

Einführung

Kosmologie für Nicht-Physiker

Markus Pössel & Björn Malte Schäfer

Haus der Astronomie/Institut für Theoretische Astrophysik

16.10.2014 bis 22.1.2015

Kosmologie

Ehrgeizigstes Ziel der Physik überhaupt — Beschreibung des Universums als Ganzes?

Einschränkung: “Unwichtige Details” (fast, aber nicht ganz: wie Sie und ich...) vernachlässigen

Trotzdem: Riesige Spanne von Größenskalen vom beobachtbaren Universum ($\sim 10^{26} m$) zur Größenskala der Sterne ($\sim 10^9 m$); im frühen Universum: Atome, Elementarteilchen etc.

Große Spannweite an Physik: Gravitation (Newton & Allgemeine Relativitätstheorie), Thermodynamik, Atom- & Elementarteilchenphysik

Grundlagen der Kosmologie

- „Nur“ das beobachtbare Universum

Günstige Voraussetzungen:

- Keine unendliche Hierarchie der Verschiedenheiten auf verschiedenen Größenskalen
- Verhältnismäßig freier Blick in große Entfernungen

Näherungsweise:

- Die Naturgesetze, die wir kennen, gelten universell
- Was wir beobachten können ist repräsentativ

Das Kosmologische Prinzip

Fortschreibung der kopernikanischen Revolution: Wir nehmen keinen speziellen Platz im Universum ein

Kosmologisches Prinzip

Auf großen Skalen ist das Universum im Durchschnitt homogen und isotrop (d.h. hat an jedem Ort und in jede Richtung die gleichen Eigenschaften)

Ein expandierender Kosmos

Wie kann sich ein Universum, das dem kosmologischen Prinzip genügt, überhaupt verändern?

- Räumliche Variationen explizit ausgeschlossen
- Zeitliche Veränderung ist nur zulässig, wenn sie die räumliche Anordnung erhält

⇒ Expansion oder Kontraktion — gleichmäßige Abnahme oder Zunahme der Dichte (entsprechend gleichmäßigen Entfernungsänderungen)

Einfluss auf Lichtwellen

Wellenlänge skaliert mit Skalenfaktor:



Lichtwellen: Wellenlänge entspricht Farbe
(rot = längere Wellenlänge)



In einem expandierenden Universum: Alle Wellenlängen entfernter Galaxien rotverschoben! Rotverschiebung ist Funktion der Entfernung!

Unterschiedliche Entfernungsbegriffe

Was ist Entfernung?

- Universum „kurz anhalten“ und nachmessen
- Entfernung über Helligkeit
- Entfernung über Winkelgröße
- Rotverschiebung als Entfernungsmaß [Praxis!]

... in der Kosmologie: nicht dasselbe!

Separate Regionen



Welche Regionen können miteinander kommunizieren? Welche nicht? (Insbes. bei endlichem Alter des Universums?)

Rekonstruktion der Expansionsgeschichte

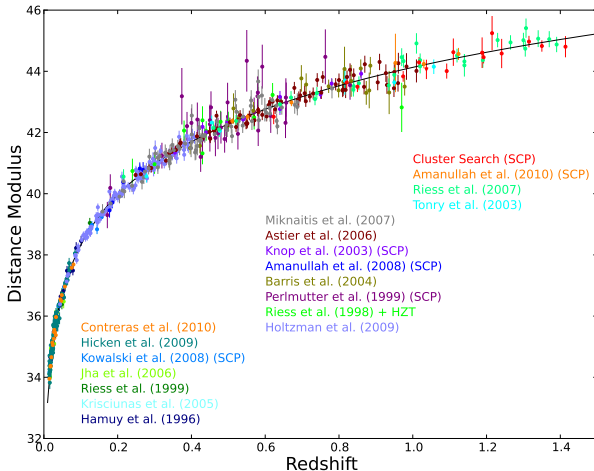
Wie schnell verlief die Expansion?

Was folgt daraus für Vergangenheit/Zukunft des Universums?

Welche Aussagen über Eigenschaften dessen, was wir *jetzt* beobachten, folgen? („Blick in die Vergangenheit“)

Rekonstruktion der Expansionsgeschichte

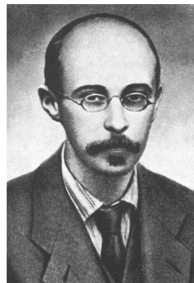
...mit Hilfe der Rotverschiebungen immer weiter entfernter Objekte
(Grundproblem: Abstandsmessung; Bild hier Suzuki et al. 2011):



Dynamische Universen

Grundfrage: Zusammenhang Expansion mit Materieinhalt (vgl. Newton!)

