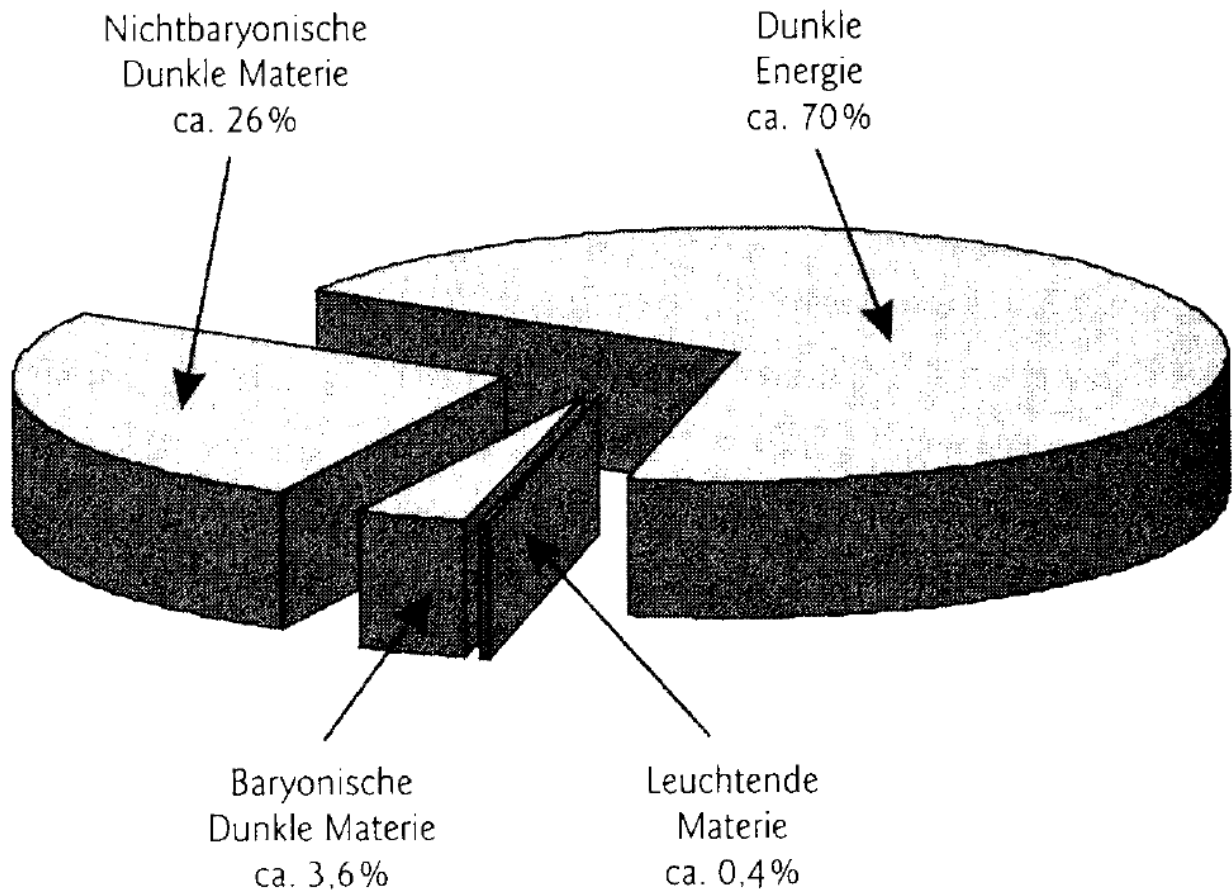


# Evidenz für Dunkle Materie und Dunkle Energie im Weltraum

von  
Andreas Schwarz



Stand: 06.07.2016

<b>0.0 Inhaltsverzeichnis</b>	
<b>1.0 Einleitung .....</b>	<b>3</b>
<b>2.0 Kosmologische Grundlagen.....</b>	<b>4</b>
<b>3.0 Leuchtende und Dunkle Materie .....</b>	<b>6</b>
3.1 Leuchtende Materie.....	6
3.2 Dunkle Materie in den Galaxien .....	6
3.3 Dunkle Materie in den Galaxienhaufen .....	8
<b>4.0 Die Natur der Dunklen Materie.....</b>	<b>9</b>
4.1 Die baryonische Materie .....	9
4.2 Die nichtbaryonische Materie.....	10
<b>5.0 Folgerungen aus der Kosmischen Hintergrundstrahlung.....</b>	<b>11</b>
<b>6.0 Die Dunkle Energie .....</b>	<b>13</b>
<b>7.0 Die Dunkle Materie und Energie in der Kosmologie.....</b>	<b>17</b>
<b>8.0 Alternativen zur Existenz von Dunkler Materie und Energie.....</b>	<b>18</b>
<b>9.0 Zusammenfassung .....</b>	<b>19</b>
<b>10.0 Schlusswort .....</b>	<b>20</b>
<b>11.0 Literaturangaben.....</b>	<b>21</b>

## 1.0 Die Einleitung

Aus dem Fragment 125 des altgriechischen Gelehrten Demokrit stammt folgender Satz: „Scheinbar ist Farbe, scheinbar Süßigkeit, scheinbar Bitterkeit: wirklich nur Atome und Leeres.“ Gut 2500 Jahre später müssen wir feststellen, dass wir nur einen kleinen Bruchteil unserer Wirklichkeit überhaupt kennen und dass vieles, was wir erkennen können, nur die scheinbare Abbildung einer uns noch unbekanntem Wirklichkeit ist. Die Dunkle Materie und die Dunkle Energie machen mit Anteilen von etwa 26 und 70 Prozent den Großteil des Existierenden aus. Die Natur von 96 Prozent des Existierenden bleibt uns bisher verborgen. Nur 4 Prozent bestehen aus den uns bekannten Atomen bzw. Teilchen des Standardmodells, zu denen auch die Bestandteile der Atome (Elektronen, Protonen, Neutronen) oder die Photonen als Träger der elektromagnetischen Wechselwirkung gehören. Die von den astronomischen bzw. kosmischen Objekten ausgesandte elektromagnetische Strahlung ist die Hauptbeobachtungsgrundlage, welche im gesamten Spektrum dieser Strahlung erfolgt. Dieses Spektrum umfasst den Radiobereich, Mikrowellenbereich, Infrarotbereich, Optischen Bereich, Ultraviolett Bereich, Röntgenbereich und den Gammastrahlenbereich. Grundlage dieser Beobachtungsmöglichkeiten ist die elektromagnetische Wechselwirkung, also die Wechselwirkung zwischen Materie und Strahlung. Neben der elektromagnetischen Strahlung erreicht uns auch eine Teilchenstrahlung aus dem Weltraum, die sogenannte Kosmische Strahlung. Sie besteht zum größten Teil aus Protonen und Alpha-Teilchen (Heliumatomkerne). Doch auch massenreichere Atomkerne und Elektronen sind mit einem geringen Anteil vertreten.

Eine weitere Beobachtungsmöglichkeit ist indirekter Natur. Grundlage hierfür ist die gravitative Wechselwirkung. Zwischen Materieteilchen wirkt die gravitative Wechselwirkung als anziehende Kraft, die auch für die Bewegungszustände der Materieteilchen bzw. Materiezusammenballungen verantwortlich ist. Anhand der Bewegungen von Planeten, Sternen und Galaxien können wir auf ihre Masse oder auf noch unbekanntem Objekte schließen.

Beobachtungen auf Grundlage der gravitativen Wechselwirkung zeigen jedoch, dass mehr Materie vorhanden sein muss, als in Galaxien oder Galaxienhaufen zu sehen ist. Diese Materie wechselwirkt ausschließlich nur durch die Gravitation miteinander und nicht durch elektromagnetische Strahlung. Die Folge ist, dass wir die Materie zwar wegen ihrer Masse durch die Gravitationswirkung auf andere sichtbare Objekte nachweisen können, sie jedoch wegen ihrer fehlenden Wechselwirkung mit der elektromagnetischen Strahlung nicht sehen können. Deshalb sprechen wir in diesem Fall von Dunkler Materie, die rund 85 % der gesamten Materie ausmacht. In der kosmischen Energiebilanz klafft allerdings noch eine gewaltige Lücke, denn die Materie insgesamt liefert nur einen Anteil von rund 30 %. Die anderen 70 % scheinen sich nur durch eine sogenannte Dunkle Energie erklären zu lassen. Diese Dunkle Energie lässt sich auch nur indirekt nachweisen. Sie hat eine beschleunigende Wirkung auf die kosmische Ausdehnung des Universums. Das Universum dehnt sich heute schneller als in der Vergangenheit aus, was der Vergleich der Leuchtkräfte von Supernovae-Ia-Ereignissen in Abhängigkeit von ihrer Entfernung und damit auch vom Alter des Universums zeigt.

Trotz des vielen Unbekannten über die Natur des Existierenden möchte ich auf Basis unseres bisherigen Wissens- und Forschungsstandes etwas Licht ins Dunkle bringen.

## 2.0 Kosmologische Grundlagen

Die Dunkle Materie und die Dunkle Energie haben vor allem in der Kosmologie eine große Bedeutung, so dass ich zunächst einen Einblick in die kosmologischen Grundlagen geben möchte.

Im Rahmen von kosmologischen Modellen wird versucht, theoretische Modelle bzw. Überlegungen mit der astronomischen Beobachtung in Einklang zu bringen. Die Grundsäulen der Standardmodelle sind die Beobachtung des Astronomen Edwin Hubble im Jahre 1929, dass sich alle fernen Galaxien als Folge der Expansion des Universums von uns wegbewegen, und die von Arno Penzias und Robert Wilson im Jahre 1964 entdeckte Kosmische Hintergrundstrahlung.

Die Kosmische Hintergrundstrahlung liegt im Mikrowellenbereich und entspricht der Temperatur eines schwarzen Strahlers von 2,71 Kelvin. Die durch die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien nachgewiesene Expansion des Universums deutet auf einen dichteren Urzustand hin. Auch die in der Vergangenheit komprimierte Strahlung war in den früheren Epochen heißer als heute. Das alles lässt darauf schließen, dass die kosmische Entwicklung in einem heißen, dichten Frühzustand begonnen hat, in dessen Gluthitze die Sterne und Galaxien noch nicht bestehen konnten, sondern in dem alles in einem Gemisch aus Materieteilchen und Strahlung aufgelöst war. Mit diesem sogenannten Urknallmodell als Standardmodell der Kosmologie lässt sich die Entwicklung des Universums am besten beschreiben. Seine mathematische Darstellung findet es in einfachen Lösungen der Einstein'schen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, die im Wesentlichen eine Gravitationstheorie ist. Diese Lösungen passen hervorragend zu den vielen, teilweisen recht präzisen Beobachtungen. Die Expansion des Universums wird in diesem Modell als das Auseinanderfließen einer gleichmäßig verteilten Materie aufgefasst, die durch homogene Dichte  $\rho(t)$  und Druck  $p(t)$  beschrieben wird. Die Flüssigkeitsteilchen, die wir uns in diesem Modell repräsentativ für die Galaxien denken können, schwimmen in der sich ausdehnenden kosmischen Materie. Dabei vergrößert sich ihr Abstand proportional zu einer Funktion der Zeit, dem sogenannten Expansionsfaktor  $R(t)$ . Je nach der Dichte des Universums kann die Expansion immer weitergehen oder kehrt sich um, nachdem sie ein Maximum erreicht hat. Im Übergangsbereich der beiden Möglichkeiten, bei einer bestimmten kritischen Dichte, kommt die Expansion erst nach unendlich langer Zeit zum Stillstand.

Bild 1: Die Kurven zeigen die zeitliche Änderung der Abstände zwischen den Galaxien, die proportional zum Weltradius  $R(t)$  sind.

