



# Das frühe heiße Universum

Kosmische Evolution für Nichtphysiker

**Markus Pössel**

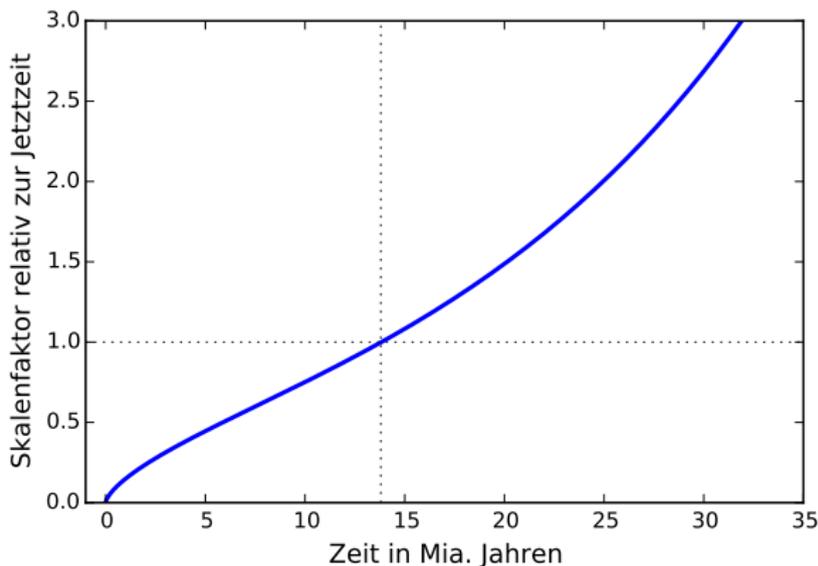
Haus der Astronomie

WS 2017/2018

# Zusammenfassung Teil I

- Im Durchschnitt homogenes Universum
- Expansion mit Skalenfaktor  $a(t)$
- Effekte der Expansion: Rotverschiebung, Hubble-Relation
- Dynamik der Expansion: Friedmann-Gleichungen
- Änderungen der Dichte durch Expansion:  $\rho(t) \sim a^n$

# Skalenfaktor-Geschichte des Universums

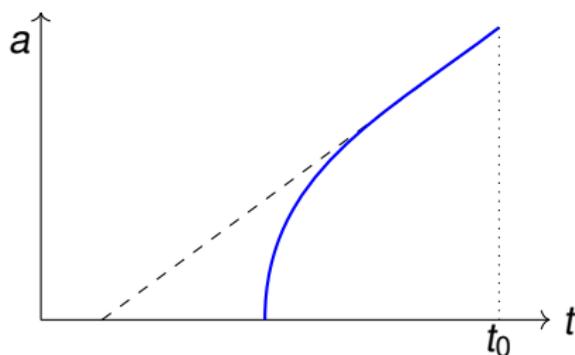


In der Vergangenheit beliebig klein!

# Urknall-Singularität

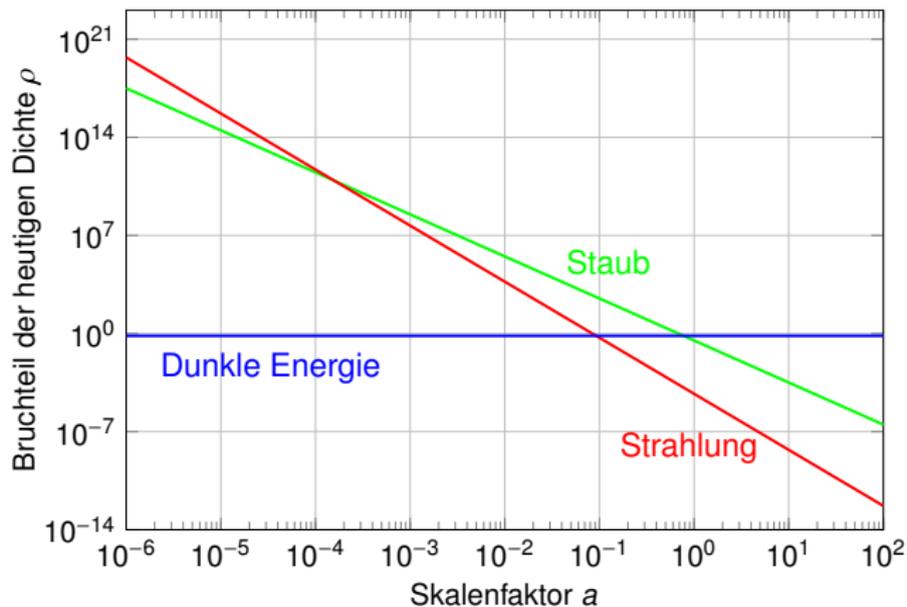
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p/c^2)$$

