

Die Feinstruktur der Hintergrundstrahlung fixiert das Universum

Zum Nobelpreis für Physik 2006

1. Das Universum ist ein adiabatisch expandierendes Wärmebad, das bis zum Aufklaren fest mit der sichtbaren Materie verkoppelt war, seit dem Aufklaren dagegen nur unwesentlich Energie mit jener ausgetauscht hat. Vor dem Aufklaren geschah die Bildung von Atomkernen wie auch die Umsetzung von Teilchen-Antiteilchen-Paaren in Strahlung jeweils in einem Fenster zwischen ausreichender Abkühlung (bestimmt durch Bindungsenergie) und übergroßer Verdünnung (bestimmt durch das Wachsen der freien Weglänge über den Hubble-Radius^a hinaus). Im Falle der Gravitation ist die Abkühlung eigentlich erst nach dem Aufklaren ausreichend, aber auch ohne Wärmebad ist für eine Verdichtung um mehr als den Faktor 8 Kühlung das zentrale Problem. Hingegen ist die Reichweite der Gravitation immer unabschirmbar unendlich, weshalb langsame Kondensation schon bei hohen Temperaturen stattfindet. Gravitative Kondensation ist deshalb auch nicht eine Frage mikroskopischer Wechselwirkung atomarer oder subatomarer Teilchen, sondern Anwachsen von Dichtestörungen (im Großen und Ganzen etwa proportional zur Expansion, solange noch konventionelle Materie die Expansion bestimmt).

2. Die Geschichte der Störungen beginnt in der Tieftemperaturphase (der Inflation), wenn jede Skala^b über den Hubble-Radius hinauswächst und die Störungen sich dem Einfluss der mikroskopischen Wechselwirkungen unter fast gleichen Bedingungen entziehen. Eine Art Erhaltungssatz sorgt dafür, dass die Amplitude der Störungen zu der Zeit, wenn die Skala wieder in deren Einflussbereich gerät (weil der Hubble-Radius über die Skala hinauswächst), von der Skala weiter unabhängig sind. Aus diesem Grunde hängt die Störungsamplitude zu gegebener Zeit von der Dauer ab, die diese Skala wieder in diesem Einflussbereich ist.

Nun sieht es zunächst so aus, als müsste die Amplitude deshalb heute umgekehrt proportional zur Skala sein. Das ist aber nur für große Skalen der Fall, die erst nach dem Aufklaren vom Hubble-Radius überholt werden. Das Anwachsen auf kleinen Skalen wird nämlich unterdrückt, solange durch die mikroskopischen Wechselwirkungen ein Druck aufgebaut werden kann, der der gravitativen Anziehung entgegensteht. Für das Plasma der sichtbaren Materie ist dies der Lichtdruck. Erst mit dem Aufklaren des Universums bricht er zusammen und die Kondensation kann wieder einsetzen. Das ist aber zu spät, weil die in der Hintergrundstrahlung (2.73 K) endlich gefundene Amplitude nur 10^{-5} ist und seit $z \approx 1100$ nicht mehr auf die Größenordnung 1 anwachsen kann. Es muss also noch eine transparente Materiekomponente geben, die nicht mehr an das Wärmebad gekoppelt ist und deren Kondensation schon früher wieder einsetzen kann (Abb.1).

3. Wenn transparente Materie zur Zusammensetzung der Schwerequellen gehört, dann spürt diese keinen wesentlichen Druck (allerdings auch keine Kühlung im üblichen Sinne). Das Anwachsen ihrer Dichtestörungen proportional zur Expansion wird nicht bis zum Aufklaren unterdrückt, sondern nur bis zu dem Zeitpunkt, wo die nicht-relativistische Materie (d.h. Materie, deren Teilchen weit langsamer als das Licht sind und deshalb keinen vergleichbaren Druck aufbauen) und die Strahlung (genauer relativistische Materie, d.h. Materie, deren Teilchen oder Quanten Lichtgeschwindigkeit haben und deren Druck deshalb immer ein Drittel der Energiedichte beträgt) gleiche Dichte haben. Nur die kleinen Skalen werden dann bis zu diesem Zeitpunkt ausgebremst. Sie nehmen das Wachstum bereits wieder auf, wenn die Schwankungen im Plasma der sichtbaren Materie noch oszillieren und dabei auch noch langsam an Stärke verlieren. Das Spektrum der Schwankungen zeigt dieses Aufhalten des Wachstums auf den kleinen Skalen (Abb.2).

Die Dichteschwankungen der sichtbaren Materie werden nun zwar bis zum Aufklaren aufgehalten, danach aber fällt die sichtbare Materie schnell auf die Konzentrationen der transparenten Materie zu, so dass letztere alle Dichteschwankungen und die spätere Strukturentwicklung bestimmen.

