

Urknalltheorie

Der Urknall bezeichnet keine Explosion, sondern die gleichzeitige Entstehung von Materie, Raum und Zeit aus einer gemeinsamen Singularität.

Die Urknalltheorie beschäftigt sich mit der Entwicklung des Universums nach dem Urknall, insbesondere bis zur Entkopplung der Hintergrundstrahlung.

Entstehung der Theorie

Georges Lemaître, der den Urknall damals noch „Uratom“ oder „primordiales Atom“ nannte und Alexander Friedmann können als wesentliche Begründer der Urknalltheorie genannt werden.

Die Idee des Urknalls entstand aus der Beobachtung, dass das Universum expandierte und nicht, wie man bis dahin angenommen hatte, statisch war. Die Lösung eines expandierenden Universums mit einer Singularität zur Zeit Null wird durch die Lösung der Friedmann – Gleichungen (Feldgleichungen ohne kosmologische Konstante) beschrieben, welche sich auf die ART beziehen.

Rotverschiebungen

- Dopplereffekt: Relativbewegung Quelle – Beobachter
- Gravitation: Wellenlänge erscheint durch gravitative Zeitdilatation länger
- Kosmologische Rotverschiebung: Dehnung der Raumzeit um den Faktor x dehnt auch die Wellenlänge des Photons um x
- Rotverschiebung: $z = \frac{\lambda_{\text{beobachtet}} - \lambda_0}{\lambda_0}$, λ_0 : Wellenlänge bei Aussendung
- Skalenfaktor der relativen Expansion: $a = \frac{1}{1+z}$.

Experimentelle Befunde, die für die Urknalltheorie sprechen

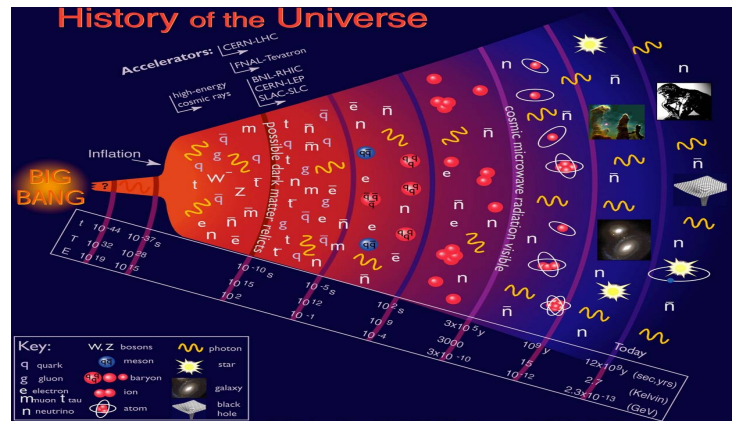
- Die Rotverschiebungen des Lichts ferner Galaxien und damit die Expansion des Universums (Hubble – Expansion)
- Die Hintergrundstrahlung des Universums
- Die beobachtete Grenze der Altersverteilung der Sterne um etwa 13 Mrd Jahre
- Die Häufigkeitsverteilung der Elemente im Weltraum

Das Hubblesche Expansionsgesetz

- Galaxien bewegen sich von uns weg mit $v = c \cdot z = H_0 \cdot d$
 - $H_0 \approx 71 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$: Hubble – Konstante, eigentlich Hubble – Parameter: $H = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$
 - v : Geschwindigkeit (über Rotverschiebung), d : Abstand
- H_0^{-1} : Hubble – Zeit \approx Alter des Universums

Kosmologische Epochen

Die Epochen sind durch die jeweiligen Reaktionen gekennzeichnet, die darin ablaufen. Es kommt mit dem Absinken der Temperatur zum „Ausfrieren“ von Reaktionen, diese finden also nicht mehr statt.