heißt auch: Wenn es eine frühe Phase des Kosmos gibt, in dem die Dunkle Energie nicht dominiert, dann hatte das betreffende Modell-Universum einen singulären Anfang,  $a(t) = 0$ :



Anfangssingularität – Spezialfall allgemeinerer Singularitätentheoreme (Hawking-Penrose).

# Grenzfälle: Epochen des Universums



Frage für das frühe Universum:

Was gibt es *jetzt* als Strahlung im Universum?

# Strahlung aus dem frühen Universum

Frage: Was erwarten wir für Strahlung aus dem frühen Universum?

Dichte der sichtbaren Materie (wechselwirkt mit Licht) heute  $10^{-27} \text{ kg/m}^3$ . Ab ca.  $a/a_0 = 10^{-10}$ : so dicht wie Wasser!

Kompression, ohne Energie abzuführen, erhitzt  $\Rightarrow$  extrem dichtes, heißes frühes Universum!

Große Hitze erzeugt starke **Wärmestrahlung**

# Wärmestrahlung: Glühendes Metall

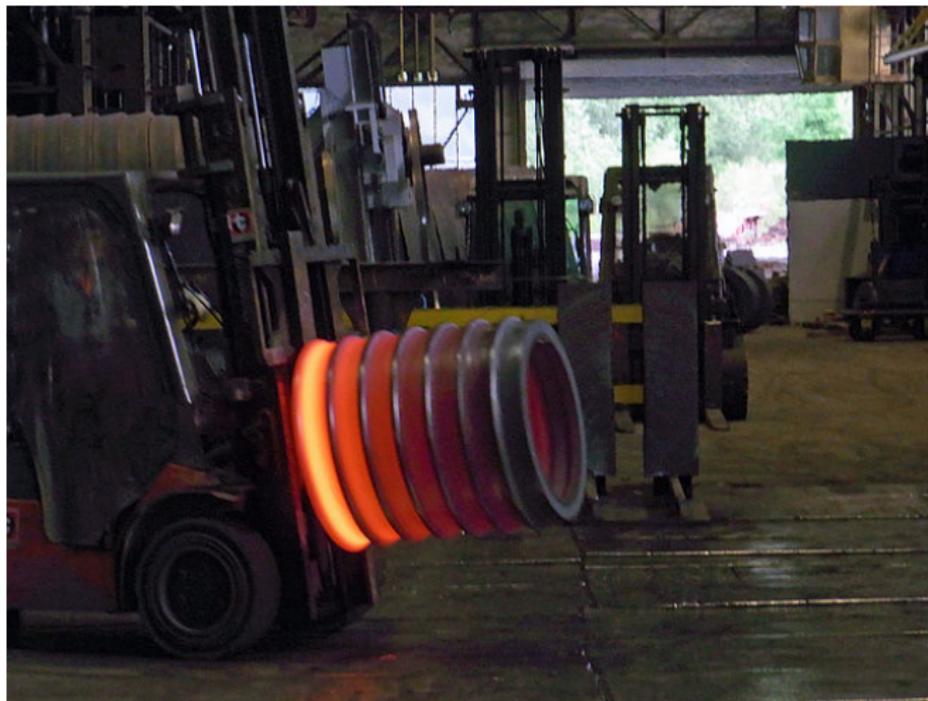
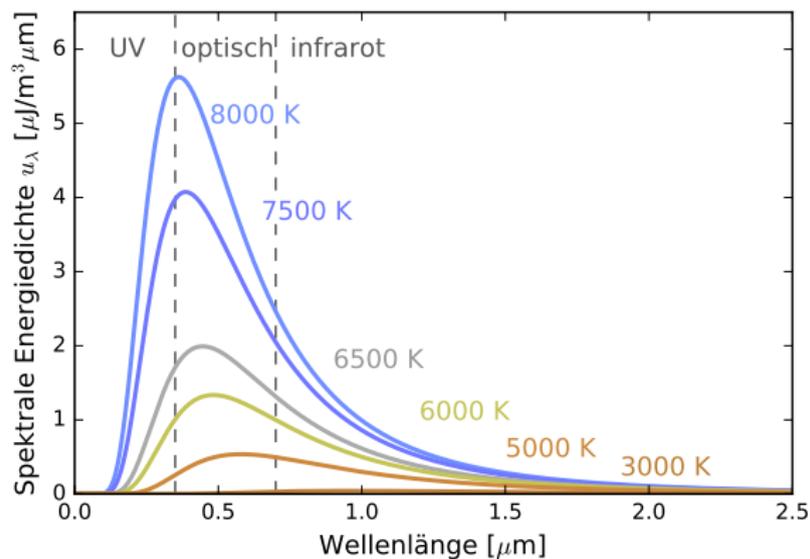


