

## Der Urknall

Die Theorie des Urknalls wird schon lange erforscht, aber hat es ihn wirklich gegeben und wenn ja, was ist danach passiert?

*von Lena Westphal, Schülerpraktikantin der Westfälischen Volkssternwarte im März 2003*

### Einleitung

Immer mal wieder hört man Berichte, in denen behauptet wird, es habe den Urknall nicht gegeben und die Rotverschiebung ferner Galaxien, die Hintergrundstrahlung des Weltalls, das Alter der ältesten Himmelskörper und das Mengenverhältnis zwischen Wasserstoff, Helium und Deuterium müsse anders erklärt werden.

Unser Planetensystem liegt am Rand unserer Galaxis, der Milchstraße, in einem ihrer äußeren Spiralarme. Vor rund 75 Jahren fand man heraus, dass das Weltall von vielen solcher Galaxien erfüllt ist, der Raum zwischen ihnen ist jedoch fast leer.

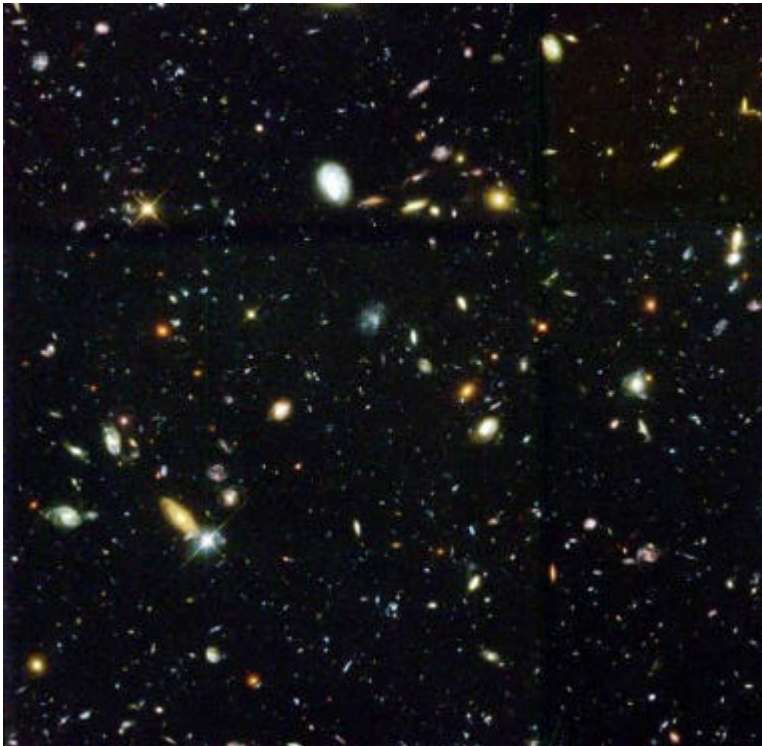


Abbildung 1: Das so genannte „Hubble Deep Field“, eine Langzeitbelichtung des Sternenhimmels mit dem Weltraumteleskop „Hubble“, ist der tiefste Einblick den wir bisher ins Universum machen konnten. Man sieht auf diesem Ausschnitt des Himmels keine Sterne, die zu unserer Galaxie gehören. Die hier sichtbaren Objekte sind sehr weit von uns entfernt. Das Licht dieser Objekte hat ca. 4 Milliarden Jahre gebraucht, bis es uns erreicht hat. Denn obwohl Licht so schnell ist (Lichtgeschwindigkeit  $c=299.792$  Kilometer pro Sekunde im Vakuum) braucht es doch eine bestimmte Zeit für eine bestimmte Strecke. Weil uns hier Licht erreicht, dass schon vor rund 4 Milliarden Jahren ausgesendet wurde, blicken wir hier 4 Milliarden Jahre in die Vergangenheit. Je weiter die Objekte, die wir beobachten, entfernt sind, umso weiter blicken wir in die Vergangenheit. Bildquelle: [1]

### Hubbles Entdeckung

1929 entdeckte Edwin Powell Hubble, dass sich entfernte Galaxien immer weiter von uns weg bewegen. Er gelangte zu dieser äußerst wichtigen Erkenntnis mit Hilfe der Spektren dieser Galaxien. Das Spektrum einer Lichtquelle, die sich von einem Beobachter weg bewegt, scheint im Gegensatz zu einer in Ruhe befindlichen Lichtquelle in den langwelligen Bereich verschoben zu sein. Die sich entfernende Lichtquelle sendet dem Anschein nach längere Lichtwellen aus.

