

NAGELPUNKTE DES UNIVERSUMS. EIN POSTER

Dierck-E.Liebscher
Astrophysikalisches Institut Potsdam

In Ausstellungen benötigt man oft mehr als nur Bildmaterial, um die Fragen der Besucher beantworten zu können. Andererseits zeigt sich immer wieder, dass längere und kleinskalige Texte nicht gelesen werden. Deshalb wurde zum Fragenkreis der Geschichte des Universums ein Poster entwickelt, das schon mehrmals als Blickfang wie auch als Erklärungshilfe gute Dienste geleistet hat. Hier wird es vorgestellt. Files in Postscript und JPEG finden sich auf meiner Web-Seite.

Das Universum entwickelt sich dank der Expansion, die von der Schwerkraft gelenkt wird. Diese Entwicklung lässt sich nicht überall durch den Beobachter direkt verfolgen. Zum einen gibt es einen Horizont in etwa 10 Milliarden Lichtjahren Entfernung und einer entsprechenden Vergangenheit. So wie wir auf der Zeitskala weitersteigen, vergrößert er sich, bleibt aber immer bestehen. Zum anderen wird das Universum noch vor diesem Horizont zu heiß, um durchsichtig bleiben zu können. Es ist die Theorie, die uns gestattet, weiter in die Vergangenheit zurückzurechnen, als wir unmittelbar beobachten können.

Wir rechnen also zurück. Wir benutzen dazu die Theorie der Schwerkraft und die Thermodynamik und konstruieren so ein Modell der Vergangenheit. Erstaunlicherweise finden sich nun auch in der Vergangenheit, sogar und gerade vor dem Aufklaren, eine Reihe von Punkten, an denen sich das Modell durch Beobachtungen befestigen lässt. Diese sind auf einem Poster dargestellt, das in der Abbildung in kleinem Maßstab wiedergegeben ist. Wir benutzen eine halblogarithmische Darstellung (das heißt, dass die Achsen in unmittelbarer Nähe des Koordinatenursprungs links oben linear, sonst aber logarithmisch sind). Wir lesen die Zeit von oben nach unten, die nach rechts abgetragenen Größen (Expansionsparameter, Hubble-Radius, Temperatur, Gesichtsfeld) sind auf dem linken Rande Null. Das berechnete Modell ist so gewählt, dass alles deutlich zu sehen ist. Würde man die Parameter des beobachteten Universums selbst verwenden, wären die interessanten Punkte nicht so schön gleichmäßig über das Bild verteilt. Deshalb erübrigt sich auch die Benennung von Größen an den Achsen: Hier zählt nur die Existenz und die relative Lage unserer Nagelpunkte.

Die Entwicklung des Expansionsparameters ist schwarz eingezeichnet. Es ist ein weit verbreitetes Missverständnis, dass dieser Expansionsparameter der Radius des Universums ist. Er ist es nicht, denn das Universum hat keinen Rand. Er ist auch nicht der Krümmungsradius des Raums, der ist eventuell unendlich oder sogar imaginär. Der Expansionsparameter kann vielmehr jede typische Entfernung sein. Daher wird die Expansion nicht durch eine Geschwindigkeit beschrieben, sondern durch eine Rate. Sie beträgt heute etwa 15% pro Jahr-milliarde. Alle Distanzen verhalten sich ähnlich. Beziehen wir den Verlauf der Entwicklung einer Distanz auf den Wert, den sie heute hat, erhalten wir immer die gleiche Kurve. Hier ist mit der Kurve in Schwarz die Skala gewählt, die heute gleich dem Hubble-Radius ist (N).

Im Gegensatz zum Expansionsparameter ist der Hubble-Radius physikalisch eindeutig durch die Expansionsrate bestimmt. Beide sind zueinander umgekehrt proportional. Der Punkt (N) ist folglich der erste Nagel. Der Hubble-Radius bestimmt in seiner Entwicklung (hellgrüne Linie) die effektiv maximale Reichweite aller Wechselwirkungen. Er hat heute eine Größe von etwa 4500 Mpc. In der Zeit vor dem Aufklaren war er deutlich kleiner. Hier muss wiederholt werden, dass der Hubble-Radius nicht die Distanz zwischen zwei Objekten markiert, die im Strom der Expansion schwimmen. Er ist eben nicht dem Expansionsparameter, sondern dem Kehrwert der Expansionsrate proportional.

