



NAGEL-PUNKTE

DES

UNIVERSUMS

Hochtemperatur-Strahlungskosmos

Strahlung wird leichter als Hochtemperaturvakuum

- Einfrieren auf großen Skalen **A**
- Einfrieren auf kritischer Skala **B**
- Einfrieren auf kleinen Skalen **C**

Inflation

Temperatur nach Rückheizung **D**

Hochtemperaturvakuum zerfällt
Rückheizung des Universums

Deuteriumbildung setzt ein **E**

Urknall im Strahlungskosmos

Heliumbildung bricht ab **F**

- Kondensation auf kleiner Skala setzt wieder ein **G**
- Knick des Spektrums auf kritischer Skala **H**

Strahlung wird leichter als Teilchengas

3000 K: Universum klart auf **I**

Feuerball

- Gesichtsfeld auf Feuerball **J**
- Kohärenzbereich auf Feuerball **K**

Strukturbildung

- Große Skala: ständige Kondensation **L**
- 2.722 K: Hintergrundstrahlung **M**
- Normierung auf Hubble-Skala **N**

Zukunft: festgenagelt durch Hintergrundstrahlung:
 $\lambda = 0.7, \kappa = 0.$

Positive Krümmung: $\kappa = 0.83$

Negative Krümmung $\kappa = -0.7$

Konstante $\lambda = 0.7$

Zeit



NAGELPUNKTE DES UNIVERSUMS. EIN POSTER

Dierck-E.Liebscher, Astrophysikalisches Institut Potsdam, www.aip.de/~lie/

Das Universum entwickelt sich dank der Expansion, die von der Schwerkraft gelenkt wird. Diese Entwicklung lässt sich nur an wenigen Punkten wirklich verfolgen. Das liegt vor allem daran, dass das Universum nicht immer durchsichtig war. Es ist die Theorie, die uns gestattet, weiter in die Vergangenheit zurückzurechnen, als wir unmittelbar beobachten können.

Wir rechnen also zurück. Erstaunlicherweise finden sich nun eine Reihe von Punkten auch in der Vergangenheit vor dem Aufklaren, an denen sich das Modell durch Beobachtungen befestigen lässt. Diese sind hier in einer großzügigen Abbildung dargestellt. Wir benutzen eine halblogarithmische Darstellung. Wir lesen die Zeit von oben nach unten, die dargestellten Größen 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.

Die Entwicklung des Expansionsparameters ist schwarz eingezeichnet. Der Expansionsparameter ist nicht der Radius des Universums, der kann auch unendlich oder imaginär sein, sondern irgendeine typische Entfernung. Alle Distanzen verhalten sich ähnlich. Beziehen wir den Verlauf der Entwicklung auf die Distanz heute, erhalten wir immer die gleiche Kurve. Hier ist die Skala gewählt, die heute gleich dem Hubble-Radius ist (N). Der Hubble-Radius ist physikalisch eindeutig durch die Expansionsrate bestimmt. Beide sind zueinander umgekehrt proportional. Der Hubble-Radius bestimmt in seiner Entwicklung (hellgrüne Linie) die effektiv maximale Reichweite aller Wechselwirkungen. Er hat heute eine Größe von 3000-6000 Mpc.

Das Universum beginnt seine Entwicklung bei extrem hohen Temperaturen (10^{32} K) als Strahlungskosmos. Bei diesen Temperaturen sind die Elementarkräfte von gleicher Stärke und das Vakuum sehr dicht. 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 fällt die Temperatur unter alle wesentlichen Werte. Die Inflation hält an, bis das nun instabile Hochtemperaturvakuum zerfällt und seine Energie wieder an die Freiheitsgrade von Teilchen und Strahlung abgibt. Das ist die Rückheizung. Sie muss so hoch sein, dass das heutige Ungleichgewicht von Protonen und Antiprotonen entstehen kann, darf aber nicht noch einmal das Hochtemperaturvakuum erzeugen. Punkt (D) ist also der erste 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, die ihrerseits durch Anlagerung von Protonen und Neutronen schnell zu Heliumkernen wachsen. Der Urknall setzt ein. Je früher das geschieht, desto höher muss heute die Heliumkonzentration sein: Deren beobachteter Wert liefert am Punkt (E) den zweiten Nagel. Bei (F) ist das Universum so sehr verdünnt, dass die Heliumsynthese abbricht. Je früher das geschieht, desto mehr Deuterium bleibt übrig. Die Bestimmung der Deuteriumkonzentration treibt den dritten Nagel (F) ein. So geht es weiter. Bei (I) ist die Temperatur unter die Ionisierungstemperatur des Wasserstoffs gefallen. Die elektrischen Ladungen neutralisieren sich durch die Bildung von Atomen, das Universum klart auf, wird durchsichtig. Die Strahlung wird heute (M) als Mikrowellenhintergrund von 2.722 K gemessen.

Betrachten wir nun die Strukturbildung. Ihr Tempo hängt von der Skala, der Größe der Raumbereiche, ab, auf der sie stattfindet. Auf allen Skalen (A,B,C) frieren die Nullpunkts-Schwankungen ein, wenn die Skalen während der Inflation den Hubble-Radius überholen. Die Kondensation beginnt, 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 nur wenig über die kritische Skala hinaus.

Unser Gesichtsfeld (J) auf dem Feuerball ist sehr homogen. Die Störungen betragen nur 1:100000. Also sollte das gesamte Gesichtsfeld in einem einzigen Kohärenzbereich liegen, d.h. einem Bereich, der kausales Einflußgebiet nur eines einzigen Punktes ist. Dank der Inflation ist die maximale Ausdehnung eines solchen Kohärenzbereichs auf dem Feuerball tatsächlich sehr viel größer als unser Gesichtsfeld (K). Gäbe es keine Inflation, läge (K) links von (J) und die Homogenität auf der Skala von (J) bliebe das Rätsel, das Kausalitätsproblem genannt worden ist.

Unbeeindruckt davon, wie sich die heutigen Gewichte auf Teilchen, Strahlung, Raumkrümmung und Vakuum (kosmologische Konstante) verteilen, ist im Kosmos 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 Größe des Feuerballs allerdings hängt von Krümmung und Vakuum ab und kann mit der Größenverteilung der Flecken in der Hintergrundstrahlung verglichen werden. 2003 hat man mit WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) gefunden, dass $\lambda = 0.7$ und $\kappa = 0$ sein sollte.