte liegt. Das bedeutet ganz offensichtlich, dass wir in einem offenen Universum leben. Zudem beschleunigt sich die Expansion, wohl aufgrund der mysteriösen Dunklen Energie. Unser Kosmos wird eines fernen Tages vollkommen erlöschen und den Kältetod erleiden.

Alexander Friedmann (1888- 1925), ein russischer Mathematiker,



hatte die Entwicklung des Universums mit Hilfe der Einsteinschen Relativitätstheorie untersucht und veröffentlichte 1922 seine Ergebnisse. Hiernach lässt sich die Zukunft des Alls mit einer Gleichung beschreiben, welche unabhängig von Friedmann 1927 auch von **Georges Lemaître**, einem belgischen Kosmologen gefunden wurde. Deshalb wird diese Gleichung auch die Friedmann- Lemaître- Gleichung genannt:

$$H^2 - (8\pi G\rho/3) = k/a^2$$

Hierin bedeuten, wie z.T. schon oben angedeutet:

H = Expansionsrate

G = Gravitationskonstante

ρ = Mittlere Materiedichte

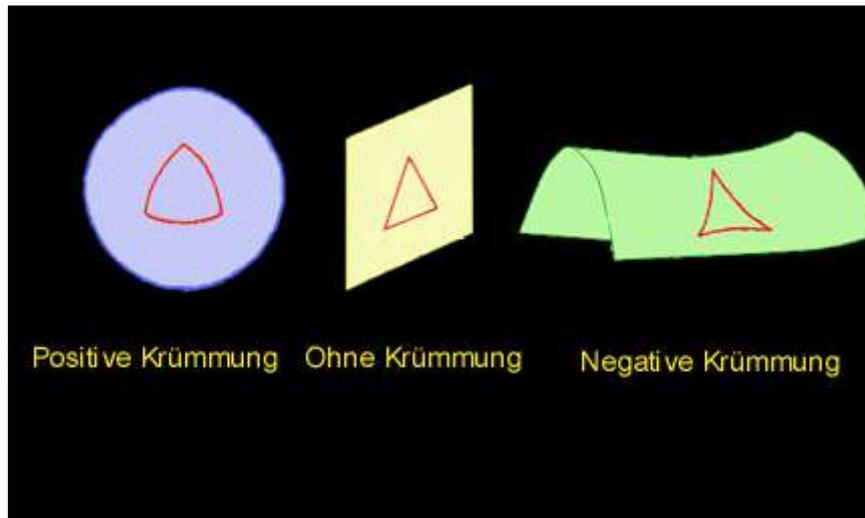
k = Gesamtenergie

a = Ein Skalenfaktor, der die Proportionalität aus momentanem Abstand zweier Punkte im expandierenden All zu einem nicht expandierenden beschreibt.

Weltmodelle

Die unterschiedlichen Arten, auf die sich unser Kosmos entwickeln kann, nennt man auch Weltmodelle bzw. nach Friedmann auch Friedmann- Modelle. Die im Weltraum verteilten Massen üben eine gemeinsame gravitative, nach innen gerichtete Kraft aus, welche die Expansionsgeschwindigkeit verringert. Die Friedmann- Modelle verbieten aber ein statisches, unveränderliches Weltall (wie die steady- state- Theorie es postuliert), denn in einem solchen All würde es keine Entwicklung geben, es wäre ohne Geschichte, was allen physikalischen Gesetzen widerspricht.

Man unterteilt die Friedmann- Modelle in zwei Gruppen: In der ersten ist die Massedichte so gering, dass die Expansion des Alls nicht zu stoppen ist ($\Omega < 1$), die zweite Gruppe enthält diejenigen Weltmodelle, bei denen die Expansion eines Tages durch eine genügend hohe Massedichte umkehrt in eine Kontraktion ($\Omega > 1$). Der Grenzfall ist gekennzeichnet durch $\Omega = 1$, ein Kosmos, bei dem die Expansion erst nach unendlich langer Zeit zum Stillstand kommt.



Darstellungsversuch der Raumstruktur durch Vereinfachung auf 2 Dimensionen. Der Verlauf der Krümmung der Raumzeit ist für die 3 möglichen Zustände des Kosmos dargestellt. Links ist der Zustand des geschlossenen Universums ($\Omega > 1$) symbolisiert. In diesem Raum gibt es keine Geraden, sondern nur Geodäten. Rechts ist das offene Universum skizziert ($\Omega < 1$), es stellt sich sattelförmig dar. Der Grenzfall (Mitte) ist das flache Universum, es ist euklidisch.