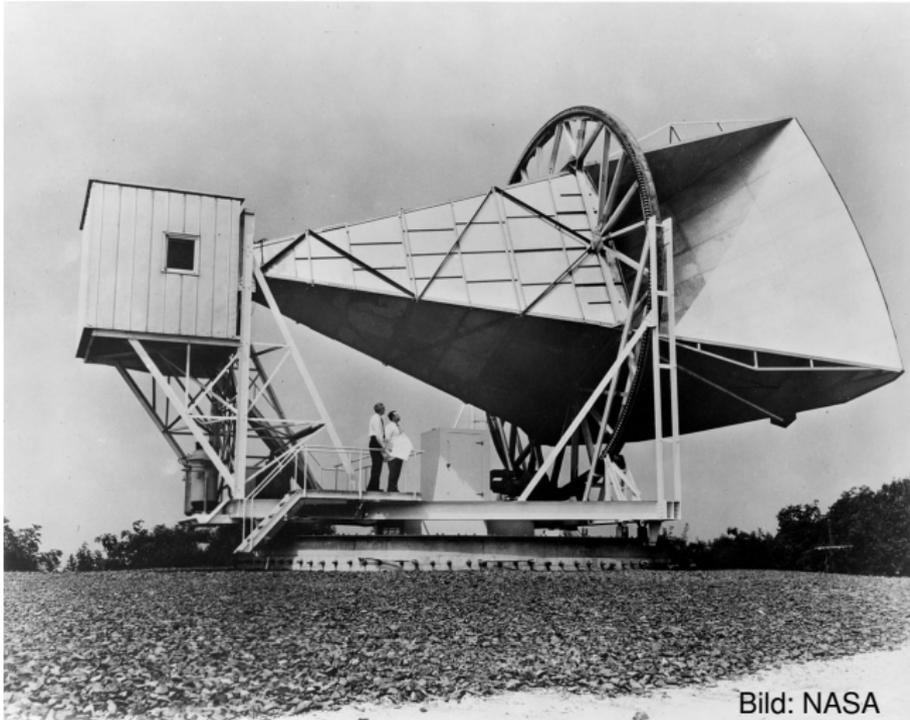
Bild: „ExtraSchicht 2010, Radreifenproduktion im Bochumer Verein“,  
Rainer Halama via Wikimedia Commons unter Lizenz CC BY-SA 3.0

# Wärmestrahlung: Planck-Spektrum

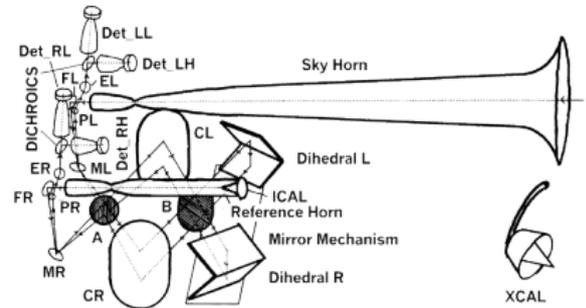


Wärmestrahlung hat charakteristisches Spektrum (=Verteilung der Lichtenergie auf unterschiedliche Wellenlängen)