Friedmann (1924) entwickelt auf Basis von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie Gleichungen, die bestimmen, wie die Expansion in Abhängigkeit von der Materiedichte verläuft.



A. Friedmann

Alexander
Friedmann

Friedmanns Universen

Friedmanns Gleichung aus heutiger Sicht: Dynamik wird durch drei (Energie-)Dichteparameter bestimmt, $0 \leq \Omega \leq 1$

(langsame) Materie Ω_m — Bremswirkung
(Achtung: sog. „Dunkle Materie“ zählt mit)

Strahlung Ω_r — Licht und andere relativistische (=lichtschnelle oder fastlichtschnelle) Materie: Bremswirkung; verdünnt sich schneller als langsame Materie

Dunkle Energie Ω_Λ — kann bremsen oder beschleunigen, bleibt konstant

Je nach Wert von $\Omega = \Omega_r + \Omega_m + \Omega_\Lambda$: unterschiedliche Raumgeometrie! $\Omega < 1$ sattelartig, $\Omega = 1$ flach, $\Omega > 1$ kugelartig.

Was für Materie enthält unser Universum?

$$\Omega_m = \left\{ \begin{array}{l} \Omega_b = 4,9\% \\ \Omega_d = 26,8\% \end{array} \right\} = 31,7\%$$

$$\Omega_r = 0,005\%$$

$$\Omega_\Lambda = 68,3\%$$

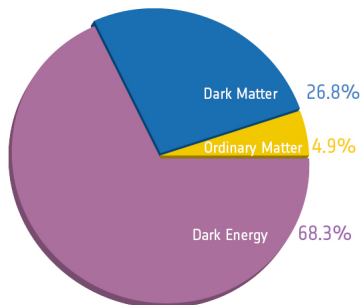


Bild: ESA/Planck Collaboration

Wobei Ω_b = normale Materie (Protonen, Neutronen, ...),

Ω_d = dunkle Materie (keine Wechselwirkung mit Licht),

Ω_Λ = beschleunigende Dunkle Energie

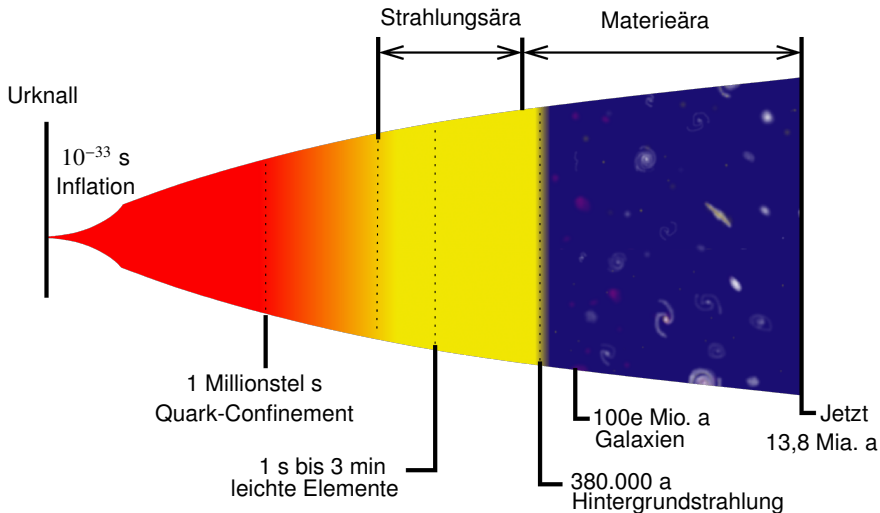
Das Universum zurückrechnen

Materie verdünnt sich langsamer als Strahlung $\Rightarrow$ früher größerer Beitrag der Strahlung!

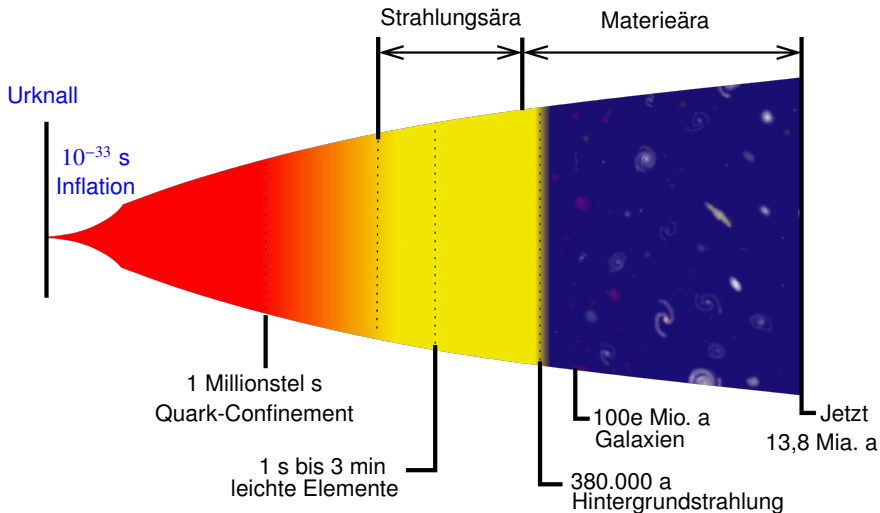
Früher alles deutlich dichter und heißer $\Rightarrow$ Urknallphase