(Dies ist vergleichbar mit dem Dopplereffekt, aber, da sich nicht die Galaxien, sondern der Raum, in dem die Galaxien liegen, auseinander bewegt, kann man nicht vom Dopplereffekt

reden. Man muss sich vorstellen, die Galaxien seien in ihrer Umgebung eingebettet, während sich der Raum ausdehnt. Die Galaxien verhalten sich wie Rosinen in einem aufgehenden Hefeteig. Ohne ihre Position im Teig selbst zu verändern, vergrößern sich ihre durchschnittlichen Abstände systematisch.)



Abbildung 2: Wenn sich Sirene und Beobachter in Ruhe zueinander befinden, treffen die Wellenberge in gleichen Abständen beim Beobachter ein. Der Beobachter nimmt einen gleich hohen, bzw. tiefen Ton wahr. Bildquelle: [2]

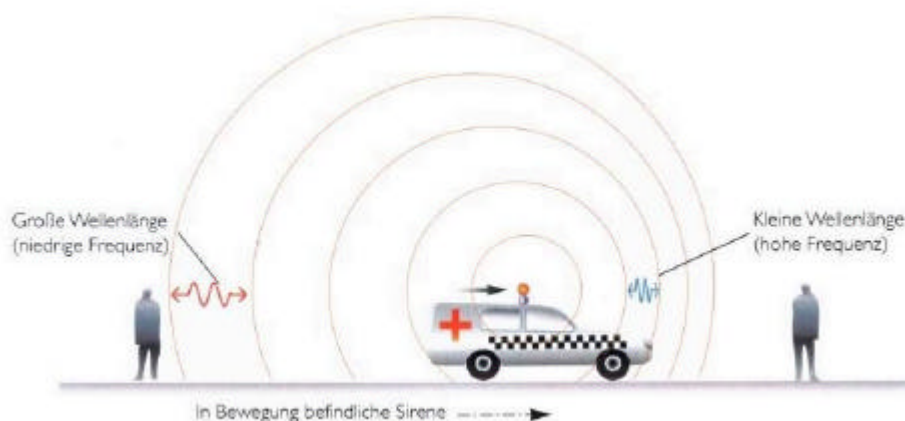


Abbildung 3: Wenn sich die Sirene bewegt, treffen in der gleichen Zeitspanne mehr Wellenberge bei dem Beobachter ein, auf den sich die Sirene zu bewegt, als bei dem von dem sie sich weg bewegt. Der Ton erscheint den beiden Beobachtern unterschiedlich hoch, bzw. tief. Bildquelle: [2]

Hubble beobachtete bei allen weit entfernten Galaxien eine Verschiebung der kontinuierlichen Linien im Spektrum in den (langwelligen) roten Bereich. Daraus folgerte er eine allgemeine Expansion des Universums, welches demnach vor langer Zeit einmal an einem Punkt begonnen haben musste. In diesem Punkt, man nennt ihn auch eine „Singularität von Raum und Zeit“, war alles, was existierte und noch existieren sollte, vereint. Eine solche Anfangssingularität steht im Einklang mit Einsteins Relativitätstheorie. Wendet man diese Theorie auf kosmologische Fragestellungen an, so zeigt sich, dass sie einen Anfang von Raum und Zeit aus einer Singularität heraus zulässt.

### Das Hubblesche Expansionsgesetz

Hubble fand nicht nur heraus, dass sich die Galaxien von einander entfernen, sondern auch, dass die Fluchtgeschwindigkeit proportional zur Entfernung zunimmt. Das heißt, je größer die Entfernung ist, umso größer ist auch die Fluchtgeschwindigkeit.