4. Allerdings sieht man im Moment des Aufklarens, quasi eingefroren in der Hintergrundstrahlung, das Ergebnis der Oszillationen des sichtbaren Plasmas. Ihre Vermessung gestattet bisher unerreicht präzise Aussagen, weil einerseits diese Oszillationen empfindlich von den Parametern der universellen Expansion abhängen, und weil andererseits sie auch einfach theoretisch zu bestimmen sind: Kompression wie auch Kompressionsgeschwindigkeit wirken in der Hintergrundstrahlung gleichermaßen, so dass in der Phasenebene aus Kompression und Geschwindigkeit nur die Amplitude zählt. Wir kennen die Phase, mit der die Oszillationen beginnen, weil nur die maximal angewachsene Mode beim Eintritt in die Oszillationsphase wichtig ist. Die Schwingung sieht für alle Skalen gleich aus, dauert aber um so länger, je früher sie einsetzt, d.h. je kleiner die Skala ist. Gäbe es keine Beimischung nichtrelativistischer Teilchen im Plasma, wäre die Bahn in der Phasenebene ein Kreis und die Amplitude unabhängig von Dauer und Skala. Durch die Beimischung von etwa 10^{-9} Baryonen pro Photon verformt sich der Kreis in eine Art Eikurve und die Amplitude wird abhängig von Dauer und Skala. Darüber liegt noch eine Dämpfung, so dass das Endergebnis des Spektrums die abgebildete Form hat, die nun auch aus den Messungen der Wilkinson MAP herausgerechnet werden konnte, so dass der Vergleich nun liefert:

$$\lambda = 0.73, \Omega_{\text{transparent}} = 0.23, \Omega_{\text{sichtbar}} = 0.4$$

Die Hypothese einer transparenten Materie findet so eine deutliche Stütze. Allerdings muss auch die Hypothese eines sich nicht verdünnenden Schwerequellenanteils λ akzeptiert werden, der nicht Null ist und als Vakuumenergie, als Grundkrümmung der Raum-Zeit oder ganz konservativ als kosmologische Konstante angesehen werden kann. Als Vakuumenergie entspricht er einer Temperatur von etwa 30 K.

^aDer Hubble-Radius ist durch die momentane Expansionsrate H bestimmt: $R_{\text{Hubble}} = c/H$. Er begrenzt das Gebiet, in dem Wechselwirkungen kurzer Reichweite thermodynamisch effektiv sind.

^bSkala nennen wir die heutige Größe einer Struktur, die mit der Expansion wächst.

Abb.1: Ausschnitt aus der Karte der kosmischen Entwicklung:
Gezeigt ist der Verlauf des Hubble-Radius im Vergleich zu den festen Skalen, der Zeitpunkt t_{eq} der gleichen Dichte von Strahlung und nichtrelativistischer Materie, und der Zeitpunkt t_{rec} des Aufklarens. Die Skalen, die vom Hubble-Radius erst nach t_{rec} erreicht werden, sind die großen Skalen, auf denen das Anwachsen der Dichtestörungen nicht gebremst wird. Die Skalen, die vom Hubble-Radius bereits vor t_{eq} erreicht werden, sind die kleinen Skalen, auf denen das Anwachsen der Dichtestörungen der transparenten Materie bis t_{eq} gebremst wird und die Dichtestörungen der sichtbaren Materie bis t_{rec} oszillieren. Auf den mittleren Skalen sind nur die Dichtestörungen der sichtbaren Materie betroffen.