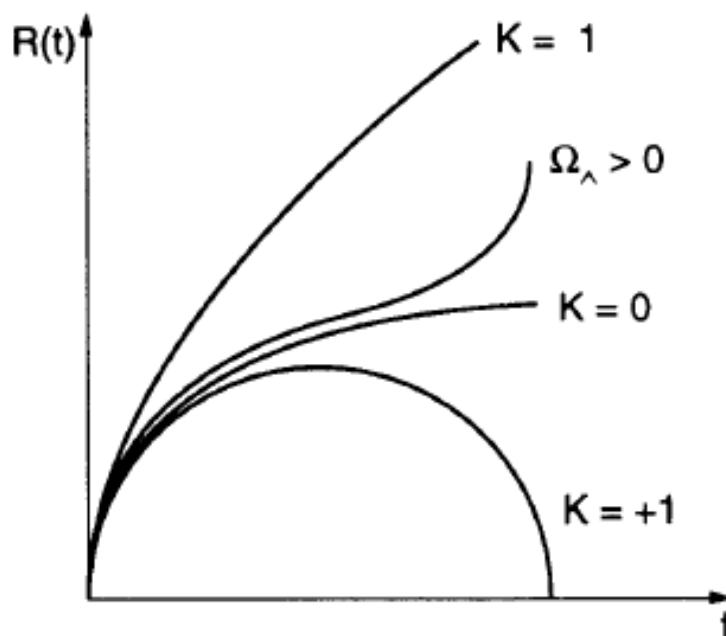


Bild 1: Der Verlauf hängt ab von der mittleren Dichte und Energie. Wenn  $\Omega_{\text{tot}}$  kleiner als eins ist, wächst  $R(t)$  ständig an; für  $\Omega_{\text{tot}}$  größer oder gleich eins gibt es ständige Expansion (für größer als

Null), wie auch die Möglichkeit eines Endkollapses für  $\Omega = 0$ . Die Messungen deuten darauf hin, dass die Kurve mit  $\Omega > 0$  für unsere Welt maßgebend ist.

Die heutigen Modelle gehen davon aus, dass die Gesamtdichte des Universums der kritischen Dichte entspricht bzw. sehr nahe ist. Diese Annahme wird durch Beobachtungen von weit entfernten Supernovae von Typ Ia gestützt. Die Rate der Expansion ist durch den sogenannte Hubble-Parameter  $H_0$  gegeben, der im Modell dem Ausdruck  $(dR/dt)/R(t)$  zur jetzigen Zeit  $t_0$  gleich ist, und welcher im System der auseinanderstrebenden Galaxien die Beziehung zwischen der Rotverschiebung  $z$  und der Entfernung  $d$  festlegt:

$$c \cdot z = H_0 \cdot d$$

Wobei das Produkt  $c \cdot z$  die Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien darstellt:

$$v = c \cdot z$$

Das unterschiedliche Verhalten von  $R(t)$  wird durch die Energiedichte von Materie, Strahlung und anderer vielleicht vorhandener Komponenten festgelegt. Diese Energiedichte bezeichnen wir mit  $\rho_0$ . In der Praxis wird diese Dichte besser als dimensionslose Größe  $\Omega_0$  angegeben:

$$\Omega_0 = 8\pi G\rho_0 / (3 H_0^2)$$

Dieser Dichteparameter  $\Omega_0$  ist mit Hilfe des Hubble-Parameters  $H_0$  konstruiert.  $G$  ist die Gravitationskonstante.

Für die kritische Dichte ergibt sich folgende Beziehung:

$$\rho_c = 3H_0^2 / (8\pi G)$$

Zur Gesamtdichte tragen aber nicht nur die Massen der vorhandenen Materie bei, sondern auch jede Form von Energie. Insgesamt lassen sich diese verschiedenen Komponenten zu einer Gesamtdichte  $\Omega$  addieren, wobei jede Komponente als Bruchteil der kritischen Dichte angegeben wird. Die vorhandene überall konstante Energiedichte wird als kosmologische Konstante  $\Omega_\Lambda$  bezeichnet. Ursprünglich hatte Albert Einstein diese Konstante in seinen Gleichungen eingefügt, um ein statisches Universum zu erhalten. Nachdem Hubble 1929 gezeigt hatte, dass das Universum nicht statisch ist, tilgte Albert Einstein diese kosmologische Konstante und bezeichnete deren Einführung als größte Eselei seines Lebens.

Eine positive kosmologische Konstante wirkt der Gravitationskraft entgegen, bzw. führt zu einer beschleunigten Expansion des Universums. Mittlerweile wird die kosmologische Konstante benötigt, um die fehlenden 70 % der Gesamtenergiedichte des Universums zu beschreiben: Die sogenannte Dunkle Energie. Die Gesamtbilanz sieht wie folgt aus:

$$\Omega = \Omega_M + \Omega_\Lambda = 0,3 + 0,7 = 1$$

wobei  $\Omega_M$  sich wiederum in die Komponenten dunkle baryonische Materie  $\Omega_B$ , nichtbaryonische Dunkle Materie  $\Omega_N$  und leuchtende baryonische Materie  $\Omega_S$  aufteilen:

$$\Omega_M = \Omega_S + \Omega_B + \Omega_N = 0,004 + 0,036 + 0,26$$

### 3.0 Leuchtende und dunkle Materie

Wir können zur Unterscheidung von leuchtender Materie und Dunkler Materie im engeren Sinn folgende zwei Definitionen verwenden:

Leuchtende Materie unterliegt der gravitativen und der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Dunkle Materie im engeren Sinn unterliegt der gravitativen Wechselwirkung und nicht der elektromagnetischen Wechselwirkung. Die schwache und die starke Wechselwirkung lassen wir bei der Definition außer acht. So unterliegt zum Beispiel auch die Dunkle Materie der schwachen Wechselwirkung.

Wenn wir hier von Dunkler Materie im engeren sprechen, dann nur deshalb, weil der Dunklen Materie zum Teil auch sehr leuchtschwache Objekte zugeordnet werden, wie zum Beispiel die Braunen Zwerge. Diese lassen sich oft nur indirekt über ihren gravitativen Einfluss auf leuchtstärkere Objekte nachweisen. D.h. Experimentell lassen sie sich nicht anders nachweisen als Dunkle Materie im engeren Sinn.

#### 3.1 Die leuchtende Materie

Das Licht im sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung wird von den Sternen ausgesandt. In unserer Milchstraße (Galaxis) befinden sich zirka 300 Milliarden Sterne. In einigen nahe gelegenen Galaxien und in unserer Galaxis können wir die Sterne mit unserer derzeitigen Beobachtungstechnik noch als Einzelobjekte beobachten. In weiter entfernten Galaxien ist das nicht mehr möglich, so dass sie nur noch als diffuse Lichtschimmer erscheinen. Doch auch dieses Licht wird noch sehr effizient von unseren Teleskopen eingefangen, bis hin zu sehr schwachen Quellen. Durch Messung der Strahlungsintensität der einzelnen Galaxien und deren anschließenden Aufsummierung kann auf die gesamte Strahlungsenergie geschlossen werden.

Nach der Abschätzung des Raumbereiches, aus dem die Strahlungsquellen stammen, kann auf das räumliche Volumen geschlossen werden, aus dem die Strahlung stammt. So kann die Strahlungsleistung pro Volumen angegeben werden. Am besten geht dies, wenn zu den Positionen der Galaxien am Himmel auch ihre Entfernung bekannt ist. Durch Messung der Rotverschiebung bestimmen wir über das Hubble'sches Gesetz die Entfernung.

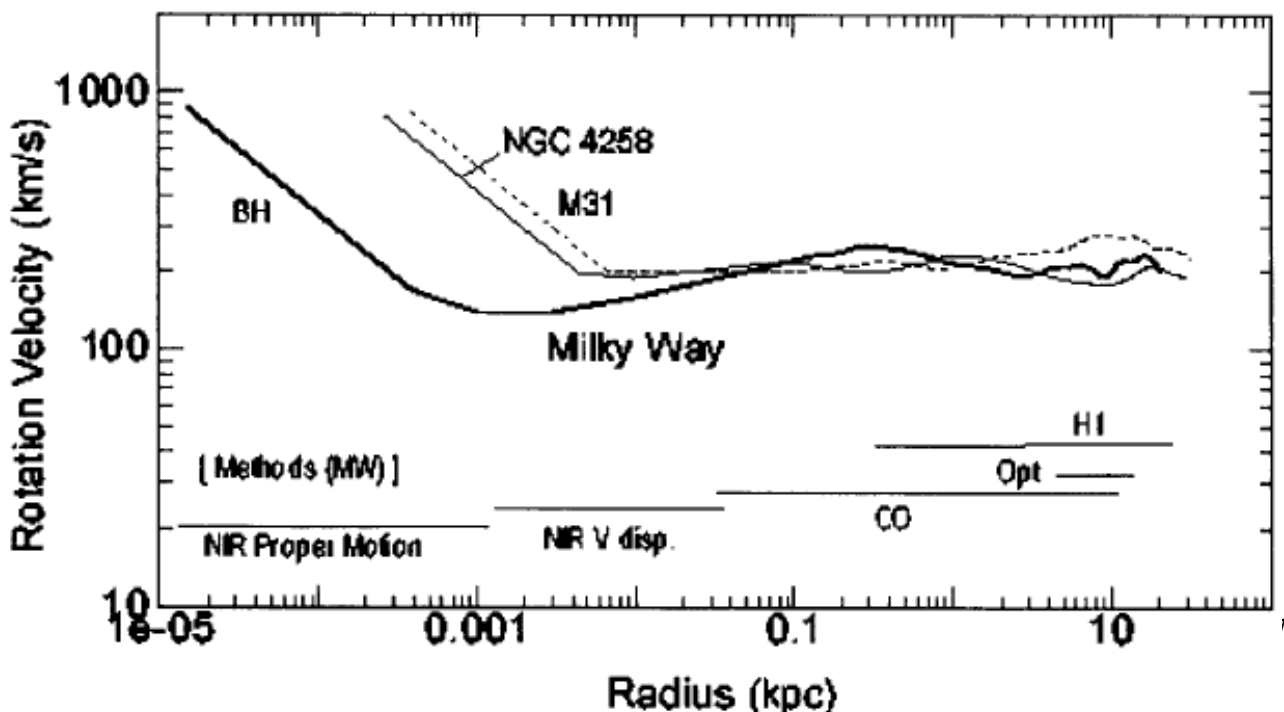
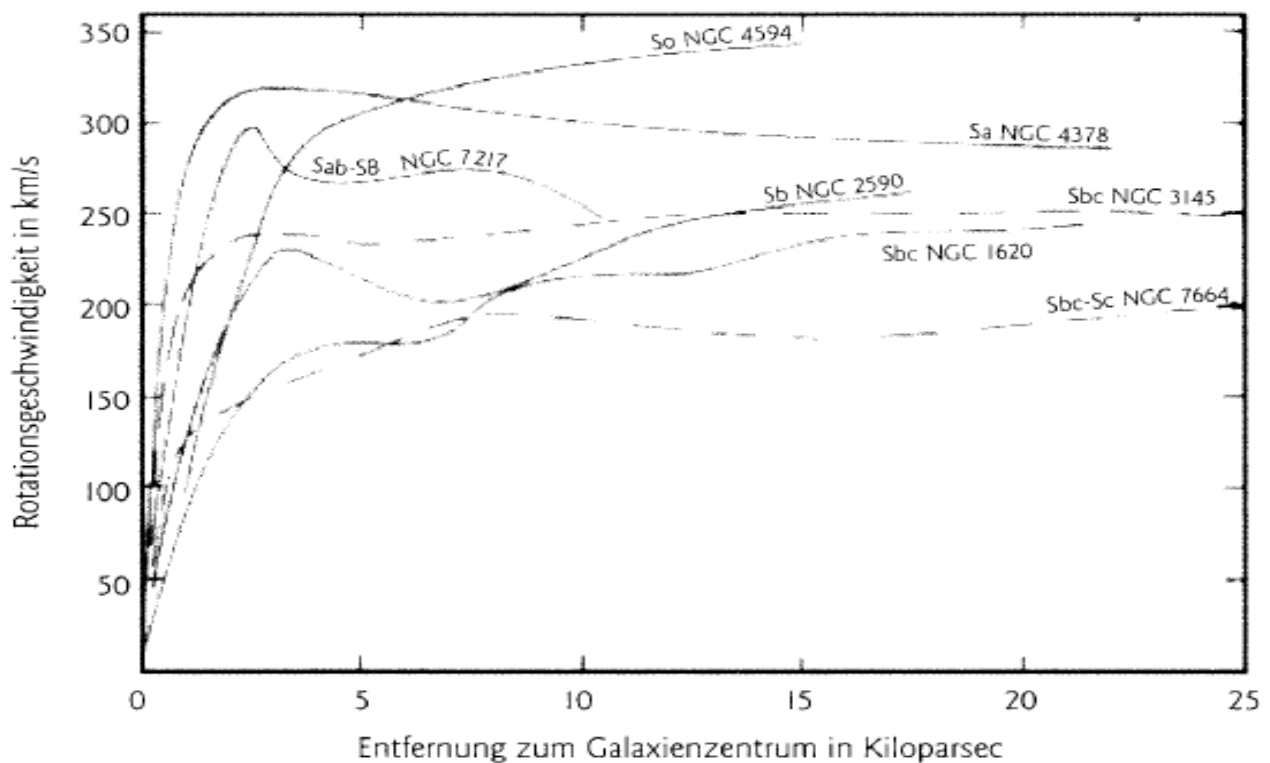
Damit kennen wir dieses räumliche Volumen. In einem weiteren Schritt müssen wir die Masse mit der Strahlung in Beziehung bringen, um die Massendichte zu finden. Dies geschieht durch die sogenannte Massen-Leuchtkraft-Beziehung. Ein Stern mit einer bestimmten Masse hat in der Regel eine bestimmte Leuchtkraft. In der Regel ist die Leuchtkraft eines Sterns in dritter Potenz zu seiner Masse proportional. Durch Beobachtung der Sterne in der Sonnenumgebung wissen wir, wie viele Sterne es ungefähr in einem bestimmten Massenbereich gibt.