# Entdeckung Hintergrundstrahlung: Penzias & Wilson



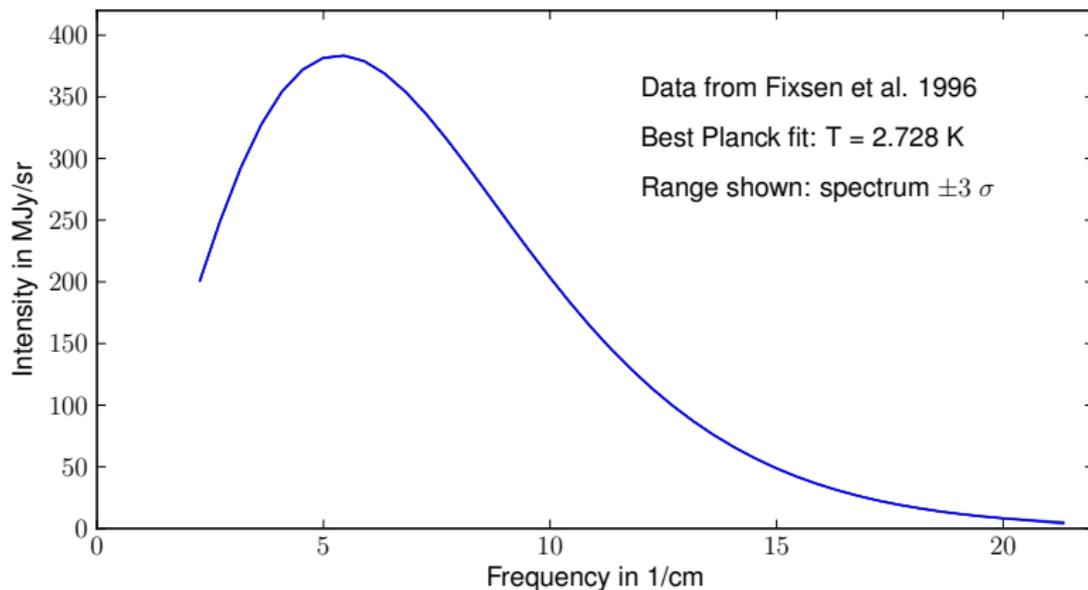
# Entdeckungsgeschichte Hintergrundstrahlung



FIRAS-Instrument (Far Infrared Absolute Spectrometer), PI: John Mather

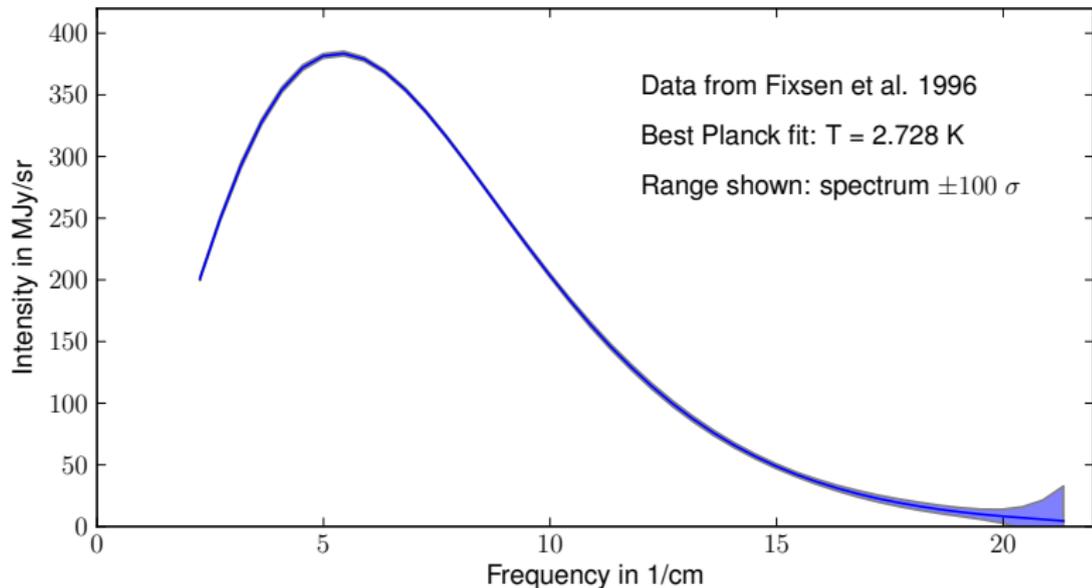
Cosmic Background Explorer (COBE),  
Missionsdauer 1989–1993