Wie auch immer die Zukunft des Universums beschaffen sein wird, alle darin enthaltene Materie, Lebewesen eingeschlossen, können diesem Schicksal nicht entkommen. Ist der Kosmos offen oder flach, wird er den Kältetod sterben. Irgendwann werden alle Sterne erlöschen, das All wird dunkel. Die sich jetzt bildenden Sterne haben noch 10^{14} Jahre zu leben. Nach verschiedenen Berechnungen bzw. Vermutungen könnten nach 10^{32} Jahren die Protonen beginnen zu zerfallen. Nach 10^{64} Jahren werden die Galaxien sich auflösen, alles kühlt sich auf den absoluten Nullpunkt ab. Dann werden nur noch Schwarze Löcher, Schwarze Zwerge und erhaltene Neutronensterne durch ein dunkles, von der Asche vergangener Sternenerationen erfülltes, trostloses All ziehen. Nach der unvorstellbaren Zeitspanne von 10^{500} Jahren beginnen die Eisenkerne zu zerfallen. Warten wir noch "ein wenig" länger, vielleicht 10^{600} oder 10^{1000} Jahre, werden selbst die massivsten Schwarzen Löcher verdampft sein. Leben wird es dann schon lange nicht mehr im Kosmos geben.

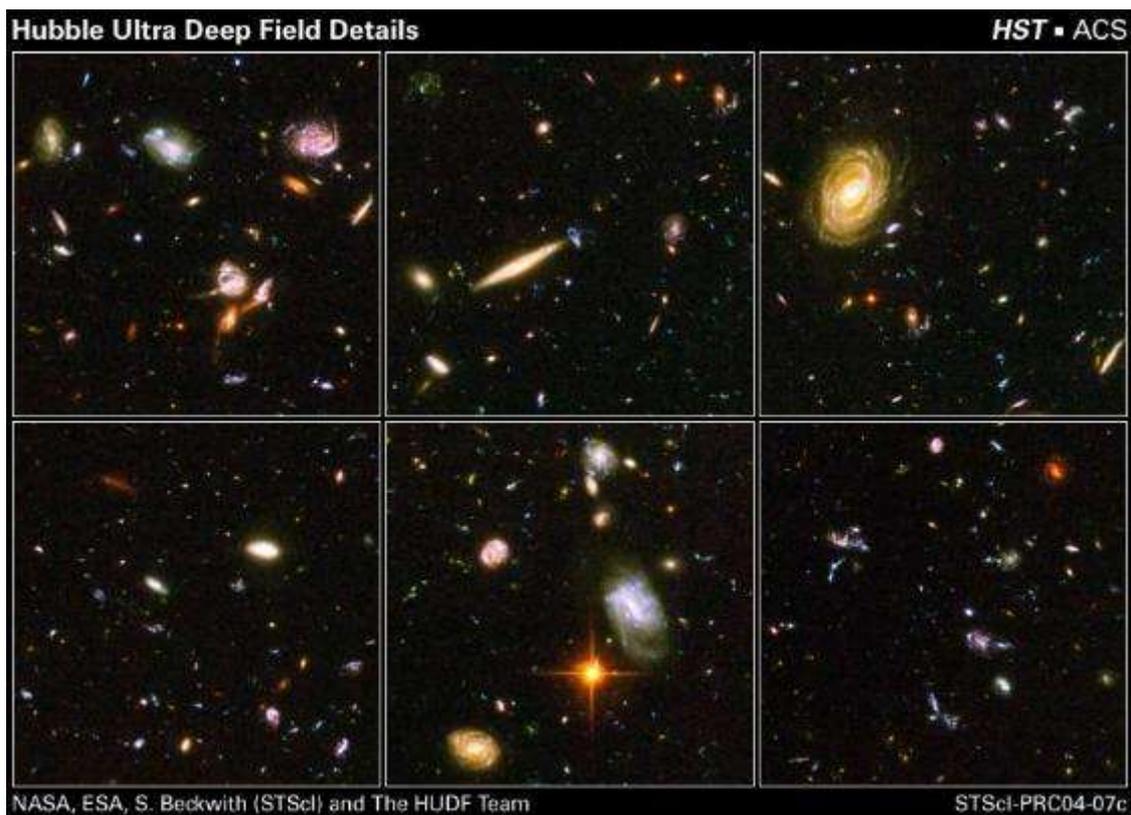
Sollte unser All wider Erwarten jedoch geschlossen sein, so wird es in vielleicht 20 Milliarden Jahren beginnen wieder zu kontrahieren. Es wird sich immer schneller zusammenziehen, erst werden einzelne Galaxien miteinander verschmelzen, dann ganze Galaxienhaufen. Das Weltall wird immer heißer und lebensfeindlicher, es wird erfüllt von Strahlung sein. Zum Schluss stürzt die ganze Raumzeit mit aller enthaltenen Materie und Energie in sich zusammen, bis nichts als ein Punkt unendlicher Dichte und unendlich kleiner Ausdehnung übrig

bleibt. Dann hat die schwächste aller Kräfte, die Gravitation, den endgültigen Sieg über Zeit, Raum und Materie errungen. Vielleicht ist dieser *big crunch* aber auch die Geburtsstunde eines neuen Universums, eines neuen Raums und einer neuen Zeit. Wie auch immer, in der Geschichte des Universums ist kein *happy end* vorgesehen, und die Menschheit wird es sowieso nicht erleben können...