Ende Vorlesung 16.10.2014

Die kosmische Geschichte



Urknall und Inflation



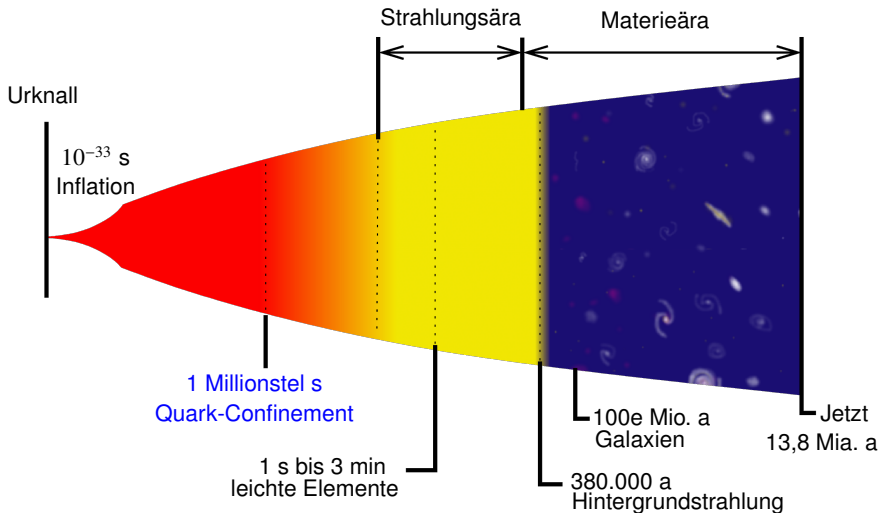
Urknall und Inflation

- Singulärer Anfang („alles an einem Punkt“): Urknall
- Quantengravitation — kein sicheres Modell!
- Inflation: Exponentielle Expansion
- Vielfalt von Inflationsmodellen
- Inflation erklärt, warum der Raum flach ist
- Inflation erklärt beobachtete Homogenität
- Inflation erklärt die winzigen Dichtefluktuationen am Anfang



Bild: Friedrich Böhlinger

Heiße Elementarteilchensuppe



Heiße Elementarteilchensuppe

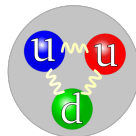


Bild: Arpad Horvath

- Materie vs. Antimaterie
- Versuche mit Ionenkollisionen
- u.a. ALICE-Experiment am LHC

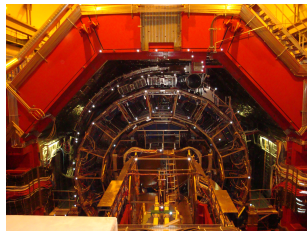
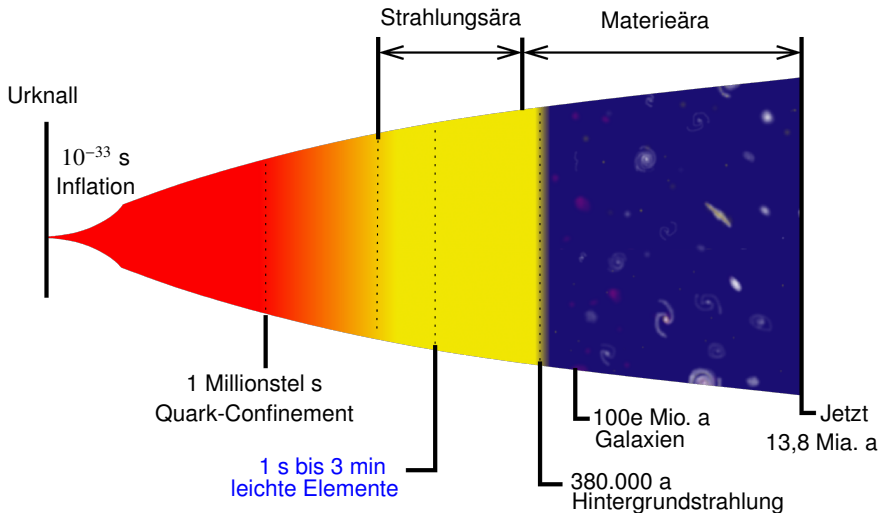