Es gibt sehr viele Sterne mit kleiner Masse und nur wenige mit großer Masse. Die Sterne mit großer Masse verbrauchen ihre Energie sehr schnell und existieren daher auch nur sehr kurzzeitig. Diese Tatsache können wir auch quantitativ angeben, durch das Verhältnis von Masse ( $M$ ) und Leuchtkraft ( $L$ ) der Sterne:  $M/L$ . Wir finden einen Wert von  $M/L = 7$ , wenn wir die Masse der Sterne in Einheiten der Sonnenmasse und die Leuchtkraft der Sterne in Einheiten der Sonnenleuchtkraft angeben. Multipliziert mit der Energiedichte der Strahlung erhalten wir die mittlere Massendichte der leuchtenden Materie. Sie beträgt nach Berechnungen auf Grund der Beobachtungsdaten 0,04 % der kritischen Dichte und nur zirka 13 % der gesamten Materie. Leuchtende Materie besteht aus baryonischer Materie, also aus Atomkernen bzw. Atomen. Die Atomkerne setzen sich aus Protonen und Neutronen und diese sich wiederum aus Quarks zusammen. Der Begriff baryonische Materie wird in der Kosmologie allgemein für die uns bekannte Materie verwendet, welche aus Atomen zusammengesetzt. Streng genommen bezeichnet der Begriff „Baryonen“ nur die schweren Teilchen, z.B. die Atomkerne. Die leichten Teilchen, etwa die Elektronen, werden als Leptonen bezeichnet. Doch hier steht baryonische Materie für die aus Atomen zusammengesetzte gewöhnliche Materie.

### 3.2 Dunkle Materie in Galaxien

In den Spiralgalaxien sind die Sterne in einer flachen Scheibe angeordnet, die um das Zentrum rotiert. Die Rotationsgeschwindigkeiten wurden in Abhängigkeit von den Abständen zum Zentrum der Galaxien sehr genau vermessen. Es zeigt sich, dass die Masse der Galaxien nicht wie die leuchtende Materie im Zentrum konzentriert ist, sondern dass es noch eine große nichtleuchtende Materiekomponente gibt.

Diese nichtleuchtende Materie erstreckt sich viel weiter als die leuchtende Materie und macht sich ausschließlich durch ihren gravitativen Einfluss auf die Rotationsgeschwindigkeiten bemerkbar. Diese Rotationsgeschwindigkeiten müssten nachdem sie einen Maximalwert erreicht haben mit steigendem Abstand vom Zentrum kleiner werden und durch die keplerschen Gesetze beschrieben werden können.



Bilder 2 und 3: Die Rotationsgeschwindigkeiten in verschiedenen Spiralgalaxien sind als Funktion des Abstands vom Zentrum aufgetragen. Die konstante Geschwindigkeit für den wachsenden Abstand zeigt an, dass die Materie in diesen Galaxien nicht wie das Licht im Zentrum konzentriert ist. Eine Galaxie ist in einem sphärischen Halo aus Dunkler Materie eingebettet, welcher deutlich größer als die Abmessungen der Galaxien ist.

Tatsächlich sinken die Rotationsgeschwindigkeiten mit steigenden Abstand zum Zentrum nicht auf die Werte, die zu erwarten wären, wenn die Masse der Galaxie ausschließlich aus der zu beobachteten leuchtende Materie bestehen würde, sondern bleiben relativ konstant. Auch in den elliptischen Galaxien, die hauptsächlich aus älteren Sternen bestehen und wenig interstellare Materie beinhalten, wurden in den irregulären Geschwindigkeiten der Sterne Hinweise auf Dunkle Materie gefunden. Das daraus folgende Masse-Leuchtkraft-Verhältnis von Galaxien liegt bei  $M/L = 20$  und ist damit dreimal größer als das von den Sternen. Diese Differenz der Masse-Leuchtkraft-Verhältnisse lässt sich nur durch die Präsenz von nichtleuchtender Dunkler Materie erklären. Zur Verteilung der Dunklen Materie im Bereich der Galaxien lässt sich folgendes aussagen: eine Galaxie ist in einem sphärischen Halo aus Dunkler Materie eingebettet, welcher deutlich größer als die Abmessungen der Galaxien ist.

Die Masse der Galaxien trägt damit insgesamt etwas mehr zur Dichte des Universums bei, sie erreicht ungefähr 1,5 % der kritischen Dichte.

### 3.3 Dunkle Materie in Galaxienhaufen

Die Beobachtung der Galaxienverteilung am Himmel zeigt, dass sich Galaxien gravitativ aneinander binden und sogenannte Galaxienhaufen bilden. Die typische Größe eines Galaxienhaufens liegt bei zirka 3 Mpc. Diese Galaxienhaufen eignen sich besonders gut, um noch mehr von der kosmischen Masse in die Bilanz einzubringen. Die beobachteten Geschwindigkeiten der Galaxien in den Haufen sind allerdings so groß, dass sie eigentlich die gravitative Bindung durch die Masse der leuchtenden Materie überwinden müssten und sich daher der Haufen auflösen müsste. Nur durch die Annahme eines Massenbeitrages durch die Dunkle Materie ist zu erklären, dass die Galaxienhaufen stabil sind. Für eine ganze Reihe von Galaxienhaufen wurde durch Vermessung der Geschwindigkeiten eine Massebilanz aufgestellt, die dazu zwingt, einen hohen Anteil an Dunkler Materie für diese Objekte zu akzeptieren. Die Masse der Dunklen Materie der einzelnen Galaxien, die diese in einem sphärischen Halo umgeben, reicht bei weitem nicht aus, die Masse der Dunklen Materie in Galaxienhaufen zu erklären. Das Masse-Leuchtkraft-Verhältnis in Galaxienhaufen liegt bei etwa  $M/L = 200$ . Dieses Resultat wird auch durch weitere Beobachtungen bestätigt. Mit Satelliten kann eine starke Röntgenstrahlung der Galaxienhaufen gemessen werden. Diese stammt von einem 100 Millionen Kelvin heißen Gas, das sich zwischen den Galaxien befindet. Damit dieses Gas nicht aus dem Haufen verdampft, muss es durch die gravitative Kraft der Dunklen Materie gebunden werden. Die dazu nötige Masse führt ebenfalls auf ein Masse-Leuchtkraft-Verhältnis von  $M/L = 200$ . Vielen Galaxienhaufen wirken als Gravitationslinsen, die das Licht von weiter entfernten Galaxien ablenken. Das Bild wird durch den Gravitationslinseneffekt charakteristisch verzerrt. Die Art der Verzerrung erlaubt Rückschlüsse auf die Massenverteilung innerhalb der Galaxienhaufen. Auch diese Beobachtungen führen zu einem Masse-Leuchtkraft-Verhältnis von  $M/L = 200$ . Insgesamt addiert sich der Anteil der Materiedichte damit zu 15 % der kritischen Dichte des Universums. Dabei können die Unsicherheiten allerdings beachtlich sein. Heute gehen wir davon aus, dass die Materie einen Anteil von zirka 30 % der kritischen Dichte erreicht.



## 4.0 Die Natur der Dunklen Materie

Was wir über Dunkle Materie wissen ist, dass sie größtenteils aus nichtbaryonischer Materie besteht. Nichtbaryonischer Materie unterliegt fast nur der gravitativen Wechselwirkung und außerdem der schwachen Wechselwirkung.

Ein kleiner Teil der Dunklen Materie besteht allerdings auch aus baryonischer Materie, die allen vier Wechselwirkungen unterliegt.

### 4.1 Die baryonische Materie

Die baryonische Materie besteht aus Atomkernen bzw. aus Protonen und Neutronen. Aus dieser Materie sind die Sonne und die Planeten aufgebaut. Zu der dunklen baryonischen Materie zählen die sogenannten Schwarzen Löcher. Diese entstehen am Ende einer Sternentwicklung durch eine Supernovaexplosion, wenn die Masse des Sterns am Ende seiner Entwicklung bei ungefähr 3,2 Sonnenmassen liegt. Der Stern fällt in sich zusammen und unterschreitet dabei den sogenannten Schwarzschildradius, an dem die Fluchtgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit ist. Elektromagnetische Strahlung kann dieses Schwarze Loch nicht mehr verlassen, so dass dieses nur durch seine gravitative Wirkung auf sichtbarer Materie oder indirekt nachzuweisen ist.