Weltpostulat

Als Weltpostulat oder **kosmologisches Prinzip** bezeichnet man folgende Aussage:

Das Universum ist, großräumig gesehen, überall gleich. Ein relativ zu seiner Umgebung ruhender Beobachter hat an jeden Punkt des Universums den gleichen Anblick wie wir von unserer Milchstraße aus. Die Fluchtbewegung und Verteilung der Materie, sowie die kosmische Hintergrundstrahlung erscheinen von jedem Ort aus gleich. Das Weltall ist großräumig homogen und isotrop, jeder Beobachter im All hat denselben Eindruck von den Eigenschaften und grandiosen Vorkommnissen im Universum.



Einer der tiefsten Einblicke in den frühen Kosmos: Diese Hubble Aufnahmen zeigen uns das Universum, als es unter den Galaxien noch hoch her ging. Dicht gedrängt, im Alter von 800 bis 1000 Millionen Jahren, waren Galaxienbegegnungen und Durchdringungen an der Tagesordnung. Für diese Aufnahmen war eine Gesamt- Belichtungszeit von über 11 Tagen notwendig.

Mit freundlicher Genehmigung von NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

Die Geschichte des Universums

Teil 5 - Die Millennium- Simulation

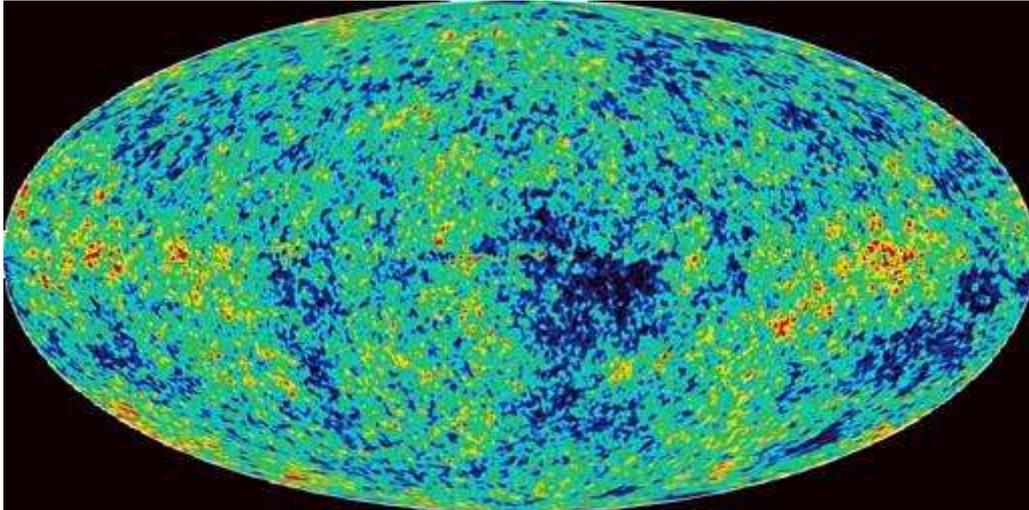
Das Virgo Konsortium

Viel haben wir bis jetzt in den letzten 4 Kapiteln der kosmischen Geschichte erfahren. Wir sahen, wie das All eventuell entstanden sein könnte, welche Entwicklungsstufen es durchlebte und auch wie die düstere Zukunft aussehen mag. Unsere Wissenschaftler haben in den vergangenen 100 Jahren aus unzähligen Beobachtungen wie in einem riesigen Puzzle ein Mosaiksteinchen nach dem anderen zu einem umfassenden Bild zusammengefügt - zur Chronik des Universums.

Nun mag sich mancher fragen, ob dieses Bild auch tatsächlich der Realität entspricht. Kann die Historie nicht auch einen ganz anderen Weg gegangen sein? Wissenschaftler sind von Natur aus sehr skeptisch und hinterfragen jedes Ergebnis mehrfach - so lange, bis völlige Sicherheit herrscht. Das betrifft auch die kosmische Geschichte und aus diesem Grund fand sich ein internationales wissenschaftliches Team zusammen, um sie zu überprüfen. Dieses **Virgo- Konsortium** ist eine Gruppe von Kosmologen aus Deutschland, England, Kanada, USA und Japan. Im Jahre 2005 führten sie die bislang größte Computer- Simulation durch, die so genannte **Millennium- Simulation**.

Wir sahen ja, dass die Beobachtung des Mikrowellenhintergrundes durch **WMAP** eine Fülle von Daten über den frühen Kosmos lieferte. Auch haben wir eine Vorstellung über den Materieinhalt des Universums und damit zusammengenommen die Anfangsbedingungen des Weltalls. Mit diesen Daten unter Beachtung der physikalischen Gesetze - vor allem des Gravitationsgesetzes - und der Expansion der Raumzeit sollte man mit einem Rechner die kosmische Entwicklung vom Jahr 380 000 (nach dem Urknall) bis zur Gegenwart simulieren können. Wenn unsere Theorien stimmen, dann müsste das Endergebnis der Simulation mit den heutigen Beobachtungen korrespondieren.