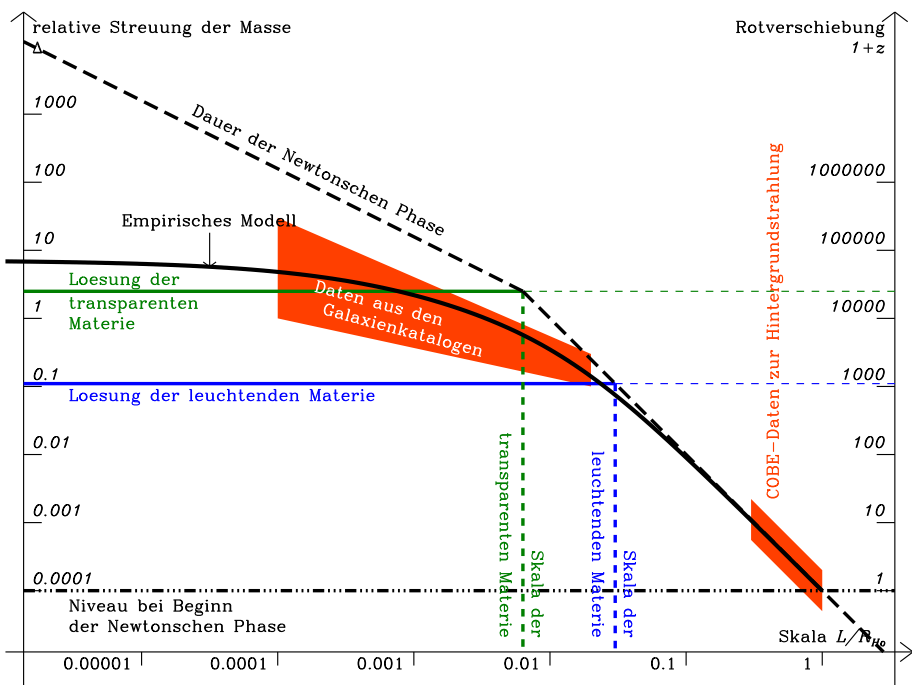
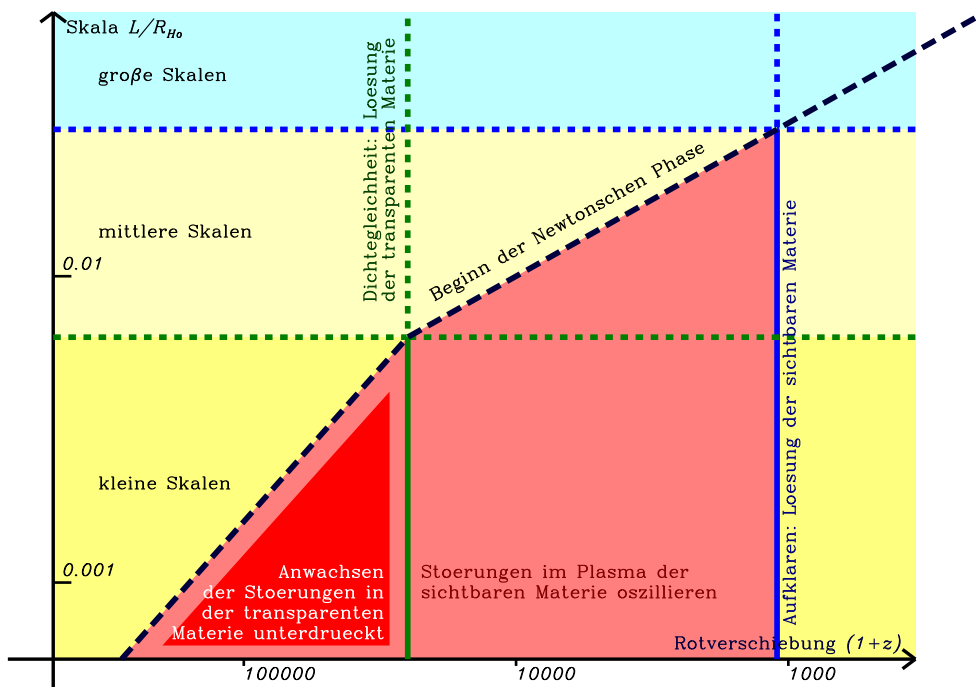


Abb.2: Spektrum der Dichteschwankungen:

Drehen wir Abbildung 1 um 90° nach rechts, und übersetzen wir die Zeitachse in Amplitude der heute erreichten Dichteschwankungen, ergibt sich ein Bild ihres Spektrums. Gäbe es keine transparente Materie, wäre das Spektrum auf den kleinen und mittleren Skalen durch die Zeit t_{rec} bestimmt, wo sich die sichtbare Materie vom Photonenbad löst. Die Beobachtungsdaten liegen aber darüber. Das Spektrum ist vielmehr von t_{eq} bestimmt, und die genaue Rechnung ergibt Übereinstimmung in den Grenzen der Genauigkeit, die man erwarten kann.

HINTERGRUNDSPEKTRUM

Abb.3: Akustische Oszillationen:

Die Phasenebene sei so normiert, dass der Abstand vom Mittelpunkt die in der Anisotropie der Hintergrundstrahlung wirksame Größe beschreibt. Ist die Bahn in der Phasenebene ein Kreis, so ist zu jeder Abbruchzeit die Amplitude gleich und das Spektrum der Anisotropie zeigt keine Struktur. Durch den Anteil nichtrelativistischer Materie im Plasma verformt sich der Kreis in eine Eikurve und das Spektrum zeigt eine Serie von Maxima und Minima. Wegen der Dämpfung in der Phase sich lösenden Photonenbads müssen wir ein im Ganzen abfallendes Spektrum erwarten. Dies wird auch beobachtet, und die Lage und Höhe der Maxima und Minima bestimmen die Komponentenstruktur der Schwerequelle und Anderes mehr.