Nach allem was wir heute wissen, beginnt das Universum seine Entwicklung bei extrem hohen Temperaturen ($T > 10^{28}$ K) als Strahlungskosmos. Bei diesen Temperaturen sollten die elementaren Wechselwirkungen (starke, elektromagnetische, schwache und eventuell gravitative) von gleicher Stärke und das Vakuum (so heißt der Zustand ohne reelle Teilchen) sehr dicht sein. Die Expansion sorgt dafür, dass die Strahlungsdichte unter die Dichte dieses Hochtemperaturvakuums fällt und das Universum eine exponentielle Expansion beginnt. In dieser Inflation genannten Epoche sinkt die Temperatur unter alle wesentlichen Werte. Die Inflation hält an, bis das nun instabile Hochtemperaturvakuum zerfällt und seine Energie wieder an die Freiheitsgrade der reellen Teilchen (Strahlung wie auch Teilchen mit Ruhmasse) abgibt. Das nennt man Rückheizung. Sie muss so weit gehen, dass bestimmte massive Teilchen ($m_X c^2 \approx 10^{14}$ GeV) erzeugt werden, deren asymmetrischer Zerfall das heutige Ungleichgewicht von Materie und Antimaterie entstehen ließ. Die Rückheizung darf aber nicht noch einmal den Umschlag in den Hochtemperaturzustand veranlassen. Punkt (D) trägt also den zweiten Nagel.

Im neu entstandenen Strahlungskosmos können gebundene Atomkerne zunächst nicht existieren. Schließlich fällt die Temperatur aber unter die Grenze, ab der sich Protonen und Neutronen zu Deuteronen zusammenlagern können ($T \leq 10^{10}$ K). Die Kernfusion setzt

ein. Die Deuteronen wachsen ihrerseits durch Anlagerung von Protonen und Neutronen schnell zu Heliumkernen, in denen die noch vorhandenen Neutronen konserviert, d.h. vor dem Zerfall bewahrt werden. Je früher die Kernfusion einsetzt, desto weniger Neutronen sind schon zerfallen, desto höher muss also heute die Heliumkonzentration sein: Deren beobachteter Wert liefert am Punkt (E) den dritten Nagel. Bei (F) ist das Universum so sehr verdünnt, dass die Heliumsynthese abbricht. Je früher dies geschieht, desto mehr Deuterium bleibt unverarbeitet übrig. Die Bestimmung der Deuteriumkonzentration treibt den vierten Nagel (F) ein. Für die Kernsynthese steht hier der Name Urknall, wie er ursprünglich als Spitzname für Gamows Hypothese geprägt wurde. Es ist anzumerken, dass der Begriff Urknall inzwischen für verschiedene Ereignisse verwendet wird, etwa für den Anfang der Zeit oder für das Ende der Inflation. Die Kernsynthese in expandierendem Universum ist nur eine Episode. Unerwartet aus der Sicht gewohnter thermodynamischer Abläufe ist auch, dass dieser Urknall die Expansion nicht treibt, sondern bremst, wenn auch nur geringfügig: Jede Umwandlung anderer Materiekomponenten in Strahlung verstärkt den Fall der Expansionsrate. Das Ende der Inflation ist dafür das deutlichste Beispiel.

Nun geht es weiter. Bei (I) ist die Temperatur unter die Ionisierungstemperatur des Wasserstoffs gefallen. Die elektrischen Ladungen neutralisieren sich durch die Bildung von Atomen, die freie Weglänge der Photonen wird sehr groß. Das Universum klart auf, wird durchsichtig. Die Strahlung wird heute (M) als Mikrowellenhintergrund von 2.7 K gemessen. Der Zeitpunkt des Aufklarens kann als eine der verstrichenen Zeit entsprechenden Entfernung dargestellt werden, hinter der das Universum heiß und undurchsichtig ist. Wir erklären die Hintergrundstrahlung damit als Rest eines Feuerballs, der uns umgibt.