Was eigentlich sehen wir, wenn wir eine Abbildung des kosmischen Mikrowellenhintergrundes betrachten?



Dargestellt sind in einem solchen Bild durch unterschiedliche Farbgebung allerfeinste Temperaturunterschiede des jungen Universums (blau = kälter, rot = wärmer). Diese entsprechen Bereichen von höheren oder niedrigeren Materiedichten, wobei den größeren Dichten die höhere Temperatur zukommt. Auf einen Nenner gebracht sehen wir also, dass die Materie *nicht* völlig gleichmäßig im Kosmos verteilt war, wie man es eigentlich erwarten würde. Nein, es gab schon von Anfang an *fraktale* Schwankungen. Wie kommt es dazu? Die eigentliche Ursache müssen wir zu einem viel früheren Zeitpunkt suchen. In unserem Bild befindet sich das All mit 380 000 Jahren in einer schon fortgeschrittenen Entwicklungsphase, man könnte sagen es ist bereits in der "Kraabelfase". Ursprünglich lag nach unseren bisherigen Erkenntnissen die kosmische Ausdehnung im Bereich von [Plancklängen](#), womit wir es der Quantenwelt zuordnen müssen. Hier aber ist das Reich der Heisenbergschen Unschärfe, nichts ist klar definiert, alles ist ein ständiges Auf und Ab, Hin und Her - alles *fluktuiert*. Plötzlich aber bläht sich das All auf, mit wahnsinniger Geschwindigkeit (*Inflationsphase*). Schlagartig verlässt es den Quantenzustand, es wird makroskopisch. Die eben noch hin und her schwingenden Zustände der Energiedichte, gleichbedeutend mit Temperatur und Gravitation, werden quasi "eingefroren". Das kosmische Strickmuster aus Bereichen höherer und niedrigerer Dichte/Temperatur ist erschaffen.

Wenn wir also das WMAP- Bild betrachten, sehen wir im Prinzip das mehr als mikroskopisch kleine Quantenrauschen des Vakuums - nur dass es durch die kosmische Expansion stark vergrößert wurde. Inzwischen ist auch die Materie gebildet, die allerdings nur 4% der Energiedichte ausmacht, demgegenüber stehen 21% der gleichzeitig entstandenen [Dunklen Materie](#). Während sich die Dunkle Materie entlang der gebildeten Strukturen ungestört ansammeln konnte, blieb dies der Materie verwehrt. Sie wechselwirkte sehr stark mit der dominierenden Strahlung, die jede kleinste Kräuselung sofort glättete. Die Dunkle Materie jedoch wechselwirkt nur über die Gravitation. Deshalb ist die Simulation in der Hauptsache eine Entwicklungsgeschichte der Dunklen Materie - die normale Materie mit ihrem geringen Anteil spielt verblüffenderweise nur eine untergeordnete Rolle.

Mit freundlicher Genehmigung von NASA/WMAP Science Team

Die Simulation

Unser Universum ist riesig und es beherbergt eine große Materiemenge. Dementsprechend schwierig ist es, eine Computersimulation so zu gestalten, dass sie den reellen Gegebenheiten möglichst nahe kommt. Ein wesentlicher Faktor ist dabei die Anzahl der gewählten Teilchen Dunkler Materie, die letztendlich die Verteilung und Entwicklung der Galaxien aufzeigen werden. In der Millennium- Simulation wurde die sagenhafte Anzahl von 10 Milliarden Teilchen eingesetzt, um möglichst detaillierte Aussagen zu bekommen. Jedes dieser fiktiven Teilchen repräsentierte rund 1 Milliarde Sonnenmassen, wodurch sich im Endeffekt die Entwicklung von über 20 Millionen Galaxien verfolgen ließ.



Eine derartige Mammut-Aufgabe ließ sich dann auch nicht auf einem "normalen" PC bewältigen - der hätte dazu 38 Jahre ununterbrochener Rechenzeit benötigt. Immerhin beginnt die Simulation im Jahr 380 000, als das Universum für Strahlung durchlässig wurde. Die feinen Schwankungen, die wir heute noch in der

Hintergrundstrahlung beobachten können sind also der Ausgangspunkt für die Rechnungen, die dann bis zur Gegenwart laufen. Für diesen Job setzte man den Großrechner IBM p690 des Rechenzentrums der Max-Planck-Gesellschaft in Garching ein. Eine Maschine, bestehend aus 512 Prozessoren mit insgesamt 1 Terabyte Hauptspeicher, der gerade noch ausreichend war. Die Rechenzeit erstreckte sich über mehr als einen ganzen Monat.