Planck – Ära

- Zeit vor der Planck – Zeit $5,4 \times 10^{-44} s$, Temperatur: $10^{32} K$, Dichte: $10^{94} \frac{g}{cm^3}$
- Weder Zeit noch Länge waren Kontinua → keine physikalische Aussage über die Epoche möglich
- Theorie der Quantengravitation wäre zur Beschreibung notwendig
- Alle vier Grundkräfte waren in der Urkraft vereint

GUT – Ära (Grand Unified Theory)

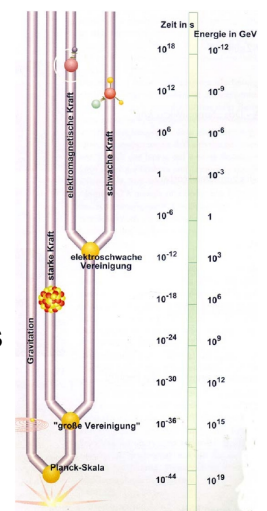
- Expansion beginnt, Gravitation spaltete sich von der Urkraft ab → GUT – Kraft
- Die meisten Teilchen der GUT – Ära sind unbekannt
- Vermutung: Ursprung der Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie

Inflationäres Universum

- Zeit: $10^{-36} s$, Temperatur: $10^{27} K$ → starke spaltet sich von der GUT – Kraft ab → elektroschwache Kraft
- Überlichtschnelle Expansion um den Faktor 10^{50} zwischen $10^{-35} s$ und $10^{-33} s$
- Inflationsphase erklärt die Beobachtungen
 - Globale Homogenität des Kosmos (Horizontproblem)
 - Großräumige Strukturen (Galaxien, Galaxienhaufen)
 - Geringe Krümmung des Raumes (Flachheitsproblem)
 - Fehlen magnetischer Monopole

Quark – Ära

- Zeit: $10^{-33} s$, Temperatur: $10^{25} K$ → Bildung von Quarks und Antiquarks
- Es lag ein Quark – Gluonen – Plasma vor
- Schwerere Teilchen (z.B. X – Boson) starben aus



Die vier Grundkräfte

- Zeit: $10^{-12} s$, Temperatur: $10^{16} K$ → Aufspaltung von elektroschwacher in elektromagnetische und schwache Kraft

Hadronen - Ära

- Zeit: $10^{-6} s$, Temperatur: $10^{13} K$ → Quarks vereinigen sich zu (Anti-) Hadronen

- Protonen und Neutronen wandeln sich ineinander um:
$$p + \bar{\nu}_e \rightleftharpoons n + e^+$$
$$p + e^- \rightleftharpoons n + \nu_e$$
- Protonen und Neutronen sind im thermischen Gleichgewicht:
$$\frac{n_n}{n_p} \approx e^{\frac{-(m_n - m_p)c^2}{kT}} \rightarrow$$

Verhältnis von 5:1 wegen Masseunterschied von rund 1,3 MeV

Leptonen – Ära

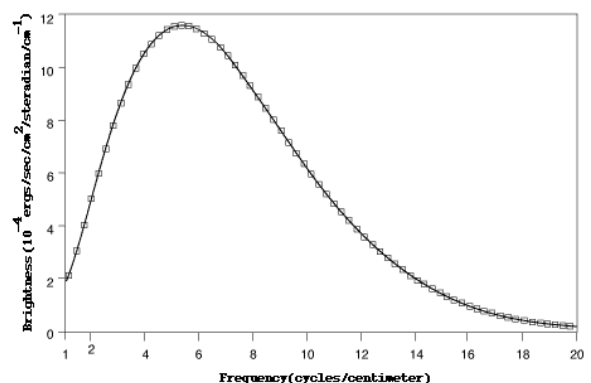
- Zeit: $10^{-4} s$, Temperatur: $10^{12} K$ → Hadronen annihilieren sich mit Antiteilchen
- Neutronenzerfall $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ verschiebt Proton – Neutron – Verhältnis: 7:1
- Leptonenpaare werden gebildet → dominante Teilchensorte
- Dichte: $10^{13} \frac{g}{cm^3}$ → Neutrinos entkoppeln
- Nach rund 1 s betrug die Temperatur noch $10^{10} K$ und die meisten Elektronen und Positronen vernichteten sich