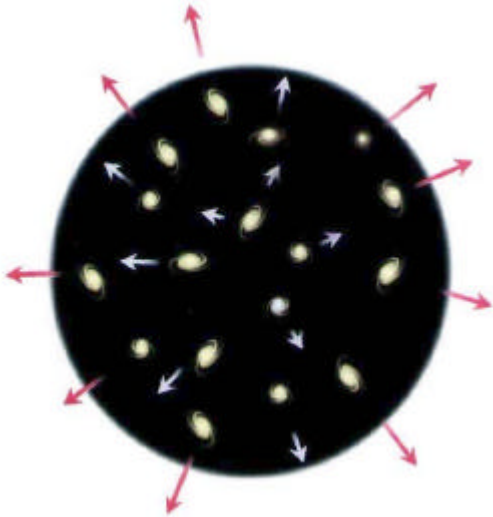


Abbildung 4: So in etwa bewegen sich die Galaxien im und mit dem Raum auseinander. Bildquelle [1]

### Die kosmologische Hintergrundstrahlung im Mikrowellenbereich

Im Jahr 1965 fanden die beiden amerikanischen Physiker Arno Penzias und Robert Wilson einen weiteren Beweis für die Richtigkeit der Urknalltheorie. Sie entdeckten mit Hilfe einer Antenne und einem sehr empfindlichen Mikrowellendetektor etwas, das sie zuerst für eine Störung hielten. Doch egal, in welche Richtung sie mit ihrem Detektor horchten, diese vermeintliche Störung ließ sich nicht beheben. Sie war in allen Richtungen mit gleicher Intensität zu vernehmen. Das bedeutet, dass sie von überall herkommt, ihr Ursprung im Raum ist demnach nicht lokalisierbar. Da Penzias und Wilson sich dies nicht erklären konnten, wandten sie sich an Kosmologen. Sie erfuhren, dass George Gamov schon 1947 diese Hintergrundstrahlung vorhersagte, nachdem er sich näher mit der Urknalltheorie beschäftigt hatte. Er hatte auch die ungefähre Temperatur mit der diese Hintergrundstrahlung eintreffen würde vorhergesagt, sie passte genau auf die Strahlungstemperatur, die Wilson und Penzias entdeckt hatten. Die beiden konnten es nicht glauben, sie hatten den „Nachhall des Urknalls“ entdeckt!

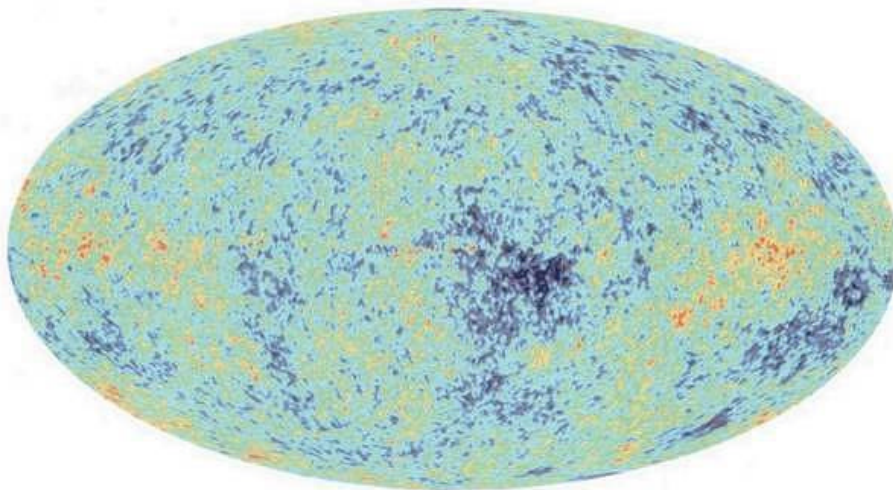


Abbildung 5: Dies ist die bisher genaueste Aufzeichnung der Hintergrundstrahlung. Sie hat eine Temperatur von  $2,725^\circ$  Kelvin. Der Temperaturunterschied zwischen den roten und den blauen Bereichen beträgt maximal  $0,004$  Kelvin. Die unterschiedlichen Temperaturbereiche weisen auf Dichteschwankungen in der Urmaterie hin. Bildquelle: [3]

## Der Urknall



Abbildung 6:  
Zu dieser Zeit (bis  $10^{-43}$   
Sekunden nach dem Urknall)  
herrschten uns unbekannte  
physikalische Gesetze.  
Bildquelle: [2]

Wodurch der Urknall, die Schöpfung von Raum und Zeit, hervorgerufen wurde ist noch unklar, aber, seit diesem Ereignis dehnt sich das Universum sehr gleichmäßig in alle Richtungen aus.