Quelle: CISL, Computational & Informations Systems Laboratory

Schon lange rätselt man, wie es zur Entwicklung der [Quasare](#) gekommen ist. Hier haben wir es ja mit Galaxien zu tun, in welchen sehr massereiche Schwarze Löcher werkeln, mit Milliarden von Sonnenmassen. Da es sich um sehr junge Galaxien handelt ist es eigentlich verwunderlich, dass es schon in der Frühzeit des Universums solch massereiche Boliden gab. Immerhin sind wir ja heute relativ sicher, dass die Entwicklung von kleineren zu größeren Strukturen (z.B. Galaxien) hin verlief. In der Millennium- Simulation zeigte sich aber dann doch, dass einige dieser massereichen Schwarzen Löcher bereits wenige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall vorhanden waren und in ihren Wirtsgalaxien zu den schwersten Objekten des Universums heran reiften.

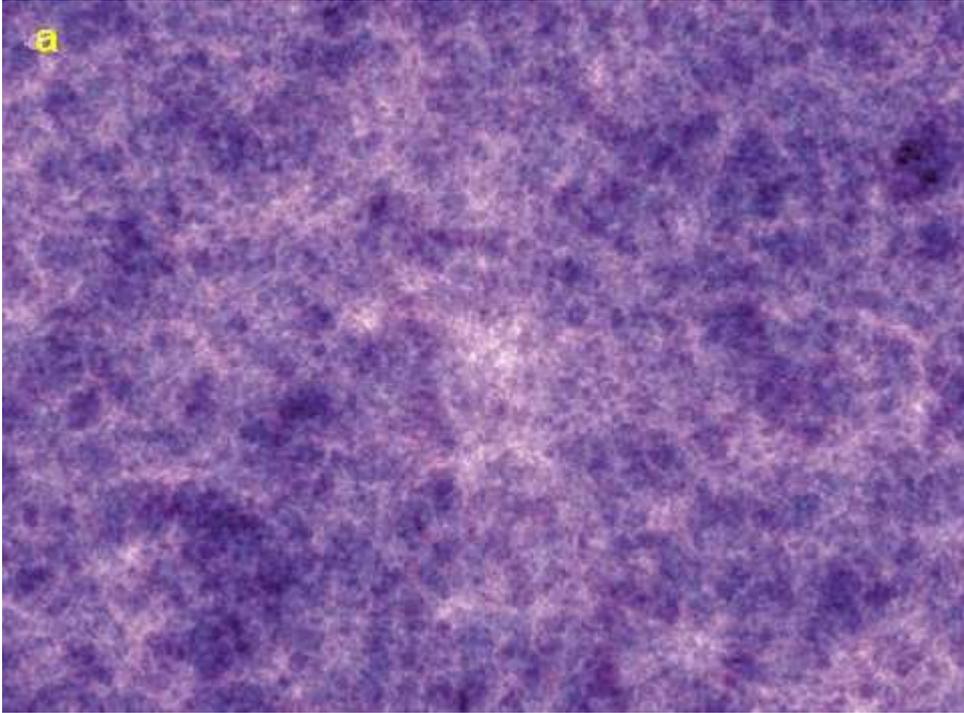
Kosmische Geschichte

Die im Alter von 380 000 Jahren vorhandenen feinsten Schwankungen der Dichte sind also der Ausgangspunkt der Simulation. Anfänglich sehr langsam, beginnt sich unter der gravitativen Wirkung die Materie an den Orten erhöhter Dichte anzusammeln, so dass sich die Dichte weiter erhöht. Das verstärkt die Gravitation, wodurch die Zusammenballung der Dunklen Materie beschleunigt wird. Es kommt nun aber nicht zum völligen Kollaps, vielmehr wird die Gravitationsenergie umgesetzt in eine chaotische Bewegung der Teilchen - in kinetische Energie. Die Dunkle Materie erzeugt so eine Art Gasdruck, welcher der einwirkenden Gravitation entgegengerichtet ist - es stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein: Die Halos aus Dunkler Materie formieren sich. Unterstützt wird dies durch die normale Materie, die sich der gravitativen Wirkung der Halos nicht entziehen kann und sich dort ansammelt. Auch ihr Gasdruck wirkt stabilisierend auf die Halos.