So kann durch ein Schwarzes Loch ein Gravitationslinseneffekt hervorgerufen werden. Hat ein Schwarzes Loch einen sichtbaren Begleiter, kann über diesen die Masse des unsichtbaren Partners abgeschätzt werden. Aus der Abschätzung der Masse des unsichtbaren Begleiters kann wiederum darauf geschlossen werden, ob es sich um ein Schwarzes Loch handelt oder nicht. Materie bildet, bevor sie in das Schwarze Loch stürzt, eine sehr heiße Akkretionsscheibe, die Röntgenstrahlung aussendet. In den Zentren der Galaxien befinden sich darüber hinaus sogenannte Supermassiven Schwarzen Löcher, welche Massen von mehreren Hunderttausend bis mehrere Zehnmilliarden Sonnenmassen haben. Ihre Entstehung ist derzeit noch nicht geklärt, doch dürften sie bei der Entstehung der Galaxien entstanden sein. Die Schwarzen Löcher können allein die vorhandene dunkle baryonische Materie noch nicht erklären. Es muss noch andere astronomische oder kosmologische Objekte geben, die unter dem Begriff „Massive Compact Halo Objects“, kurz MACHOs zusammengefasst werden. Zu diesen Kandidaten gehören insbesondere die leuchtschwachen Roten Zwerge. Kleine Zwergsterne sind wesentlich häufiger als große Sterne. Aber auch Braune Zwerge, Weiße Zwerge, Schwarze Zwerge und dunkle Galaxien gehören zu den MACHOs. Sterne, welche am Ende ihres Lebens aus nicht mehr als 1,3 Sonnenmassen bestehen, enden als weiße Zwergsterne. Diese erzeugen keine Energie mehr durch Kernfusion und bestehen im Wesentlichen aus entartetem Elektronengas. Nachdem sie ausgekühlt sind werden sie zu Schwarzen Zwergen. Braune Sterne sind Objekte, die eine Masse von 0,002 bis 0,08 Sonnenmassen haben und damit 13- bis 75-mal schwerer sind als der Jupiter. In Braunen Zwergen reicht die Masse nicht aus, um durch Kontraktion genügend hohe Temperaturen für die Fusion von Wasserstoff zu Helium zu erzeugen. Lediglich das Deuteriumbrennen ist in diesem Massenbereich möglich, was sie von einem Planeten abgrenzt. Das Deuteriumbrennen liefert jedoch nicht wie das Wasserstoffbrennen ausreichend Energie um als Stern zu scheinen, was die Braunen Zwerge damit auch von den Sternen abgrenzt. Ein weiterer MACHO-Kandidat ist der Neutronenstern. Sterne am Ende ihres Lebens, welche ungefähr zwischen dem 1,3fachen und dem 3,2fachen der Sonnenmasse haben, werden zu Neutronensternen. Im Gegensatz zur Massengrenze zwischen einem Weißen Zwerg und einem Neutronenstern (1,3 Sonnenmassen, Chandrasekhar-Grenze) lässt sich die Massengrenze zwischen einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch derzeit noch nicht exakt bestimmen. Neutronensterne entstehen in einer Supernovaexplosion, wobei das Sternzentrum in sich zusammenfällt und die Elektronen mit den Protonen zu Neutronen reagieren. Dadurch erreicht das Objekt einen stabilen Gleichgewichtszustand, der ihn vor einem weiteren Gravitationskollaps bewahrt.

MACHOs können in der Regel nicht direkt beobachtet werden. Ein wichtiges Verfahren sie aufzuspüren beruht auf dem Gravitationslinseneffekt. Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie

wird der Raum durch Materie bzw. deren Massen lokal gekrümmt. Bei großen Massen ist diese Krümmung viel stärker, so dass Licht von entfernten Objekten abgelenkt wird und sie entsprechend verzerrt erscheinen. Die Wahrscheinlichkeit eines Gravitationslinseneffekts ist recht gering, so dass wir dazu viele Millionen Sterne gleichzeitig beobachten müssen.

Innerhalb von drei Jahren haben wir nur zehn entsprechende Ereignisse registriert. Das führt zu dem Schluss, dass der Anteil der MACHOs an der Halomasse unserer Milchstraße 30 bis 80 % betragen könnte. Allerdings hat die Methode den Nachteil, dass sie nur für entsprechende Massen ausgelegt ist. Ist die Masse zu klein, ist der Effekt nicht mehr messbar. Deshalb sollten sich Neutronensterne, Weiße Zwerge und Rote Zwerge durch enorme Gasmengen in ihrer Umgebung nachweisen lassen, welche vom sterbenden Stern in den Raum geblasen wurden. Davon ist allerdings auch nichts zu finden, so dass die Diskrepanz von dem, was erwartet wird und was vorgefunden wird, bisher nicht aufgelöst werden kann.

## 4.2 Die nichtbaryonische Dunkle Materie

Die Natur der nichtbaryonischen Dunklen Materie ist weitgehend unbekannt. Die einzigen experimentell nachgewiesenen Vertreter dieser Spezies sind die Neutrinos, langlebige Elementarteilchen mit sehr geringer Masse, die der schwachen Wechselwirkung und der gravitativen Wechselwirkung unterliegen. Sie entstehen durch den Beta-Zerfall, fliegen fast mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum und wechselwirken fast überhaupt nicht mit der sichtbaren Materie. Die Neutrinos leisten allerdings nur einen unbedeutenden Beitrag zur kosmischen Materiedichte. Diese Art der Dunklen Materie, welche sich mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegt, wird als Heiße Dunkle Materie bezeichnet. Ein Großteil der Dunklen Materie liegt jedoch als sogenannte Kalte Dunkle Materie vor und bewegt sich höchstens mit einer Geschwindigkeit von ein paar Prozent der Lichtgeschwindigkeit.

Wir gehen davon aus, dass noch weitere Teilchen die Ursache für die Dunkle Materie sein könnten. Diese Teilchen sollen sehr große Massen haben und sich nur mit ein paar Prozent der Lichtgeschwindigkeit bewegen. Nach einer Theorie soll nämlich zu jedem Elementarteilchen der uns vertrauten Materie (Standardmodell der Elementarteilchenphysik) ein supersymmetrisches und sehr schweres Teilchen (SUSY-Teilchen) existieren. Sie sollen nur der gravitativen und der schwachen Wechselwirkung unterliegen. Daher werden sie auch als „Weakly Interacting Massive Particle“ (kurz „WIMP“) bezeichnet. Für diese These ist eine Erweiterung des Standardmodells der Elementarteilchenphysik notwendig, was auch aus anderen Gründen favorisiert wird. Zur Unterscheidung zwischen den Teilchen des Standardmodells und den SUSY-Teilchen werden letztere mit der Endung „ino“ versehen. Das entsprechende SUSY-Teilchen zum Photon heißt dann Photino, das entsprechende zum Neutron heißt Neutralino usw. Diese Teilchen könnten im früheren Universum entstanden sein, also im Bruchteil der ersten Sekunden nach dem Urknall. Zu dieser Zeit war die Energiedichte im Kosmos noch enorm hoch und die vier Wechselwirkungen waren noch untrennbar in einer einzigen Wechselwirkung, der sogenannten supersymmetrischen Wechselwirkung zusammengeschlossen.

Der Theorie zufolge ist die Lebensdauer dieser Teilchen recht klein, so dass die meisten von ihnen zerfallen sein sollten. Zuerst verschwanden die Teilchen mit der größten Masse, weil diese Teilchen nur bei entsprechenden Energiedichten entstehen. Mit wachsender Ausdehnung und Abkühlung des Universums nahm dann die Energiedichte stetig ab, und es verschwanden sukzessive immer leichtere Teilchen. In unserem relativ kalten Universum von niedriger Energiedichte dürften sich daher lediglich solche SUSY-Teilchen erhalten haben, deren Massen  $100 \text{ GeV}/c^2$  nicht wesentlich übersteigen, was einer Masse von 100 Protonen entspricht.

Obwohl die Reaktionswahrscheinlichkeiten zwischen SUSY-Teilchen und normaler Materie außerordentlich gering ist, gibt es experimentelle Möglichkeiten sie nachzuweisen. Diese beruhen auf der Hoffnung, dass sich hin und wieder doch ein Zusammenprall mit einem Atom normaler Materie ereignet. Wenn wir bedenken, dass auch in unserer Milchstraße der Raum zwischen den Sternen mit einem Neutralinogas erfüllt sein müsste und unsere Erde mit einer Geschwindigkeit von

etwa 220 Kilometern pro Sekunde durch das Neutralinogas fliegt, dann sollte eine Fläche von einem Quadratmeter je Sekunde etwa von einer Millionen Neutralinos durchdrungen werden. Mittlerweile haben wir die Wechselwirkung zwischen Neutralinos und normaler Materie genauer untersucht. Theoretisch könnten demnach pro Tag und Kilogramm normaler Materie zwischen 0,0001 und 0,1 Zusammenstöße passieren, was für die moderne Messtechnik eigentlich kein Problem sein sollte. Das Problem liegt vielmehr beim Detektormaterial selbst und bei der Kosmischen Strahlung, welcher die Erde fortwährend ausgesetzt ist.

Bereits eine geringfügige Verunreinigung des Detektors mit radioaktiven Elementen führt nämlich dazu, dass die beim Zerfall frei werdende Gammastrahlung das erhoffte Signal einer Kollision zwischen einem Neutralino und einem Atomkern um das Millionenfache übertrifft.

Zusätzlich dazu kommen noch die Signale der Partikel der Kosmischen Strahlung, was noch einmal zu einer Steigerung um das Millionenfache führt. Messungen sind daher nur tief unter der Erde mit ultrareinem Detektormaterial möglich. Eine der Methoden, die Wechselwirkung zwischen einem Neutralino und einem Atomkern nachzuweisen, beruht darauf, bei der Kollision die Auswirkungen des Rückstoßes auf den getroffenen Kern zu beobachten. Um das machen zu können muss ein Kristall fast bis auf den absoluten Nullpunkt abgekühlt werden, damit sich die Atome im Kristall nicht mehr bewegen können. Wenn ein Neutralino auf einen Kern des Kristalls trifft, wird dieser aus einer Ruhelage verschoben und beginnt im Kristallgitter zu schwingen. Das führt zu einer geringen Erwärmung in der Umgebung des Kernes, die gut gemessen werden kann.

Diese Methode wird auch bei einem Experiment angewendet, das im Eis der Antarktis durchgeführt wird. Dort ersetzt die dicke Eisschicht den Kristall als Detektor. Mit einer anderen Technik zielen wir auf die Elektronen im Kristall. Da der getroffene Kern aufgrund seiner ruckartigen Bewegung diese geladenen Elektronen aus den benachbarten Atomen herausschlägt, fließt in dem Halbleiterdetektor ein schwacher, aber sehr gut messbarer Strom. Dieser zeigt den Treffer eines Neutralinos an. Fangen die durch den Stoß ionisierten Kerne wieder ein Elektron ein, wird ein charakteristisches Photon emittiert, das gut mit Hilfe eines Photonenmultipliers zu beobachten ist. Schließlich gibt es noch die Möglichkeit, Protonen oder Elektronen auf annähernde Lichtgeschwindigkeit zu beschleunigen und frontal aufeinander prallen zu lassen. Bei dieser Kollision der hochenergetischen Teilchen entstehen zwei keulenförmige Schwärme aus schweren Teilchen und Antiteilchen, sogenannte Jets die senkrecht zur Flugbahn der zusammenstoßenden Protonen in entgegengesetzte Richtungen davon streben. Ist in einem dieser Teilchenstrahlen ein Neutralino dabei, so trägt es einen Teil der ursprünglichen Teilchenimpulse davon.

Aus Gründen der Impulserhaltung muss dieser Anteil durch den Impuls eines der anderen Teilchen oder mehrerer Teilchen kompensiert werden. Diese Tatsache kann zum indirekten Nachweis der SUSY-Teilchen genutzt werden. Bisher ist es jedoch nicht gelungen eines dieser Teilchen nachzuweisen.