# Planck-Kurve: COBE-FIRAS (Mather et al.)



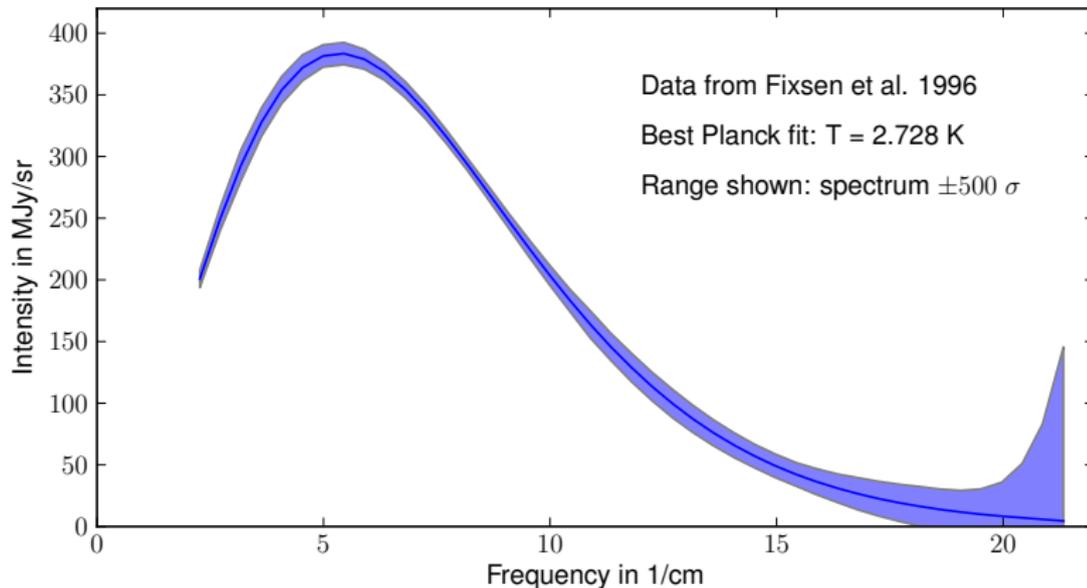
Daten aus Fixsen et al. 1996 via <http://lambda.gsfc.nasa.gov>

# Planck-Kurve: COBE-FIRAS (Mather et al.)



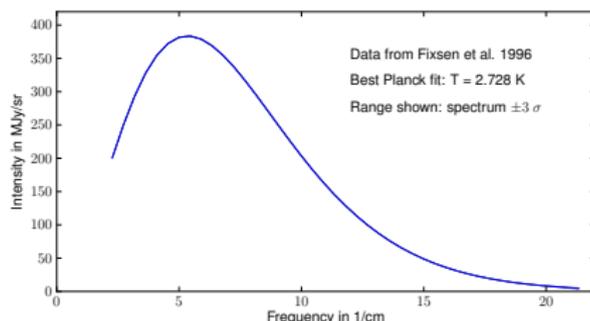
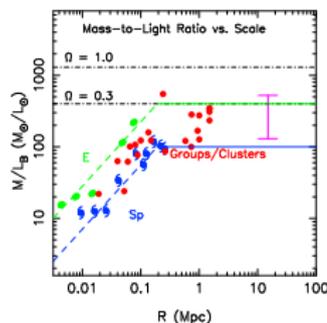
Daten aus Fixsen et al. 1996 via <http://lambda.gsfc.nasa.gov>

# Planck-Kurve: COBE-FIRAS (Mather et al.)



Daten aus Fixsen et al. 1996 via <http://lambda.gsfc.nasa.gov>

# Hintergrundstrahlung dominiert!



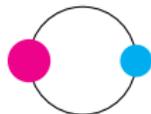
Aus Materiedichte/Abschätzung Baryonenanteil und Eigenschaften der Wärmestrahlung:

$$\eta = \frac{n_b}{n_\gamma} \sim 10^{-9}$$

Deutlich mehr Photonen als Materieteilchen! Photonen dominieren!