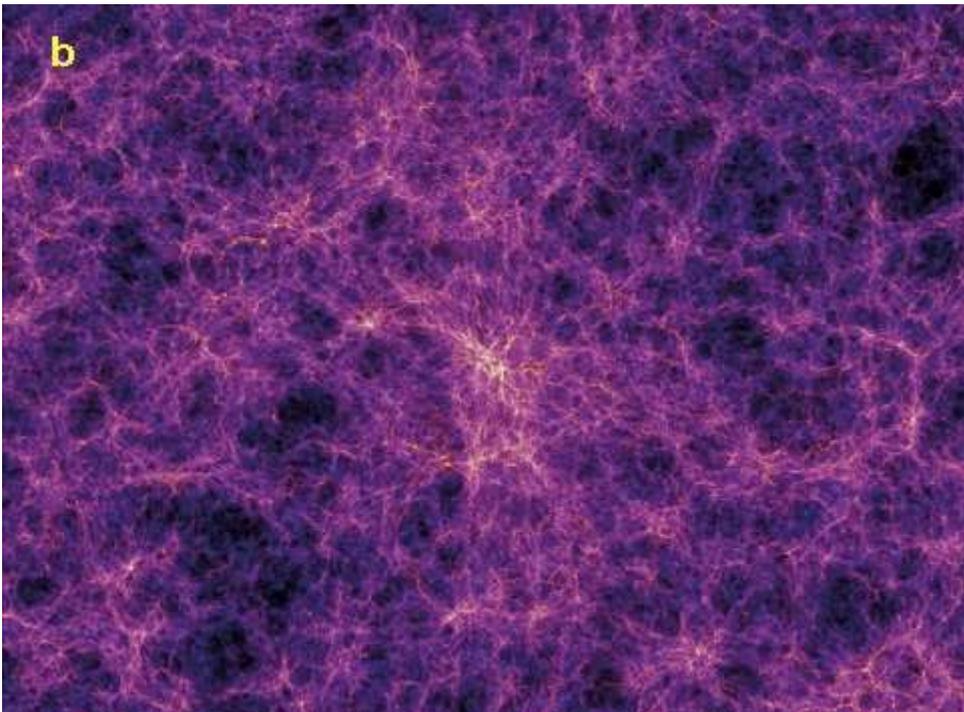
Der Gasdruck ist immer auch ein thermischer Druck: Jede Verdichtung führt zu einer Temperaturerhöhung (das weiß jeder, der schon mal eine Fahrrad-Luftpumpe betätigt hat), das ist auch im aus Helium und Wasserstoff bestehendem kosmischem Gas der Fall. Ist der thermische Druck so groß wie die nach innen gerichtete Gravitation, verhindert er eine weitere Kontraktion. Erst nach Abkühlung des Gases können aus ihm Sterne und Galaxien entstehen.

Anmerkung:

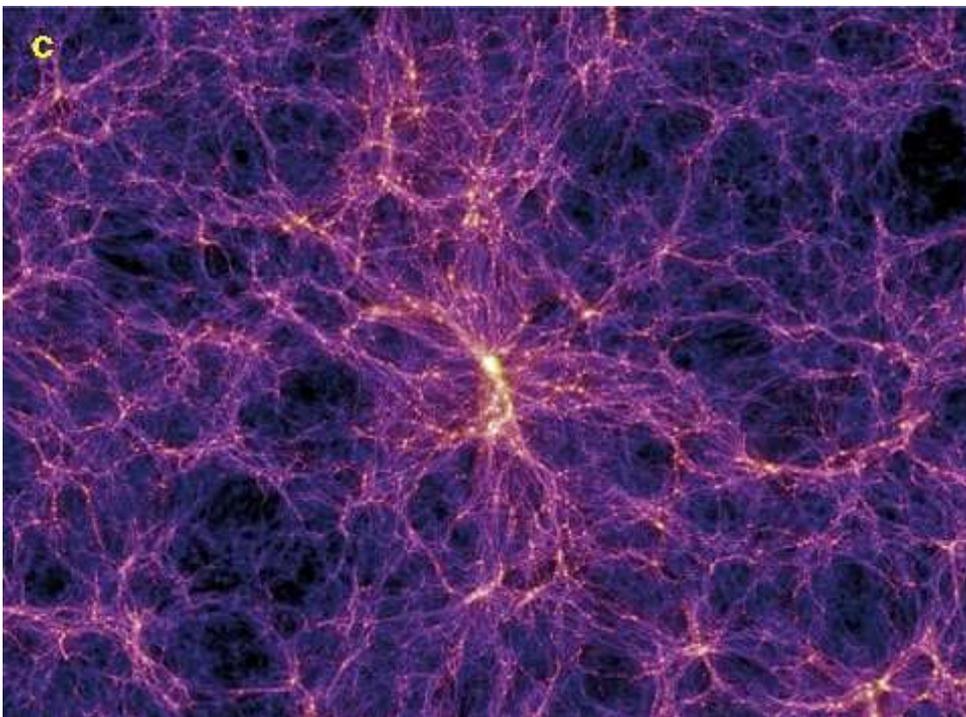
*Die hier beschriebenen Teilchen der Dunklen Materie sind bislang nur vermutet, niemand weiß, ob sie überhaupt existieren. Falls ja, verhalten sie sich höchst exotisch! Während jede normale Materie bei einer Kontraktion den auf sie einwirkenden Druck mit einer Temperaturerhöhung quittiert, macht dies die Dunkle Materie augenscheinlich nicht. Andernfalls wäre es der modernen Astronomie längst gelungen eine äquivalente Wärmestrahlung zu detektieren. Die **CDM** (Cold Dark Matter) muss tatsächlich so kalt sein, dass sie selbst nach der Kontraktion zu den Halos keinerlei Strahlung emittiert. Der Grund ihrer "Unsichtbarkeit" muss darin zu suchen sein, dass die dunklen Teilchen mit nichts und niemandem wechselwirken. So könnten in jeder Sekunde Milliarden von ihnen wie die Neutrinos durch unsere Körper fliegen, ohne dass wir je das geringste spüren würden.*



In den folgenden Bildern a bis d ist die Entwicklung der Halos zu verfolgen, und zwar von der anfänglich feinen Strukturierung bis zur heutigen Zeit. Es wird also ein Zeitraum von über 13 Milliarden Jahren simuliert. In diesem Bild hat das Universum ein Alter von 15 Millionen Jahren erreicht, die Strukturen sind erkennbar, aber erscheinen noch verwaschen.