Bild: ALICE Collaboration/CERN

Entstehung der leichten Elemente



Entstehung der leichten Elemente

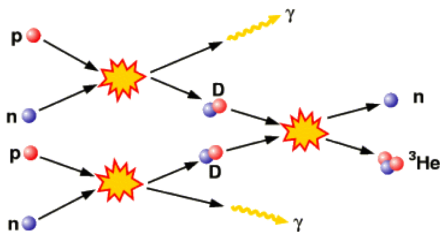
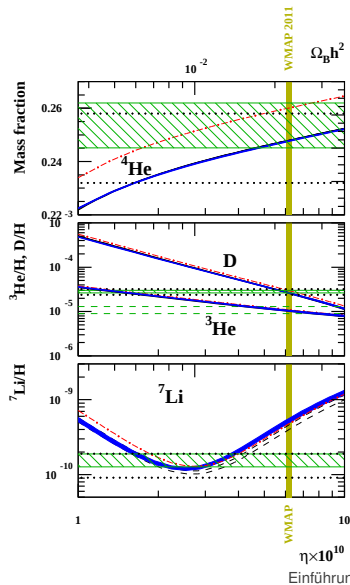


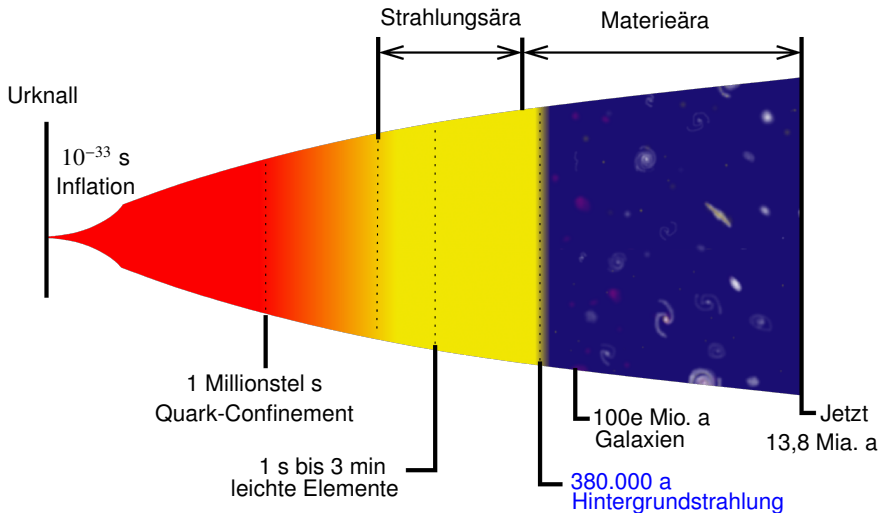
Bild rechts: relative Häufigkeiten
(Masse) leichter Elemente.

η = Photonenanzahl/Baryonenanzahl

Bild rechts: Coc 2012



Kosmische Hintergrundstrahlung



Kosmische Hintergrundstrahlung

Wärmestrahlung, charakterisiert durch einen einzigen Parameter:
Temperatur T

Seit Urknallphase nahezu ungestört unterwegs $\Rightarrow$ direkter Blick
auf Verhältnisse am Ende der Urknallphase!

Winzige Temperaturfluktuationen (10^{-5}): Beginn der
Strukturbildung im Universum!