## **5.0 Folgerungen aus der Kosmischen Hintergrundstrahlung**

Betrachten wir die Friedmann-Lemaître-Modelle (Kosmische Modelle auf Basis der Allgemeinen Relativitätstheorie) für den Zeitraum bis zur sogenannten Rekombinationsphase, die zirka 400 000 Jahre nach dem Urknall begann. Dabei zeigt sich, dass viele hochenergetische Photonen die Vereinigung von Elektronen mit Atomkernen verhinderten. Dies war noch der Fall bei einer Rotverschiebung von etwa  $z = 1100$ , als die mittlere Strahlungstemperatur etwa 3000 Kelvin betrug. Die Materie bestand zu diesem Zeitpunkt aus einem ziemlich gleichförmigen heißen Plasma. Sterne und Galaxien gab es zu diesem Zeitpunkt noch nicht. Doch bei der weiteren Abkühlung als Folge der Expansion entstanden allmählich erste Strukturen. Bei Temperaturen von unter 3000 Kelvin begann die sogenannte Rekombinationsphase, bei der sich die Elektronen mit den Atomkernen vereinigten und das Universum durchsichtig wurde. Schon vor dieser Rekombinationsphase hatten sich in der Dunklen Materie erste schwach ausgeprägte Massenkonzentrationen gebildet. Das eng verkoppelte Plasma aus Photonen und Baryonen folgte dieser Kondensation, doch der Druck der Photonen verhinderte eine Zusammenballung der Baryonen. Die Plasmawolken wurden dadurch

wieder auseinander getrieben. Im Widerstreit der Kräfte begannen die Plasmawolken zu schwingen. Diese Schwingungen sind mit Schallwellen vergleichbar. Die größte der schwingenden Plasmawolke war gerade bis zur Rekombinationszeit von 40.000 Jahren einmal von einer solchen Schallwelle durchlaufen worden. Noch größere Wolken konnten keinen Gegendruck aufbauen und folgten der Schwerkraft. Kleinere Wolken oszillierten mit höherer Frequenz. Alle Schwingungen waren in Phase, perfekt synchronisiert durch den Urknall. Bei der Kontraktion und Verdichtung wurde das Photonengas heißer, bei der Verdünnung und beim Auseinanderlaufen wurde es kühler. Diese Temperaturschwankungen lassen sich als Kosinusfunktion darstellen und müssten sich auch in der Kosmischen Hintergrundstrahlung als Schwankungen ihrer Intensität nachweisen lassen. Tatsächlich haben schon 1992 Messungen mit dem NASA-Satelliten COBE Schwankungen in Form kalter und weniger kalter Flecken in der Kosmischen Hintergrundstrahlung gezeigt. Die Schwankungen liegen in einer Größenordnung von  $\Delta T/T = 0,00001$ . Ohne die Hilfe der Dunklen Materie, die schon vor der Rekombinationsphase Massenkonzentrationen bildete, wären keine Sterne und Galaxien entstanden.

Durch Ballonexperimente (Boomerang und Maxima) ist bereits ein großer Himmelsausschnitt kartographisch erfasst worden. Die Messresultate befinden sich im folgenden Bild.

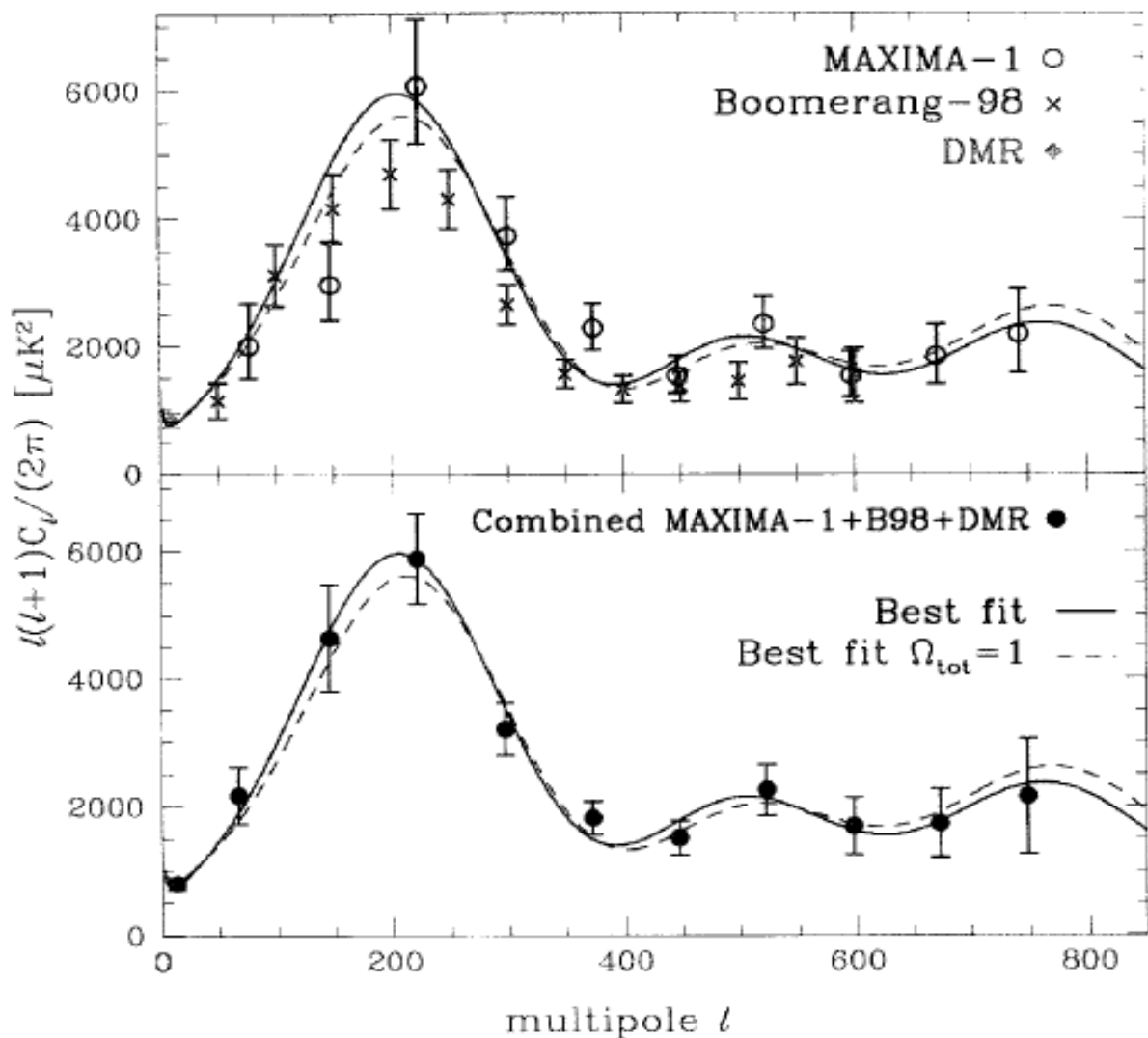


Bild 4: Hier wird das Messergebnis des Boomerang-Experiments gezeigt. Die Quadrate der mittleren Temperaturschwankungen (in Einheiten von Millionstel Kelvin zum Quadrat) sind als Funktion des Winkels dargestellt ( $l$  ist die Zahl, die das Multipolmoment bezeichnet;  $l = 200$  entspricht etwa  $1^\circ$ ). Das ausgeprägte Maximum bei  $l = 200$  deutet darauf hin, dass der Raum keine Krümmung hat ( $\Omega = 1$ ).

## 6.0 Dunkle Energie

Die sichtbare und die Dunkle Materie erreichen nur einen Anteil von rund 30 % der kritischen Dichte. Rund 70 % bestehen nicht aus Materie, sondern müssen eine unbekannte Form von Energie sein. Die Natur dieser sogenannten Dunklen Energie ist noch völlig unbekannt. Ebenso wie die Dunkle Materie lässt sich die Dunkle Energie nur indirekt aufgrund ihrer Wirkung nachweisen. Diese Dunkle Energie führt zu einer Beschleunigung der Expansion des Universums, im Gegensatz zu den Massen des Universums, die Aufgrund ihrer gravitativen Wirkung die Expansion abbremsen. Was genau hinter der Dunklen Energie steckt ist unbekannt, doch könnte die Quantentheorie eine Deutung dieser Größe als Energie des Vakuums liefern. Der leere Raum ist, quantentheoretisch betrachtet, ein sehr komplexes Gebilde, durchzogen von einem Geflecht aus fluktuierenden Feldern, die zwar nicht beobachtet werden können, die aber zu einer Energie des Grundzustandes beitragen. Diese Energie könnte einen Druck aufbauen, welcher der Gravitation entgegenwirkt und zu einer beschleunigten Ausdehnung des Raumes führt. Allerdings liefert die Quantentheorie bisher theoretische Werte für diese Energie, die nicht mit der Beobachtung übereinstimmen. Eine andere Deutung für diese Dunkle Energie ist die Wirkung eines Skalarfeldes, welches als Quintessenz bezeichnet wird. Zu diesem Skalarfeld gehören extrem leichte Elementarteilchen, mit etwa  $10^{-82}$  Elektronenmassen. Auch die Stringtheorien könnten eine mögliche Deutung für die Dunkle Energie liefern. Nach den Stringtheorien besteht das Universum aus mehr als vier Dimensionen. Auf große Skalen im Raum wird die Gravitation nach diesen Theorien schwächer, so dass sich der Raum schneller ausdehnt. Mit Hilfe der Stringtheorien wird versucht eine Theorie zu finden, welche die Allgemeine Relativitätstheorie und die Quantentheorie umfasst. Dieses Ziel der großen Vereinheitlichung in der Physik konnte bisher nicht erreicht werden, dürfte jedoch für theoretische Deutung der Dunklen Energie eine wichtige Voraussetzung sein. Weitere Deutungen für die Dunkle Energie sind topologische Effekte und sogenannte Phantomenergien. Bei den topologischen Effekten kommt es zu Fehlstellen aufgrund einer spontanen Symmetriebrechung. Die Theorie über die Phantom-Energie wurde im Jahre 2003 aufgestellt. Nach dieser Theorie würde das Universum nach etwa  $10^{50}$  Jahren zerreißen, und auch sämtliche Teilchen darin. Das würde sich nach dieser Theorie bereits durch ultraenergetische Teilchen in der Kosmischen Strahlung bemerkbar machen, welche allerdings bisher nicht beobachtet wurden. Wir können bisher nur ein Fazit ziehen: Bis heute ist uns die Natur dieser Dunklen Energie völlig unbekannt. Wir wissen nur, dass irgendetwas zu einer beschleunigten Ausdehnung des Universums führt und haben diesem die Bezeichnung Dunkle Energie gegeben. Die beschleunigte Ausdehnung des Universums können wir jedoch nachweisen.

Ausgehend von der Tatsache, dass die Gesamtdichte des Universums konstant ist und in etwa der kritischen Dichte entspricht, muss sich das Verhältnis zwischen der Massendichte und der Energiedichte zeitlich ändern. Früher, als das Universum noch deutlich kleiner war, überwog die Massendichte. Mit der Ausdehnung nahm die Massendichte immer mehr ab und die Energiedichte immer mehr zu. Dies hatte zur Folge, dass das Universum zunächst gebremst expandierte. Diese gebremste Expansion ging dann im Laufe der Zeit in eine beschleunigte Expansion über. Mit Hilfe der Rotverschiebung von weit entfernten Objekten kann diese Tatsache nachgewiesen werden, denn mit zunehmender Entfernung gucken wir immer weiter in die Vergangenheit des Universums. Das Licht der weit entfernten Objekte empfangen wir mit einer charakteristischen Rotverschiebung. Das hängt damit zusammen, dass sich das Universum von dem Augenblick, an dem das Licht das Objekt verlassen hat, bis zu dem Moment wo es bei uns ankommt, ausgedehnt hat. Dadurch wird die Wellenlänge des Lichts gedehnt, sie wird größer und in den roten Wellenlängenbereich des elektromagnetischen Spektrums verschoben. Mit Hilfe der Rotverschiebung  $z$  lässt sich die Entfernung des Objektes  $d$  durch folgende Gleichung berechnen:

$$z = H \cdot d / c$$

$z$  gibt auch über die Geschwindigkeit des Objektes Auskunft, mit dem es sich aufgrund der

Expansion des Universums von uns entfernt:

$$z = v / c$$

Für größere  $z$  müssen wir relativistisch rechnen, weil wir sonst mit der klassischen Formel für große  $z$  die Lichtgeschwindigkeit  $v = c$  erreichen würden. Dies wollen wir jedoch an dieser Stelle nicht weiter ausführen.