Abbildung 7:  
Alter des Universums:  
 $10^{-43}$  Sekunden  
Temperatur zu dieser Zeit:  
 $10^{32}$  Grad

Auf dieser Abbildung werden  
Quarks als „Q“, Antiquarks als  
„ $\bar{Q}$ “, Elektronen als „e“,  
Positronen als „ $\bar{e}$ “ und  
Strahlungsteilchen als Wellen  
dargestellt. Bildquelle: [2]

Was direkt nach dem Urknall geschah wissen wir nicht. Doch falls es eine „große vereinheitlichende Theorie“ gibt (die die elektromagnetische Kraft, die schwache Kernkraft, die starke Kernkraft und die Gravitationskraft vereinheitlicht) und wir diese jemals herausfinden sollten, dann könnten wir diese auf die erste Phase des Universums kurz nach dem Urknall (bis zu einem Weltalter von  $10^{-43}$  Sekunden) anwenden. Möglicherweise gab es damals nur eine Kraft, die die oben genannten heute wirkenden Kräfte vereinigte. Es ist bis heute gelungen die elektromagnetische Kraft und die schwache Kernkraft zu vereinigen. Es gibt auch Versuche, die starke Kernkraft in Einklang mit den anderen beiden zu bringen, doch da verzeichnete man bisher keine Erfolge, und die Aussichten, die Gravitation noch zusätzlich mit in dieses vereinheitlichende Gesetz einzuflechten, stehen zumindest für die nahe Zukunft sehr schlecht.

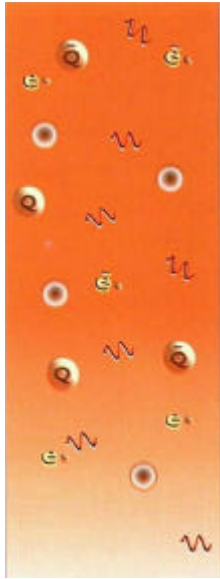


Abbildung 8:  
 Alter des Universums:  
 $10^{-34}$  Sekunden  
 Temperatur zu dieser Zeit:  
 $10^{27}$  Grad

In dieser Abbildung sind zusätzlich zu den Quarks, den Antiquarks, den Protonen, den Elektronen und den Strahlungsteilchen noch die Vernichtungsblitze der Quarks und Antiquarks dargestellt.  
 Bildquelle: [2]

Aber wir wissen, dass nach  $10^{-34}$  Sekunden das damalige Universum von Quarks und Antiquarks dominiert wurde.



Abbildung 9:  
 Alter des Universums:  
 $10^{-10}$  Sekunden  
 Temperatur zu dieser Zeit:  
 $10^{15}$  Grad

Hier sind wieder Quarks, Antiquarks, Protonen und Elektronen abgebildet, aber auch erstmals Neutronen (blau), Protonen (rot) und Mesonen (orange). Der größte Teil dieser Elementarteilchenpaare aus Materie und Antimaterie vernichtet sich gegenseitig. Dabei entstehen weitere Strahlungsteilchen. Da die Materie einen kleinen Überschuss gegenüber der Antimaterie aufweist, ist die Vernichtung nicht vollständig.  
 Bildquelle: [2]

Doch schon  $10^{-10}$  Sekunden nach dem Urknall bildeten sich aus den Quarks und Antiquarks die Protonen, Elektronen, Neutronen und Mesonen.