Primordiale Nukleosynthese

- Zeit: 10 s, Temperatur: $10^9 K$ → Protonen und Neutronen vereinigen sich zu Atomkernen
- Zuerst: Deuterium nach $n + p \rightarrow {}^2H + \gamma$
- daraufhin weitere Prozesse, die im wesentlichen aufhörten, als alle Neutronen zu He-4 synthetisiert wurden (stabilste Nukleonenbindung)
- Verhältnis am Ende: 25% Helium-4, 0,001% Deuterium, sowie Spuren von Helium-3, Lithium und Beryllium. Die restlichen 75% bildeten Wasserstoffkerne (Protonen).
 - Übereinstimmung mit heutigen Beobachtungen und Proton–Neutron–Verhältnis
- Es liegt ein Atomkern – Elektronen – Plasma vor

Ende der Strahlungsära, Entkopplung der Hintergrundstrahlung

- Nach 10000 Jahren fällt die Energiedichte der Strahlung unter die der Materie → materiedominierte Ära
- Universum war seither undurchsichtig, da die Photonen in ständiger Wechselwirkung mit den freien Ladungen standen
- Nach 380000 Jahren war die Temperatur auf etwa 3000 K gefallen und es bildeten sich stabile Atome → **Entkopplung der Hintergrundstrahlung**, da Photonen nur gering mit neutralen Atomen wechselwirken



Die Hintergrundstrahlung

- Wellenlänge im Millimeterbereich → Mikrowellen – Hintergrundstrahlung, CMB (Cosmic Microwave Background)

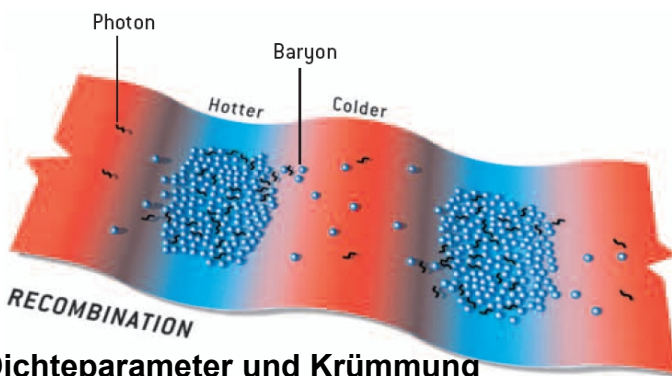
- Strahlung ist nahezu homogen und isotrop und entspricht sehr gut der eines schwarzen Strahlers $\mu df = \frac{8\pi h}{c^3} f^3 \left(e^{\frac{hf}{kT}} - 1 \right)^{-1} df$ mit $T = 2,725 \pm 0,002$ K
- → deshalb auch der Name „3K – Strahlung“
- Die Rotverschiebung der CMB beträgt $z = 1089 \pm 0,1\%$.

Entdeckung und Messung der Hintergrundstrahlung

- bereits 1948 von George Gamow vorhergesagt, zufällig 1965 von Penzias und Wilson bei Antenneneichung entdeckt
- rund $400 \frac{\text{Photonen}}{\text{cm}^3}$ an Hintergrundstrahlung im gesamten Universum
- heute: Messung mit WMAP, Zukunft: PLANCK

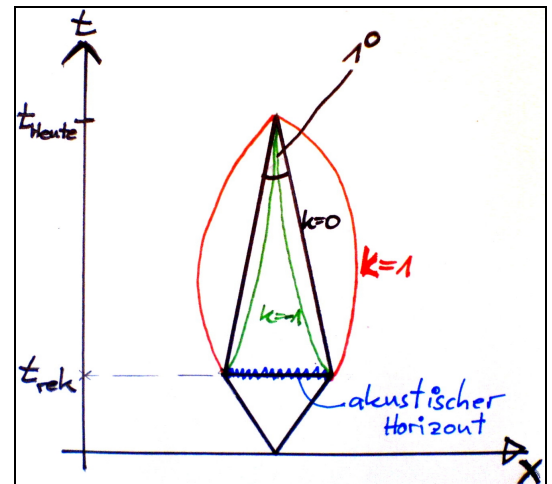
Abweichungen von der perfekten Isotropie