Um jetzt zu erkennen, ob wir in einem beschleunigten Universum leben, benötigen wir ein so genanntes Hubble-Diagramm. In diesem Diagramm wird die Entfernung  $d$  eines Objektes gegen seine Fluchtgeschwindigkeit  $v$  bzw. Rotverschiebung  $z$  aufgetragen. Die Fluchtgeschwindigkeit  $v$  ist mit der Entfernung  $d$  des Objektes über den Hubble-Parameter  $H$  durch folgende Gleichung verknüpft:

$$v = H \cdot d$$

In einem sich gleichmäßig ausdehnenden Universum hat der Hubble-Parameter  $H$  zu allen Zeiten den gleichen Wert und ist konstant.  $v$  ist direkt proportional zu  $d$  und damit liegen alle Objekte im Hubble-Diagramm auf einer Geraden.

In einem gebremst expandierenden Universum war jedoch dessen Expansionsgeschwindigkeit in der Vergangenheit größer. Das hat zur Folge, dass auch der Hubble-Parameter früher größer war als heute. Folglich war auch die Fluchtgeschwindigkeit bei gleicher Entfernung ebenfalls größer, und im Hubble-Diagramm liegende Objekte des gebremst expandierenden Universums nicht mehr auf, sondern unterhalb der Geraden, die für das gleichmäßig expandierende Universum gilt. In einem beschleunigten Universum verhält sich der Sachverhalt natürlich genau umgekehrt. Aus dem Hubble-Diagramm können wir ablesen, um welchen Typ von Universum es sich handelt. Da die Abweichung von dieser Geraden erst bei sehr weit entfernten Objekten deutlich wird, muss nach leuchtstarken weit entfernten Objekten gesucht werden. Dies ist allerdings nicht so einfach, da es nur wenige Objekte gibt, die in einer solch großen Entfernung noch sichtbar sind. Es gibt jedoch eine spezielle Klasse von Objekten die hierfür geeignet sind: Die Supernovae von Typ Ia (SN1a).

Diese Objekte haben eine sehr große Leuchtkraft und sind sogar heller als die gesamte Galaxie selbst, in der sie auftauchen. Vor allem haben alle Supernovae vom Typ Ia die gleiche Leuchtkraft. Das hängt mit ihrem Entstehungsmechanismus zusammen. Ausgangspunkt für diese Art von Supernovae ist ein Weißer Zwerg, der einen massenreichen nahen Begleiter hat. Von diesem Begleiter strömt Masse auf den Weißen Zwerg, bis dieser die Chandrasekhar-Grenze von 1,3 Sonnenmassen erreicht. In diesem Moment kommt es zu einem stellaren Kollaps, welcher zur Supernova von Typ Ia führt. Dieser läuft aufgrund der scharfen Massen- bzw. Chandrasekhar-Grenze immer gleich und mit gleichen Leuchtkrafteigenschaften ab. Die Supernova vom Typ Ia hat eine charakteristische Lichtkurve, die im Zusammenhang mit ihrer absoluten Leuchtkraft steht. Je langsamer die Helligkeit abfällt, desto größer ist ihre absolute Leuchtkraft. Mit Hilfe der scheinbaren Leuchtkraft kann dann ihre Entfernung berechnet werden. Dieser Wert für die Entfernung  $d$  wird dann im Hubble-Diagramm gegen die Rotverschiebung  $z$  aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass alle Punkte oberhalb der Geraden für ein gleichmäßiges expandierendes Universum lagen. Damit konnte gezeigt werden, dass wir uns in einem beschleunigt expandierenden Universum befinden. Die Art der Beschleunigung lässt sich am besten durch die Annahme einer Dunklen Energie erklären, die im heutigen Universum 70 % der gesamten Masse und Energie des Universums ausmacht.

Die folgenden zwei Graphiken (Bilder 5 und 6) zeigen die Größe des Universums in Abhängigkeit von der Zeit und der sich zeitlich ändernden Verhältnisse von Massendichte und Energiedichte.

Die dritte Graphik (Bild 7) zeigt die Helligkeit eines Objektes in Abhängigkeit von seiner Fluchtgeschwindigkeit bzw. seiner Rotverschiebung. Weicht sie nach oben von der Geraden ab, die für ein konstant expandierendes Universum steht, handelt es sich um ein beschleunigtes expandierendes Universum. Weicht sie nach unten von der Geraden ab, handelt es sich um eine gebremste Expansion.

Bilder 5 und 6:

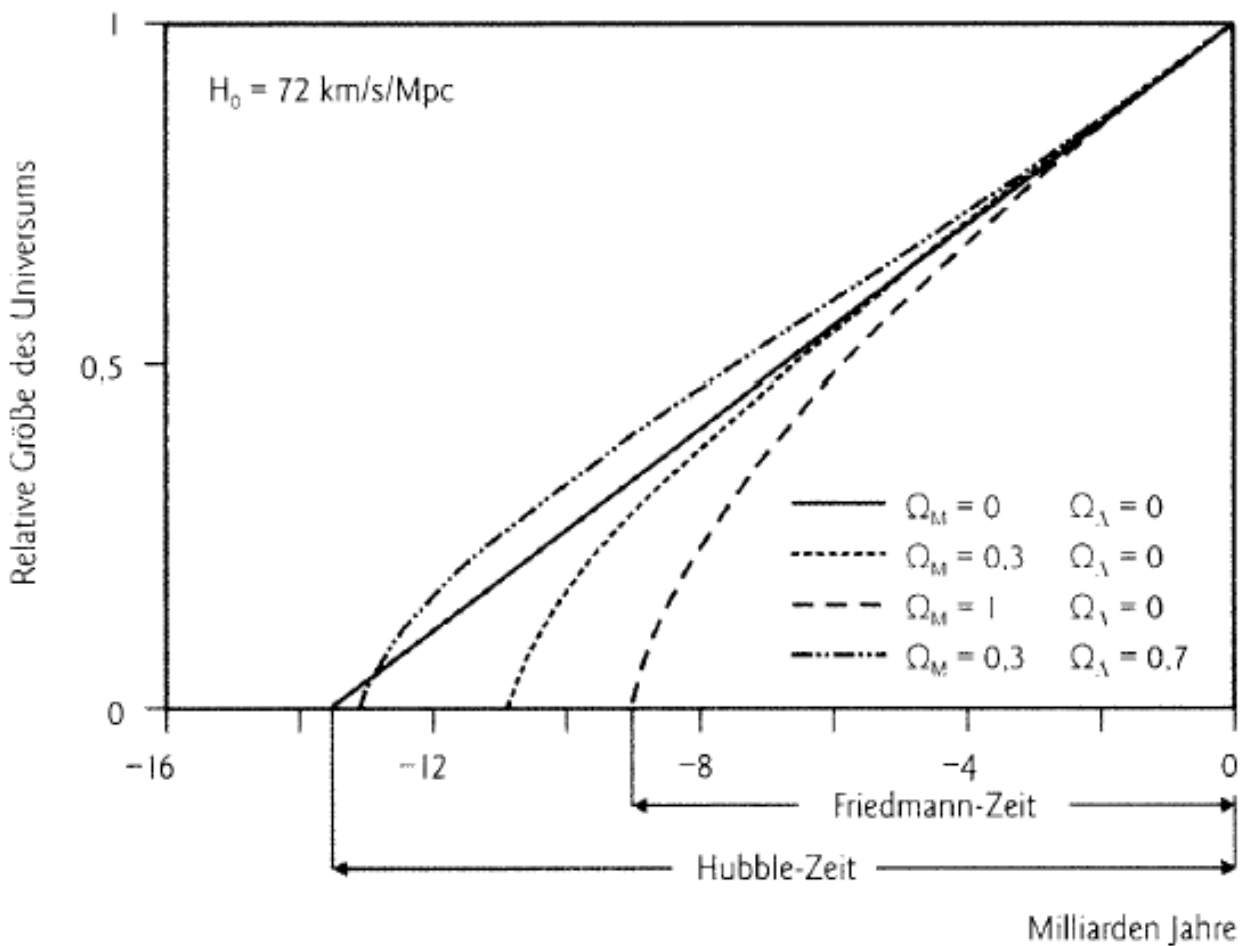
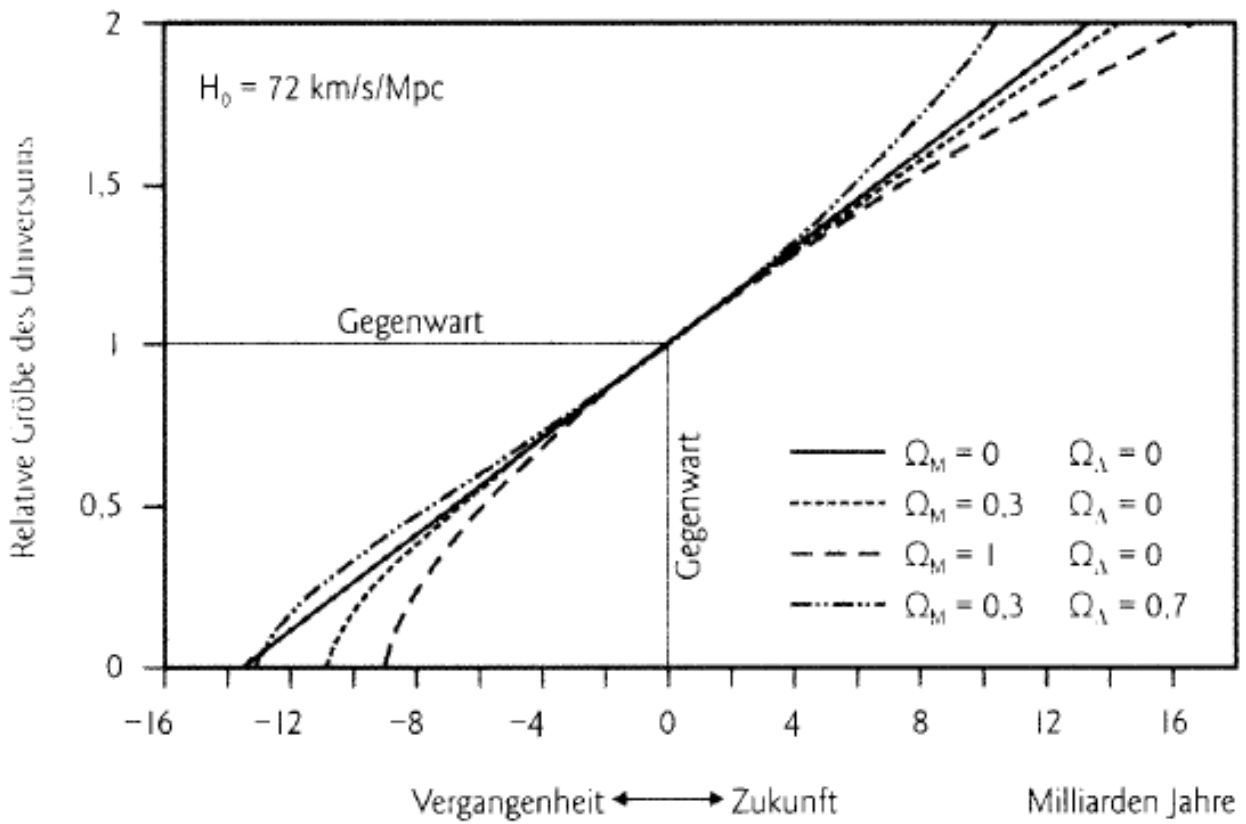
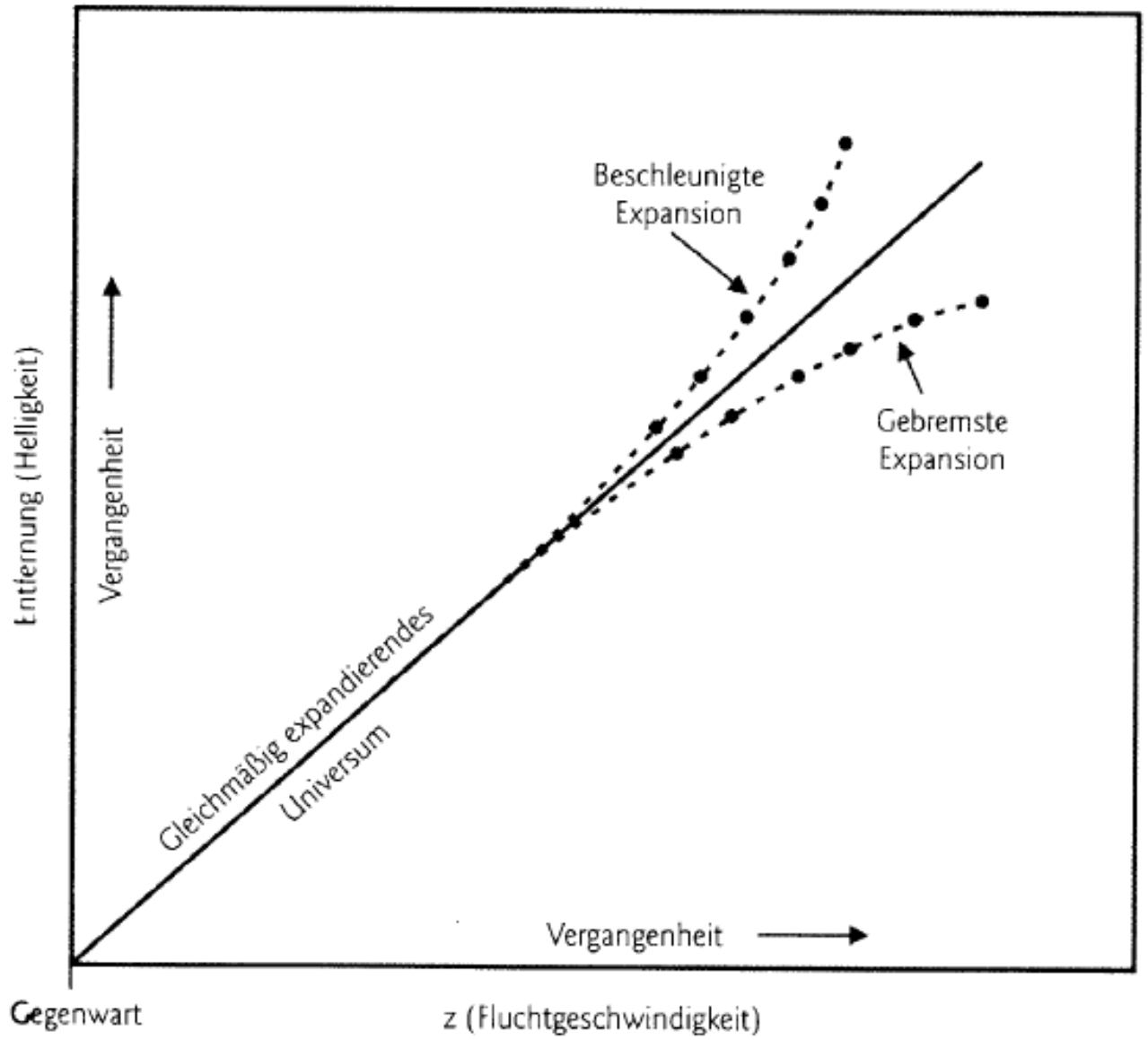