Wichtig ist es vielleicht, an dieser Stelle zu erwähnen, dass uns diese winzigen Zeitspannen aus der alltäglichen Sichtweise viel zu kurz zu sein scheinen, um maßgeblich die gesamte weitere Entwicklung des Weltalls bestimmen zu können. Doch in diesen ersten Phasen bildete sich aus einer Ursuppe von Teilchenstrahlung und Energie die gesamte atomare Materie für die heute bekannten Strukturen im Weltall. Zu dieser Zeit war das aus unserer Sicht noch winzige Weltall vollständig mit diesen Bestandteilen erfüllt und es barg schon alle erdenklichen Entwicklungsmöglichkeiten, die erst in ferner Zukunft verwirklicht werden sollten. In der weiteren Evolution des Weltalls, mit zunehmender Abkühlung, kondensierte diese Urmaterie zu jenen Bausteinen, aus denen wir und alle andere kondensierte Materie gefügt sind.

So kurz und unwichtig dieser winzige Zustand des Universums uns auch erscheinen mag, alles was wir heute vorfinden, entstand letztlich aus diesem für uns kleinen und erst kurz existierenden Universum.



Abbildung 10:  
Alter des Universums:  
1 Sekunde  
Temperatur zu dieser Zeit:  
 $10^{10}$  Grad

Die Abbildung zeigt Strahlungsteilchen, Elektronen „e“, Protonen und Neutronen, die die Vernichtung sich entsprechender Materie-Antimaterie-Paare überlebt haben. Sie bilden das Ausgangsmaterial für die in der Folge entstehenden Atomkerne und Atome.

Bildquelle: [2]

Als das Universum eine Sekunde alt war, schlossen sich Protonen zu ersten Atomkernen des Wasserstoffs, des Heliums, des Lithiums und des Deuteriums zusammen, wobei das Mengenverhältnis zwischen Wasserstoff, Helium und Deuterium genau 10 Wasserstoffatome auf ein Heliumatom, 30 000 Wasserstoffatome auf ein Deuteriumatom betrug (dies ist auch heute noch der Fall).



Abbildung 11:  
Alter des Universums:  
3 Minuten  
Temperatur zu dieser Zeit:  
 $10^9$  Grad

Hier haben sich die Elektronen aufgrund der zu hohen Temperatur noch nicht an die bisher gebildeten Atomkerne (Wasserstoff, Helium, Lithium, Deuterium) anschließen können.

Bildquelle: [2]

Als unser Universum 3 Minuten alt war, waren Strahlung und Materie immer noch verkoppelt. Das Universum bestand zu diesem Zeitpunkt aus einem heißen Plasma (aus Atomkernen, Elektronen und Strahlungsteilchen).



Abbildung 12:  
 Alter des Universums:  
 379 000 Jahre  
 Temperatur zu dieser Zeit: 3 000  
 Grad

Hier konnten sich aufgrund der abgesunkenen Temperatur die Elektronen mit den Atomkernen zu elektrisch neutralen Atomen zusammenschließen. Die Strahlungsteilchen können sich von nun an frei durch den Raum bewegen. Bildquelle: [2]

Dann geschah ungefähr 379 000 Jahre nichts weiter, als dass sich die auseinander bewegende Materie weiter verdünnte und sich sehr gleichmäßig auf den vorhandenen Raum verteilte. Bis zu jenem Zeitpunkt nach dem Urknall war das Universum undurchsichtig. Doch da sich die Temperatur des Universums mit fortschreitender Expansion abkühlte, konnten sich Elektronen und Atomkerne zu Atomen zusammenschließen. Das hatte zur Folge, dass sich Materie und Strahlung entkoppelten und erst da wurde das Universum durchsichtig. Das erste Licht entstand, und seitdem vagabundiert es durch das Weltall. Aber da sich das Weltall mittlerweile um den tausendfachen Durchmesser vergrößert hat und sich auch die Wellenlänge des Lichts um diesen Faktor vergrößerte, ist dieses erste Licht, für uns heute nicht mehr sichtbar. Die Wellenlängen haben sich so vergrößert, dass es nur noch als unsichtbare Mikrowellenstrahlung existiert.

### **Entstehung der kosmischen Strukturen aus der Inhomogenität der Hintergrundstrahlung**

Durch geringe Unregelmäßigkeiten der Materieverteilung (siehe Abbildung 5) in den frühen Stadien des Universums bewirkte die Schwerkraft, die stets zur Klumpenbildung führt, immer größer werdende Materiehäufungen.