- wesentliche Abweichung durch dipolartige Verschiebung (Erdbewegung im Sonnensystem, Galaxie, usw.)
- nach Abzug dipolartiger Verschiebung verbleibt $\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{10000}$
- Ursache: Materieschwankungen führen zu überdichteten Regionen. Ausgesandtes Licht bei der Entkopplung erfährt eine Gravitationsrotverschiebung
- Veranschaulichung: es gibt Senken, in die Materie harmonisch hinein und hinaus schwingen kann



Dichteparameter und Krümmung

- Es ist $\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$ mit der kritischen Dichte $\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$, bei der das Universum flach wäre, also keine Krümmung besäße
 - Krümmung ist mit Dichteparameter verknüpft:
- | | |
|----------|--------------------|
| $k = +1$ | $\Omega_0 > 1$ |
| $k = 0$ | $\Omega_0 = 1$ |
| $k = -1$ | $0 < \Omega_0 < 1$ |
- $k = 1$: sphärische, $k = 0$: keine und $k = -1$: hyperbolische Krümmung



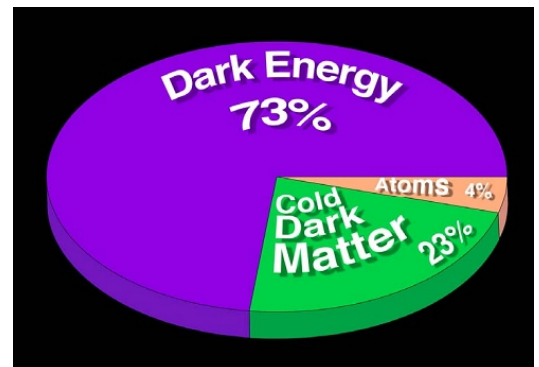
Das Winkelleistungsspektrum

- Statistische Auswertung des WMAP Bildes ergibt hohe Abweichung von der Durchschnittstemperatur bei rund 1° als Winkel zwischen zwei Messpunkten
- Grund: Zur Zeit der Entkopplung haben wir Schallwellen auf dem akustischen Horizont. Messung mit 1° Winkel bedeutet Messung zweier Maxima der Schallwelle

- Messung liefert Informationen über Raumkrümmung durch Betrachtung der Winkelsumme. Wir finden, dass nahezu keine Krümmung vorliegt. → Dichte des Universums liegt bei der kritischen Dichte
- Weitere (weniger ausgeprägte) Maxima stellen die Obertöne der Schallwellenschwingung dar.

Einführung der dunklen Materie

- Baryonische Materie allein reicht nicht aus um kosmologische Beobachtungen zu erklären
- Dunkle Materie ist nicht direkt beobachtbar, zeigt aber gravitative Wechselwirkung



Einführung der dunklen Energie

- Baryonische und dunkle Materie würden durch ihre gravitative Wirkung eine Verlangsamung der Expansion bewirken
- Tatsächlich beobachtet wird aber eine exponentielle Expansion des Universums. Es muss also eine antigravitative Wirkung geben → dunkle Energie
- Dunkle Energie wird als Vakuumenergie mit konstanter Dichte interpretiert
- Sie bewirkt die exponentielle Expansion des Universums
- Anteil der dunklen Energie erhalten wir über $\Omega = \Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_{DE} = 1$

Schwächen der Urknalltheorie

- Wie kommt die Bevorzugung der Materie gegenüber der Antimaterie zustande?
- Wie lässt sich die Planck – Ära beschreiben?
- Wie kam es zum Urknall?
- Was ist mit der dunklen Materie / Energie?

Quellen

- Kosmologieskript von Prof. de Boer
- Blome / Zaun: Der Urknall
- Joseph Silk: Die Geschichte des Kosmos
- Spektrum der Wissenschaft: Kosmologie und Teilchenphysik
- <http://curious.astro.cornell.edu/>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptseite>
- <http://www.nasa.gov/>
- <http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/EKPoverview.pdf>
- <http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~deboer/>
- <http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~Otmar.Biebel/dm-seminar/KHaiser.pdf>
- <http://www.tp4.ruhr-uni-bochum.de/~ks/symposium/talks/wunner.pdf>