Bild 7:





## 7.0 Dunkle Materie und Energie in der Kosmologie

Wir benötigen heute Dunkle Materie und Energie, um die Dynamik von kosmischen Objekten und die Strukturen im Universum zu erklären. Die moderne Kosmologie versucht die heutigen Strukturen im Universum und die darin befindliche Verteilung der Materie auf die Anfangszustände im sehr jungen Universum zurückzuführen. Die heutigen Strukturen im Universum sind nach Auffassung der Kosmologie durch kleine Gravitationsinstabilitäten in der Anfangszeit entstanden. In der Anfangszeit des Universums hat es kleine Unregelmäßigkeiten in der Materieverteilung gegeben. Die Gebiete mit höherer Materiedichte übten eine stärkere Gravitationskraft aus als Gebiete mit einer geringeren Dichte und zogen so zusätzlich Materie an. Dies führte zu einem Anwachsen der Masse und der Gravitation an Stellen mit höherer Materiedichte. Daraus entwickelten sich im Ergebnis dann die Sterne, Galaxien und Galaxienhaufen. Die tatsächlichen Vorgänge sind allerdings wesentlich komplizierter. Zunächst sagt die These über die Gravitationsinstabilitäten noch nichts über deren Ursprung aus. Der Ursprung der Unregelmäßigkeiten in der Materieverteilung dürfte quantenmechanischer Natur sein. Aufgrund der quantenmechanischen Unschärferelation (Orts- und Impulsunschärfe; Energie und Zeitunschärfe) gibt es keinen leeren Raum, sondern es kommt im scheinbar leeren zu sogenannten Quantenfluktuationen. Im Rahmen eines von der Unschärferelation gegebenen sehr kleinen Zeitintervalls entstehen und verschwinden Teilchen im Raum. Hier entstanden sehr kleine Unregelmäßigkeiten, die an sich aufgrund ihrer kleinen Längen- und Zeitskalen keine weiteren Wirkungen gehabt hätten. Doch kam es nach Auffassung der modernen Kosmologie kurz nach dem Urknall zur sogenannten Inflationsphase. Im Rahmen der Inflationsphase dehnte sich das Universum blitzartig aus. Ohne diese These könnte nicht erklärt werden, warum die Kosmische Hintergrundstrahlung nahezu perfekt isotrop ist. Aufgrund der großen Entfernungen und der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit dürfte es keinen kausalen Zusammenhang zwischen der Kosmischen Hintergrundstrahlung aus den verschiedenen Richtungen geben. Doch scheint es aufgrund der Isotropie der Kosmischen Hintergrundstrahlung einen kausalen Zusammenhang gegeben haben zu müssen. Vor der Inflationsphase befand sich die Ausdehnung des Universums noch auf kleinen Längen- und Zeitskalen und der kausale Zusammenhang war gegeben. Dann dehnte sich das Universum aufgrund der Inflationsphase blitzartig auf große Längenskalen aus und die Isotropie der Kosmischen Hintergrundstrahlung blieb erhalten. Mit dieser blitzartigen Ausdehnung wurden auch die anfänglich kleinen Quantenfluktuationen mitgerissen und ausgedehnt. Während sich manche Fluktuationen noch ausdehnen, entstehen auch neue Fluktuationen, welche sich wiederum selbst mit der Expansion des Universums weiter ausdehnen. Am Ende der Inflationsphase gab es kleine Unregelmäßigkeiten in der Materieverteilung in einer großen Vielfalt und auf verschiedenen Längenskalen. Auf diese anfänglichen und kleinen Unregelmäßigkeiten wirkte dann die oben beschriebene Gravitationsinstabilität verstärkend, so dass es im Ergebnis zur Herausbildung der heutigen Strukturen im Universum und der uns bekannten Verteilung der Materie kam. Hier wird deutlich, inwieweit die Quantenmechanik auch in die Kosmologie hineinwirkt. Die heutigen Strukturen im Universum haben ihren Ursprung in Quantenfluktuationen, welche durch kosmische Effekte verstärkt wurden und zur Bildung der uns bekannten Strukturen im Universum führten. Die Ursache für die Inflationsphase, die blitzartige Ausdehnung des Universums, dürfte ebenfalls die Dunkle Energie gewesen sein. Ohne diese Dunkle Energie bzw. die Inflationsphase hätten sich aus den Quantenfluktuationen keine dauerhaften Strukturen bilden können. Allerdings reicht die Masse der baryonische Materie nicht aus, um Gravitationsinstabilitäten mit entsprechender Wirkung für die zukünftige Strukturbildung im Universum zu erzeugen. Vielmehr bedarf es hierfür einer noch größeren Gravitationskraft, die wiederum noch mehr vorhandene Materie voraussetzt. Im Ergebnis lässt sich das nur durch die bestehende Annahme der Existenz von Dunkler Materie erklären. Die baryonische Materie, die in Sternen, Galaxien und Galaxienhaufen sichtbar ist, dürfte den durch Dunkle Materie geschaffenen Strukturen im Raum gefolgt sein. Die Keime für die Bildung von Sternen, Galaxien und Galaxienhaufen dürften daher aus Dunkler Materie bestanden haben. Doch nicht jede Art von

Dunkler Materie ist für die bekannte Strukturbildung im Universum geeignet. Heiße Dunkle Materie bewegt sich mit relativistischer Geschwindigkeit. In diesem Fall hätten sich erst die großen Strukturen im Universum, die Galaxienhaufen und die Galaxien bilden können. Dann erst hätte es zur Herausbildung von Sternen und Sternhaufen kommen können. Kleinere Strukturen wären aufgrund der relativistischen Geschwindigkeit der Heißen Dunklen Materie wieder auseinander gesprengt worden. Tatsächlich lässt sich aus den Beobachtungen ableiten, dass die Strukturbildung im Universum von kleineren Strukturen hin zu den größeren erfolgte. So haben sich erst Sterne, Sternhaufen und Galaxien gebildet. Erst dann kam es zur Bildung von Galaxienhaufen. Neutrinos, welche als einzig bekannte Vertreter der Heißen Dunklen Materie gelten, spielen für die Strukturbildung im Universum keine Rolle. Die Kalte Dunkle Materie, deren Natur uns noch unbekannt ist, führt zu der Herausbildung der uns bekannten Strukturen im Universum, wobei sich die kleineren Strukturen zuerst und diese sich weiter zu größeren Strukturen entwickelt haben. Kalte Dunkle Materie bewegt sich nur mit kleinen nichtrelativistischen Geschwindigkeiten, so dass diese als Keimzellen für die Herausbildung von kleinen Strukturen im Universum geeignet sind. Im Ergebnis kann festgehalten werden: Ohne die Existenz von Dunkler Materie und Energie kann die heute bekannte Struktur des Universums und die uns bekannte Verteilung der Materie nicht plausibel erklärt werden. Diese Feststellung kann ebenfalls als Evidenz für Dunkle Materie und Energie angesehen werden.