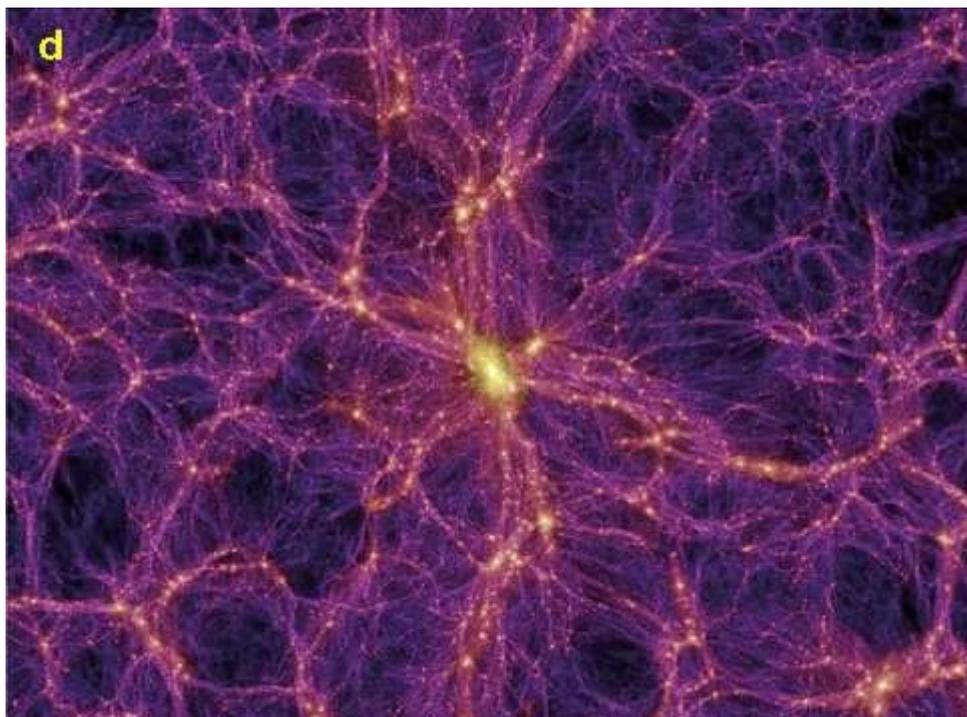


Nach und nach verfestigen sich die Strukturen, bilden ein feines, filamentartiges Netzwerk aus. Entlang dieser unregelmäßigen, fadenartigen Strukturen sammeln sich nach und nach die Halos aus Dunkler Materie an, die unterschiedliche Größen aufweisen können. Die Bilder zeigen einen kleinen, jeweils etwa 800 Millionen Lichtjahre großen Ausschnitt der Simulation. Hier im Alter von einer Milliarde Jahren.



Das Universum ist jetzt 4,7 Milliarden Jahre alt. Die Strukturen sind bereits deutlich ausgeprägt. Wo sich die Filamente kreuzen, können besonders massereiche Halos in Erscheinung

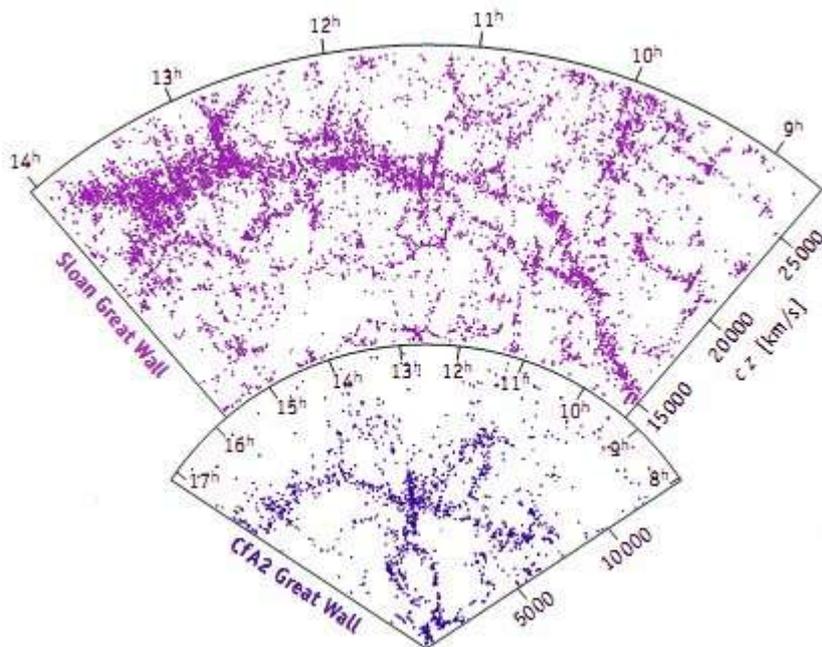
treten. Sie können mehrere 10^{15} Sonnenmassen aufweisen, was den größten Galaxienhaufen im Kosmos entspricht, die einige Tausend Galaxien umfassen.