Kosmische Hintergrundstrahlung

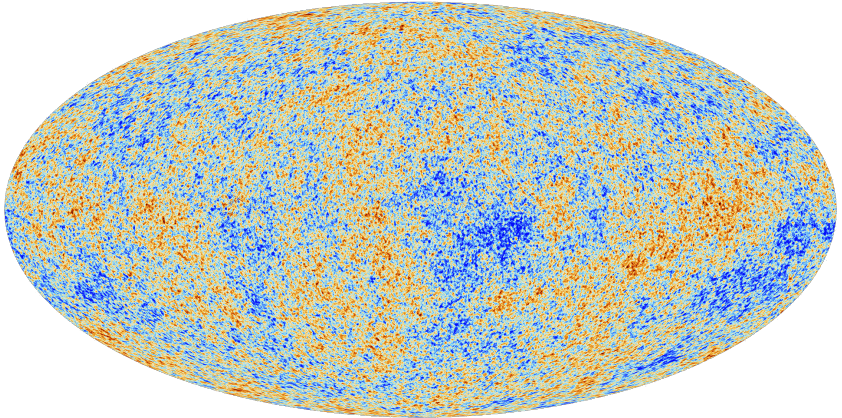
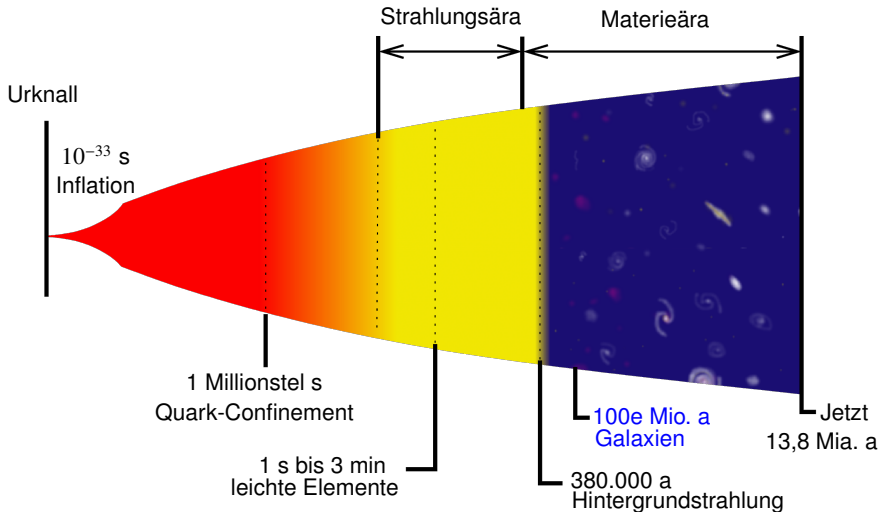


Bild: ESA/Planck Collaboration

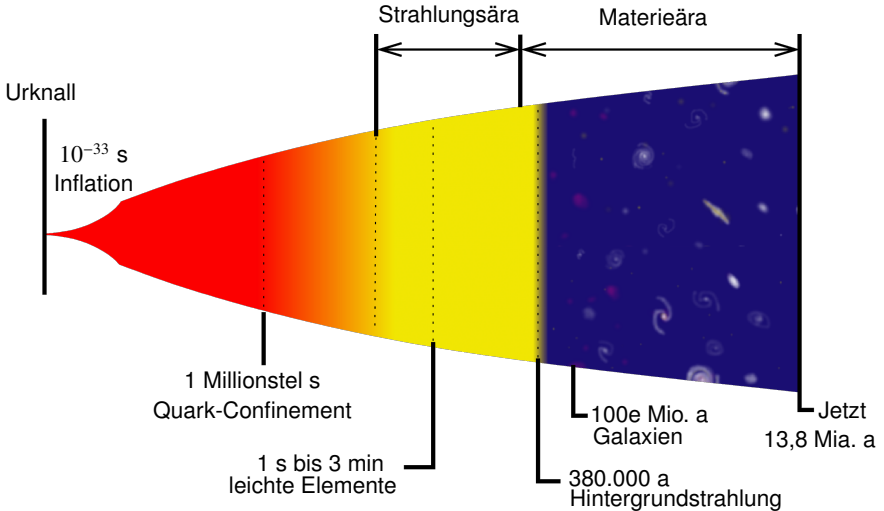
Stern- und Galaxienentwicklung



Stern- und Galaxienentwicklung

Volker Springel et al.

Die kosmische Geschichte



Grenzen unseres Wissens

Was ist Dunkle Materie?

Was ist Dunkle Energie?

Was geschah in den frühesten Momenten der Urknallphase?

Erwartbare Grenzverschiebungen

- Immer genauere Durchmusterungen (=Bestandsaufnahmen) des Universums (2020+)
- Neuartige Messungen durch nächste Generation von Teleskopen (2020+)
- Genauere Abstandsmessungen verringern die Messunsicherheiten (2019+)
- Immer genauere Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (2014+)
- Fortschritte in der Teilchenphysik: Schwerionenbeschleuniger, Large Hadron Collider... (2015+)
- Fortschritte bei den physikalischen Theorien (?)

Fragen

- Wie funktioniert das alles im Einzelnen? (Welche Physik?)
- Woher weiß man das alles?
- Wo sind die Grenzen unseres Wissens?
- ...?

Wege zu den Antworten?

Als nächstes:

Ein Streifzug durch die Physikgeschichte, bei dem wir Schritt für Schritt die nötigen Konzepte und Werkzeuge einsammeln.

Mit dieser Werkzeugsammlung formulieren/erkunden wir dann die Modelle und Messungen der modernen Kosmologie.