## **8.0 Alternativen zur Annahme der Existenz von Dunkler Materie und Energie**

Wir kennen weder die Natur der Dunklen Materie noch die der Dunklen Energie. Dunkle Materie macht sich ausschließlich indirekt über ihre Gravitationswirkung auf leuchtende, baryonische Materie bemerkbar. Bei der Dunklen Energie ist das nicht anders. Wir wissen nur, dass irgendetwas zu einer nachweislich beschleunigten Ausdehnung des Universums führt. Aus diesen Gründen wird der Existenz von Dunkler Materie und Energie auch mit Misstrauen begegnet. Doch gibt es Alternativen zur der Annahme ihrer Existenz? Tatsächlich haben einige Wissenschaftler versucht die beobachtbare Wirkung von Dunkler Materie und Energie anderweitig zu erklären. So wird nach einer These davon ausgegangen, dass die Beschreibung der Gravitation von Newton und Einstein inkorrekt ist. Auf großen Skalen soll sich die Gravitation anders verhalten als von Newton und Einstein beschrieben. Das führe im Ergebnis zu den beobachteten Wirkungen, welche der Existenz der Dunklen Materie zugerechnet würden. Diese Thesen werden unter dem Begriff „Modified Newtonian Dynamics“ (kurz „MOND“) zusammengefasst. Darauf aufbauende Theorien müssten alle beobachtbaren Eigenschaften der Dunklen Materie erklären. Doch hier stoßen die Theorien nach der MOND-Hypothese noch an ihre Grenzen. So wurde vor einigen Jahren ein Galaxienhaufen gefunden, der sogenannte „Bullet Cluster“. Dieser besteht eigentlich aus zwei Haufen, die sich mit einer Relativgeschwindigkeit von 4500 km pro Sekunde gegenseitig durchdrungen haben. In den Galaxienhaufen befindet sich 10 Millionen Kelvin heißes Gas. Aufgrund der Relativgeschwindigkeit der Haufen mit mehrfacher Schallgeschwindigkeit bilden sich während der Kollision der beiden Stoßfronten im heißen Gas aus, welche es in beide Richtungen zusammendrücken. Die Gasverteilung wird dabei auf eine abgeflachte Zone zwischen den beiden Haufen konzentriert. Aus dem durch den Haufen hervorgerufene Gravitationslinseneffekt kann die Verteilung des Gravitationspotentials abgeleitet werden. Dieses wird von den dynamischen Prozessen des Gases überhaupt nicht tangiert. Doch genau an dieser Stelle zeigt sich unter anderem die Grenze der MOND-Hypothese. Nach dieser wird das Gravitationspotential durch baryonischer Materie geformt, als auch durch das heiße Gas. Eine Veränderung der Verteilung des Gases müsste nach der MOND-Hypothese auch zu einer Änderung des Gravitationspotentials führen. Das passiert jedoch nicht und lässt sich nur durch das Vorhandensein von noch weiterer massenreicher Materie, der Dunklen Materie erklären. Mittlerweile sind weitere Galaxienhaufen bekannt, die den gleichen Effekt zeigen. Es soll nicht heißen, dass es nicht vielleicht doch Alternativen zur Existenz von Dunkler Materie und Energie geben könnte. Doch gibt es bisher keine plausiblen Alternativen zur Existenz von Dunkler Materie und Energie. Ihre Existenz scheint evident zu sein.

## 9.0 Zusammenfassung

Das heutige Universum befindet sich in einer beschleunigten Expansion, die durch das heutige Verhältnis von Materiedichte mit  $\Omega_M = 0,3$  und Energiedichte mit  $\Omega_\Lambda = 0,7$  verursacht wird. Die heute sichtbare Materie beträgt nur zirka 15 % der gesamten Materie. Rund 85 % der Materie liegt in Form von Dunkler Materie vor, deren Zusammensetzung größtenteils unbekannt ist. Ein kleiner Teil der Dunklen Materie besteht aus sogenannter baryonischer Materie, also aus Atomkernen bzw. Atomen. Dazu gehören Schwarze Löcher, Neutronensterne, Weiße Zwerge, Schwarze Zwerge, Braune Zwerge, dunkle Galaxien und andere dunkle Objekte, die unter dem Begriff MACHOs zusammengefasst werden.

Diese Objekte lassen sich zum Teil durch den Gravitationslinseneffekt oder durch charakteristische Gasansammlungen in ihrer Umgebung nachweisen, wobei die erwarteten Werte durch die Beobachtung bisher nicht bestätigt wurden.

Der größte Teil der Dunklen Materie ist nichtbaryonischer Natur, von der wir bisher nur die Neutrinos als Vertreter kennen. Diese gehören der Heißen Dunklen Materie an, welche sich mit relativistischer Geschwindigkeit bewegt. Ein Großteil der Dunklen Materie liegt als Kalte Dunkle Materie vor und bewegt sich mit kleinen, nichtrelativistischen Geschwindigkeiten. Über deren Natur wissen wir bisher noch nichts. Wir gehen bei der Kalten Dunklen Materie von weiteren schweren Teilchen aus, die eine große Masse in etwa der Größenordnung von 100 Protonenmassen haben und sich nur mit ein paar Prozent der Lichtgeschwindigkeit bewegen sollen. Diese Teilchen werden SUSY-Teilchen genannt. Sie unterliegen nur der gravitativen und der schwachen Wechselwirkung. Daher werden sie auch „Weakly Interacting Massive Particle“ (kurz „WIMP“) genannt. Ihr Nachweis ist sehr schwierig und bisher nicht gelungen.

Die Gesamtdichte des Universums liegt bei der kritischen Dichte, daran hat die Materiedichte nur einen Anteil von 30 %. Die anderen 70 % lassen sich nur in Form einer noch unbekanntenen Energie erklären, wobei es sich unter anderem um die aus der Quantentheorie folgende Vakuumsenergie des Raumes handeln könnte. Allerdings ist uns die Natur der Dunklen Energie noch völlig unbekannt. Diese Dunkle Energie bewirkt eine beschleunigte Ausdehnung des Universums, die Anhand der Beobachtungen von Supernovae-Ia- Ereignissen nachweisbar ist.

Die heutigen Strukturen im Universum und die Verteilung der darin befindlichen Materie lassen sich am plausibelsten durch die Existenz der Dunklen Materie und Energie erklären. Plausible Alternativen zur These ihrer Existenz gibt es nicht. Alternative Theorien, die ohne die Existenz von Dunkler Materie und Energie auszukommen versuchen, stoßen an ihre Grenzen und können nicht alle beobachtbaren Wirkungen der Dunklen Materie und Energie erklären. Für die große Mehrheit der Wissenschaftler ist die Existenz der Dunklen Materie und Energie evident.



Bild 8: Die sphärische Verteilung der Dunklen Materie um eine Galaxie

## 10.0 Schlusswort

Die Abhandlung „Evidenz für dunkle Materie und dunkle Energie im Weltraum“ beruht auf einem gleichnamigen Vortrag von mir, den ich am 06.07.2006 im Rahmen eines Seminars im Fachbereich C – Mathematik und Naturwissenschaften (Abteilung Physik) der Bergischen Universität Wuppertal hielt. Diese Abhandlung wurde aktualisiert und erweitert. Der Stand der Theorien und Forschungen bis 2016 wurde berücksichtigt. Für das Korrekturlesen dieser aktualisierten Abhandlung möchte ich Stefan Antheck ganz herzlich danken!

Die Natur der Dunklen Materie und der Dunklen Energie ist bis heute nicht abschließend geklärt und damit eines der größten Rätsel der Kosmologie. Neben der Suche nach der Großen Vereinheitlichungstheorie der Physik, die alle vier Wechselwirkungen abschließend beschreiben könnte, stellt die Erforschung der Dunklen Materie und Energie die größte Herausforderung für die Physik dar. Die Einheit der Physik wird noch durch einen anderen Aspekt deutlich.

Um das Rätsel der Dunklen Materie und Energie lösen zu können, ist die Zusammenarbeit von zwei physikalischen Disziplinen notwendig: Astrophysik und Teilchenphysik. Aus dieser notwendigen Zusammenarbeit ist ein neues Fachgebiet entstanden:

Die Astroteilchenphysik. Auch innerhalb der Fachgruppe Physik der Fakultät – Mathematik und Naturwissenschaften der Bergischen Universität Wuppertal besteht eine Arbeitsgruppe „Astroteilchenphysik“, die wie andere Arbeitsgruppen dieser Fachgruppe an einigen internationalen Forschungsprojekten beteiligt ist. Die Zusammenarbeit von Astrophysik und Teilchenphysik umfasst zwei grundlegende Bereiche der Physik: Die Relativitätstheorie und die Quantentheorie. Beide Theorien sind grundlegend für die Physik. Die Relativitätstheorie ist Grundlage der Makrophysik bzw. der Kosmologie. Die Quantentheorie ist Grundlage für die Mikrophysik bzw. die Teilchenphysik. Sie funktionieren in ihren Bereichen sehr gut. Allerdings fehlt uns eine übergeordnete Theorie, welche die Quantentheorie und die Allgemeine Relativitätstheorie umfasst. Bestimmte kosmische Objekte, wie etwa Schwarze Löcher oder der Anfangszustand des Universums, lassen sich nur durch eine solche Theorie beschreiben. Auch für die abschließende Klärung der Natur der Dunklen Materie und Energie dürfte eine solche Theorie Voraussetzung sein. Dies gilt auch für die theoretische Beschreibung der Eigenschaften der Dunklen Materie und Energie.

Noch sind viele Rätsel der Physik nicht gelöst und der Menschheit werden sicherlich noch viele wissenschaftliche Abenteuer bevorstehen. Wie die berühmtesten Detektive aus der Literatur müssen die Wissenschaftler Schritt für Schritt Licht in das Dunkle bringen, in dem sie Theorien aufstellen und diese dann experimentell verifizieren. Wir jeder gute Detektiv versuchen die Wissenschaftler der Wahrheit der Dinge so nah wie möglich zu kommen und die Resultate ihrer Forschung den Menschen zugänglich zu machen. Ob die Resultate aus Wissenschaft und Forschung zum Guten oder zum Schlechten angewandt werden, hängt von den handelnden Menschen ab. Zweifellos wird die erfolgreiche Erforschung der Natur der Dunklen Materie und Energie zu einem bedeutenden Schritt in der Wissenschaft führen. Letztendlich verdanken auch wir Menschen unsere Existenz dem Vorhandensein von Dunkler Materie und Energie. Unabhängig davon ist es sehr unbefriedigend rund 95 Prozent des Existierenden nicht zu kennen. Ich hoffe, dass ich trotzdem etwas Licht in die Thematik über Dunkle Materie und Energie bringen konnte.

## 11.0 Literaturangaben

Nachfolgende Literatur fand bei der Erstellung der Abhandlung „Evidenz für Dunkle Materie und Dunkle Energie im Weltraum“ Verwendung. Dieser Literatur ist auch zur Vertiefung der Thematik geeignet. Aktuelle Informationen befinden sich im Übrigen jeweils auf den Webpräsenzen der wissenschaftlichen Institute, welche im Bereich der Dunklen Materie und Energie forschen. Den aktuellen Forschungsstand habe ich in der Abhandlung einfließen lassen.

- 1) Arnold Hanselmeier „Einführung in die Astronomie und Astrophysik“, 2013
- 2) Alfred Weigert, Heinrich J. Wendker „Astronomie und Astrophysik“ ,Grundkurs, Auflagen 1996 und 2010
- 3) Andrew Liddle „Einführung in die moderne Kosmologie“, 2008
- 4) Zeitschrift „Astronomie + Raumfahrt“ Nr. 143, Artikel „Das Dunkle Universum“ von Claus Grupen, Oktober 2014.
- 5) Zeitschrift „Astronomie + Raumfahrt“  
Heft 5 2000, Heft 4 2002
- 6) „Astrophysik“ Sonderdruck der Zeitschrift Astronomie und  
Raumfahrt
- 7) Spektrum der Wissenschaft „Die Entstehung der Sterne“, 1986
- 8) Harald Lesch, Jörn Müller „Kosmologie für helle Köpfe“, 2006
- 9) Gerhard Börner „Kosmologie“, 2002
- 10) Albrecht Unsöld, Bodo Baschek „Der neue Kosmos“, 1999