Das Universum im Alter von 13,6 Milliarden Jahren. Die Simulation hat den Zustand erreicht, wie wir unseren Kosmos heute beobachten. Entlang der Filamente hat sich die Materie strukturiert, sie umschließen die riesigen Leerräume, *voids* genannt. Diese sind nicht absolut leer, sondern sie enthalten sehr dünnes Gas - nur eben nicht die komprimierte Materie wie wir sie von den Galaxien kennen. In diesen Bereichen fehlt die sonst dominierende Kraft der Dunklen Materie.

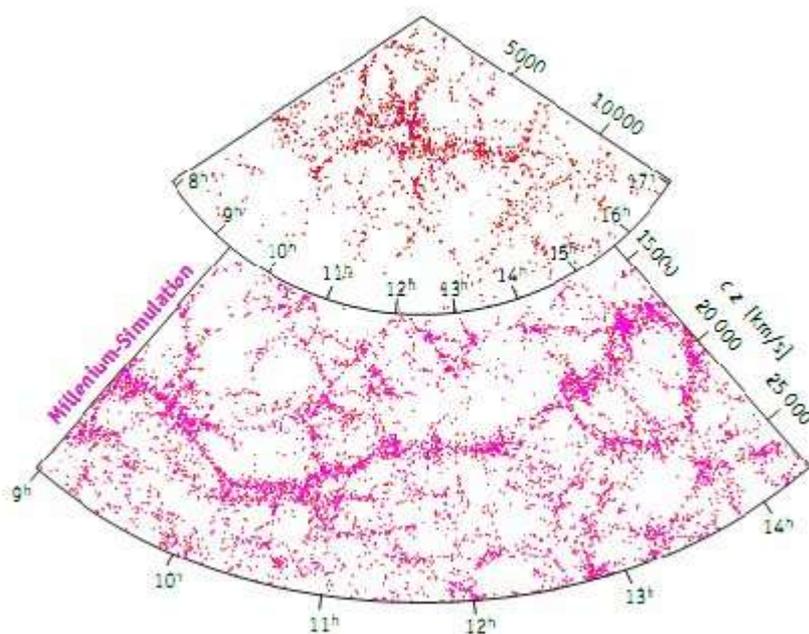
[Bitte folgen Sie auch den unten angegebenen Links, um weitere, detaillierte Bilder und Videos der Simulation anzusehen.](#)

So manch einer mag sich nun fragen, " ...diese paar Farbkleckse sollen jetzt die Geschichte des Universums sein?". Ja, wer sich schon ein wenig für die Entwicklung des Kosmos interessiert hat wird wissen, dass diese immer deutlichere Ausprägung der großräumigen Strukturen wirklich stattgefunden haben *muss*. Denn genau dieses Bild erhalten wir in der Realität, wenn wir einmal eine große Anzahl beobachteter Galaxien in einer Karte zusammentragen:



Links sehen wir Karten von großen Durchmusterungsprogrammen, den so genannten **Sloan- und CfA2-Surveys**. So wie es hier dargestellt ist, verteilen sich die Galaxien in unserer kosmischen Nachbarschaft. Besonders gut zu erkennen sind die Anhäufungen in den **Great Walls**.

Der realen Ansicht der Galaxienverteilung steht in diesem Bild das Ergebnis der Millennium- Simulation gegenüber. Diese führte zwar nicht zum exakt gleichen



Muster, doch ist auch hier unverkennbar die deutliche Ausbildung von Strukturen zu sehen.

Das ist sozusagen ein **Strickmuster** für einen Kosmos!

Bilder: MPA, Garching

Wie bereits weiter oben erwähnt ist also der Ursprung der heute beobachteten Strukturen, nach der sich die Materie im Weltall ausrichtet, nichts anderes als das stark vergrößerte Quantenrauschen des ehemals mikroskopisch kleinen Ur-Universums, welches sich dann unter dem Einfluss der Gravitation selbstständig weiterentwickelte. Unsere Wissenschaftler haben einmal mehr mit einem ungeheuren Aufwand bewiesen, dass wir es inzwischen durchaus im Prinzip verstanden haben, wie solch ein *System Kosmos* funktioniert.

Weitere Informationen (Bilder + Filme!):

<http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/presse/>

<http://www.youtube.com/watch?v=Y9yQOb94yI0>