Nun ist es Zeit, die Strukturbildung zu betrachten. Die Wachstumsrate von Strukturen hängt ab von deren Skala, das heißt der Größe der Raumbereiche, auf der sie gefunden werden. Auf allen Skalen (A,B,C) frieren Nullpunkts-Schwankungen unter gleichen Bedingungen ein, wenn die Skalen während der Inflation den Hubble-Radius überholen. Die Skalen werden dann größer als die effektive Reichweite auch der Gravitation. Die Kondensation beginnt erst, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind: Der Hubble-Radius muss die Skala wieder überholt haben und das Gewicht der Strahlung muss unter das der (ruh)massiven Teilchen gefallen sein. Die erste Bedingung entscheidet auf großen Skalen (L), die zweite auf kleinen (G). Dazwischen gibt es eine kritische Skala (H). Die Zeit für die Kondensation ist für kleine Skalen einheitlich. Für große wird sie um so kürzer, je größer die Skalen sind. Die Kurve N-L-H-G findet sich im Spektrum heutiger Strukturen wieder. Je genauer wir diese vermessen können, desto besser lassen sich die Zustände bei (L,H,G) und schließlich sogar bei (A,B,C) bestimmen. Der Satellit COBE mißt große Skalen nahe bei (J), die Galaxienkataloge geben

Auskunft über die kleinen Skalen und (zur Zeit) nur wenig über die kritische Skala hinaus.

Mit dem Ende der strahlungsbestimmten Expansion können erst einmal neutrale (dunkle) Teilchen kondensieren. Für geladene Teilchen ist die Mischung mit dem Photonengas sehr zäh. Sie müssen warten, bis sie sich zu ungeladenen Einheiten (den Atomen) verbinden können und damit die freie Weglänge der Photonen sehr groß wird und das Universum aufklart. Gäbe es keine dunkle Materie, wanderte der Punkt (H) auf der grünen Linie des Hubble-Radius nicht nur nach unten zu kleineren Werten der Verstärkung, sondern auch nach rechts zu größeren Skalen. Die Beobachtungsergebnisse verbieten das und zeigen die Existenz dunkler Materie.

Die blauen Kurven zeigen den Fahrplan des Lichts, einmal wie es zu frühester Zeit startet, als die Distanz zwischen allen Punkten des Raums null war, zum anderen wie es uns heute erreicht. Verfolgen wir die untere Kurve, finden wir die Skala unseres Gesichtsfeldes (J) auf dem Feuerball. Dieses Gesichtsfeld ist sehr homogen, wie wir durch die Mikrowellenhintergrundstrahlung wissen. Die Störungen betragen nur 1:100000. Also sollte das gesamte Gesichtsfeld in einem einzigen Kohärenzbereich liegen, d.h. einem Bereich, der kausales Einflußgebiet wenigstens eines Ereignisses ist. Die Skala des Kohärenzbereichs wird durch die Entfernung gegeben, die ein Photon von seinem Startplatz bis zum Zeitpunkt des Feuerballs erreicht haben kann. Dank der Inflation ist diese Skala (K) tatsächlich sehr viel größer als unser Gesichtsfeld. Gäbe es keine Inflation, läge (K) links von (J) und die Homogenität auf der Skala von (J) bliebe das Rätsel, das Horizontproblem genannt worden ist.

Unbeeindruckt davon, wie sich die heutigen Gewichte auf Teilchen, Strahlung, Raumkrümmung und Vakuum (gleichbedeutend mit einem Grundniveau der Weltkrümmung, d.h. der kosmologischen Konstanten) verteilen, ist im Universum zwischen Rückheizung und Aufklaren der Einfluß von Raumkrümmung und Vakuum unerheblich. Deshalb können uns alle Nagelpunkte der Vergangenheit nichts über die Zukunft sagen, in der Raumkrümmung und Vakuum – so vorhanden – immer die Oberhand gewinnen: Die Zukunft ist durch sie nicht festgenagelt. Raumkrümmung und Vakuum heute können nur durch Beobachtung der Geschichte von Expansion und Strukturbildung nach dem Aufklaren festgestellt werden.

Dierck-E.Liebscher

<http://www.aip.de/~lie/>