Abbildung 13:  
 Alter des Universums:  
 etwa 200 Millionen Jahre  
 Temperatur zu diesem  
 Zeitpunkt:  
 ca. 300 Grad

Der vergrößerte Bildausschnitt zeigt die ersten entstandenen Sterne in einem der dichteren Bereiche des dargestellten Materienetzes. Bildquelle: [4]

Diese Materiehäufungen hatten sich etwa 200 Millionen Jahre nach dem Urknall so sehr verdichtet, dass sich die ersten Sterne in dem Materienetzwerk, welches den gesamten Raum durchzog, bilden konnten. Diese waren zwar nur sehr kurzlebig, aber außergewöhnlich massereich und sehr hell.



Abbildung 14:  
Alter des Universums:  
1 Milliarde Jahre  
Temperatur zu dieser Zeit:  
etwa 18 Grad Celsius

Wegen der geringen Dichteschwankungen in der frühen Phase des Universums beginnt das Weltall langsam auszuflocken. Es entstehen langlebigere Sterne und erste Galaxien. In den ersten Sternengenerationen werden nun komplexere Atome gebildet. Bildquelle: [2]

Nach etwa 1 Milliarde Jahren bildeten sich aus den in Abbildung 13 dargestellten Materiehäufungen Galaxien und Sterne. Diese Sterne existieren teilweise auch heute noch und sind demnach um vieles langlebiger als ihre Vorgänger.



Abbildung 15:  
Alter des Universums: 13,7  
(+/- 0,2) Milliarden Jahre  
(heutiges Weltalter)  
Temperatur heute:  
ca. -270 Grad Celsius bzw.  
2.725 (+/- 0.002) Kelvin.

Ungefähr so sieht auch unsere Galaxie von weitem aus.  
Bildquelle: [5]

## **Bildung von Galaxienhaufen und großen Leerräumen**

So finden wir das Universum heute vor. Wie bereits erwähnt, liegt unser Planetensystem am Rand unserer Galaxie. Sie ist eine von vielen in der lokalen Galaxiengruppe. Die

verschiedenen Galaxiengruppen wiederum schließen sich zu so genannten Galaxienhaufen, den größten uns bekannten Strukturen im Universum zusammen.

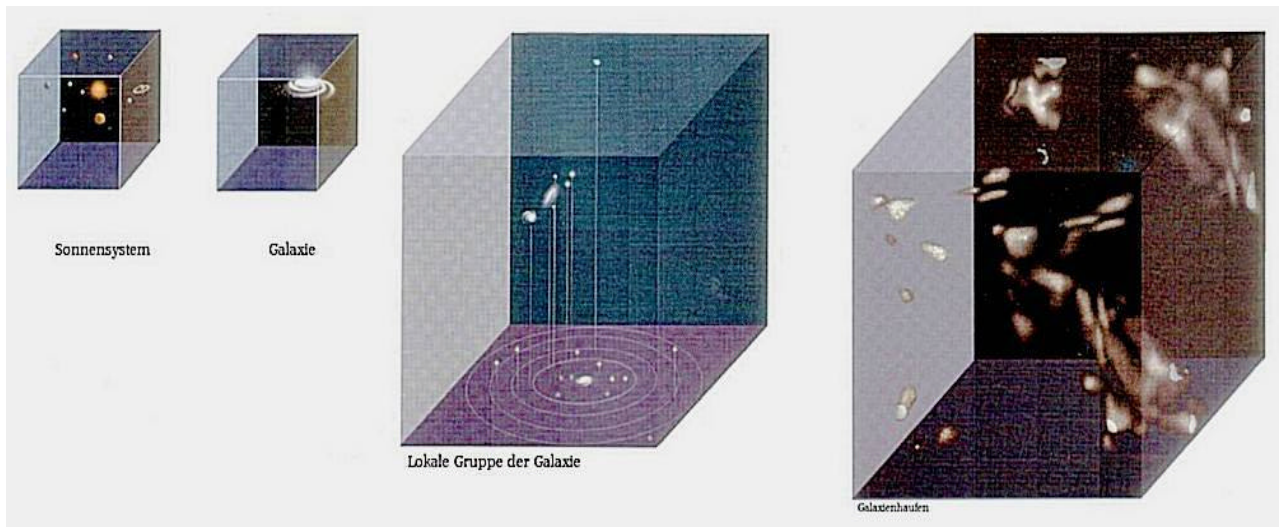


Abbildung 16: Das sind Strukturen die wir heute in unserem Universum vorfinden von unserem „kleinen“ Planetensystem bis hin zu den „großen“ Galaxienhaufen. Bildquelle [2]

### Moderne Entwicklungen in der Kosmologie

Man ist sich sicher, dass die Ereignisse so wie oben geschildert, passiert sind. Viele Fragen lassen sich mit Hilfe des Urknallbildes beantworten. Die moderne Kosmologie beschäftigt sich heute kaum noch damit, ob es zur Urknalltheorie alternative Modelle gibt. Sie versucht, die genaue Dynamik der Galaxienflucht zu ermitteln und beschäftigt sich mit der Frage, wie die Temperaturschwankungen in der Hintergrundstrahlung durch kosmologische Theorien über die Frühphase der Welt erklärt werden können. Sie beschäftigt sich außerdem mit der Frage, wie viel Materie sich insgesamt im beobachtbaren Teil des Weltalls befindet.

So konnte zuletzt die lang diskutierte Frage geklärt werden, ob sich das Weltall ewig ausdehnt oder eines Tages vielleicht wieder in einer Endsingularität zusammenstürzt. Durch die Beobachtung ferner Sternexplosionen, die schwächer sind, als sie es nach den ersten Urknallmodellen sein dürften, weiß man heute, dass seit den Explosionszeitpunkten die Ausdehnungsgeschwindigkeit sich noch gesteigert hat. Das deutet auf eine ewige Expansion hin, weil es keine bekannte Kraft gibt, die stark genug ist die Expansion wieder langsamer verlaufen zulassen, zustoppen oder gar umzukehren. Dieses Expansionsverhalten kann man nicht mehr allein durch einen Mangel an Materie, die den Zusammenhalt bewirkt, erklären, sondern man führt die beschleunigte Expansion auf die Existenz einer seltsamen „Dunklen Energie“ zurück, die die Eigenschaft besitzt, die Ausdehnung des Raumes zu fördern und zu beschleunigen. Die Herkunft dieser Dunklen Energie, die ca. 70% des gesamten Energieinhaltes des Weltalls ausmacht, ist noch völlig ungeklärt. Ebenso ist unbekannt, woraus sich die herkömmliche Materie, die den gewöhnlichen Gravitationskräften unterliegt, zusammensetzt. Der sichtbare und messbare Anteil der Materie (Sterne, Planeten, Gaswolken,...) macht nur ca. 4% des gesamten Energiegehaltes des Universums aus. Etwa 25% entfallen auf die so genannte „Dunkle Energie“, deren Natur ebenfalls völlig ungeklärt ist.

Die „Dunkle Materie“ und die „Dunkle Energie“ haben höchst wahrscheinlich zu der frühen Ausflockung des Universums geführt, welche wir heute beobachten. Damit ist uns nur ein kleiner Anteil (4%) der Gesamtenergie, bzw. –materie des Weltalls bekannt, und nur von diesem Teil können wir die Entstehung und Entwicklung erklären. Doch trotz dieser Tatsache

man doch annehmen, dass die Urknalltheorie so wie wir sie heute aufgestellt haben im Wesentlichen richtig ist. Nach vielen Theorien, die versuchten die Welt, wie sie ist, zu erklären, ist die Urknalltheorie bisher die einzige, die nicht widerlegt werden konnte.

### **Bildquellenverzeichnis**

- [1] <http://havitek.com/astro/>
- [2] Stephen Hawking, Illustrationen aus „Die Kurze Geschichte der Zeit“
- [3] Martin Neumann, Bild zu „Neues vom Rand des Kosmos“ aus „Sterne und Weltraum“ 04/ 03
- [4] Richard B. Larsen und Volker Bromm, Bild zu „Die ersten Sterne im Universum“ aus „Spektrum der Wissenschaft“ 02/ 02
- [5] <http://www.astronomia.de/galaxis.htm>