# Bindungsenergie

Gebundene Systeme:

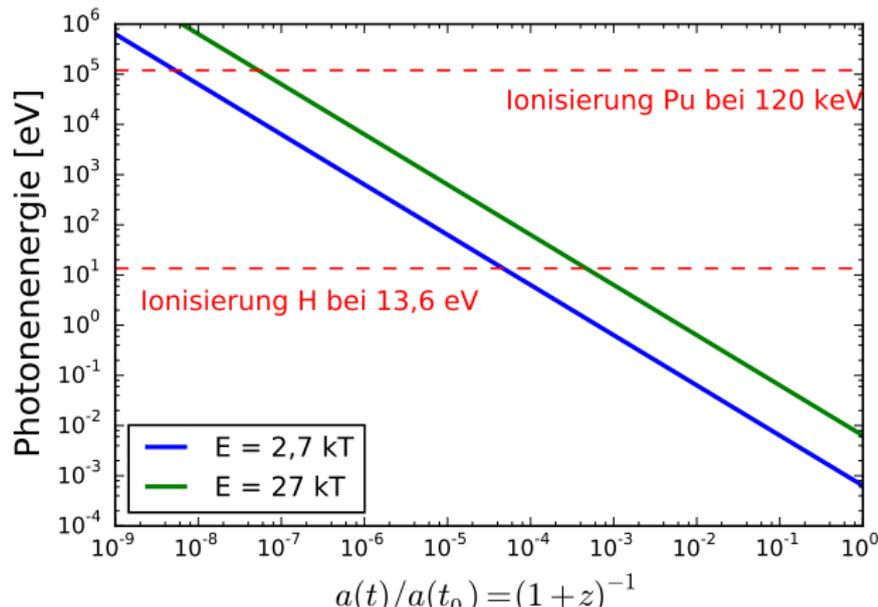


versus

freie Bestandteile:

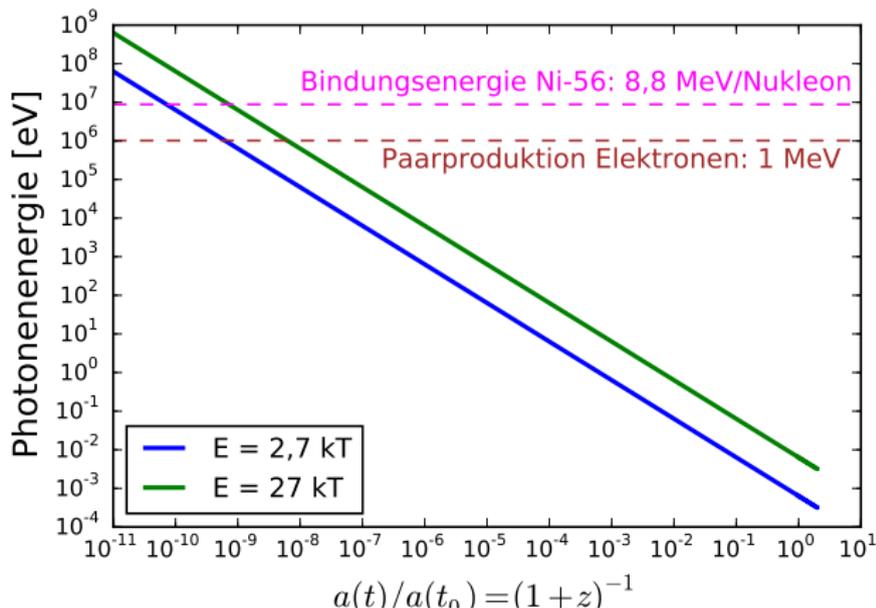


# Entwicklung Photonenergie mit Skalenfaktor



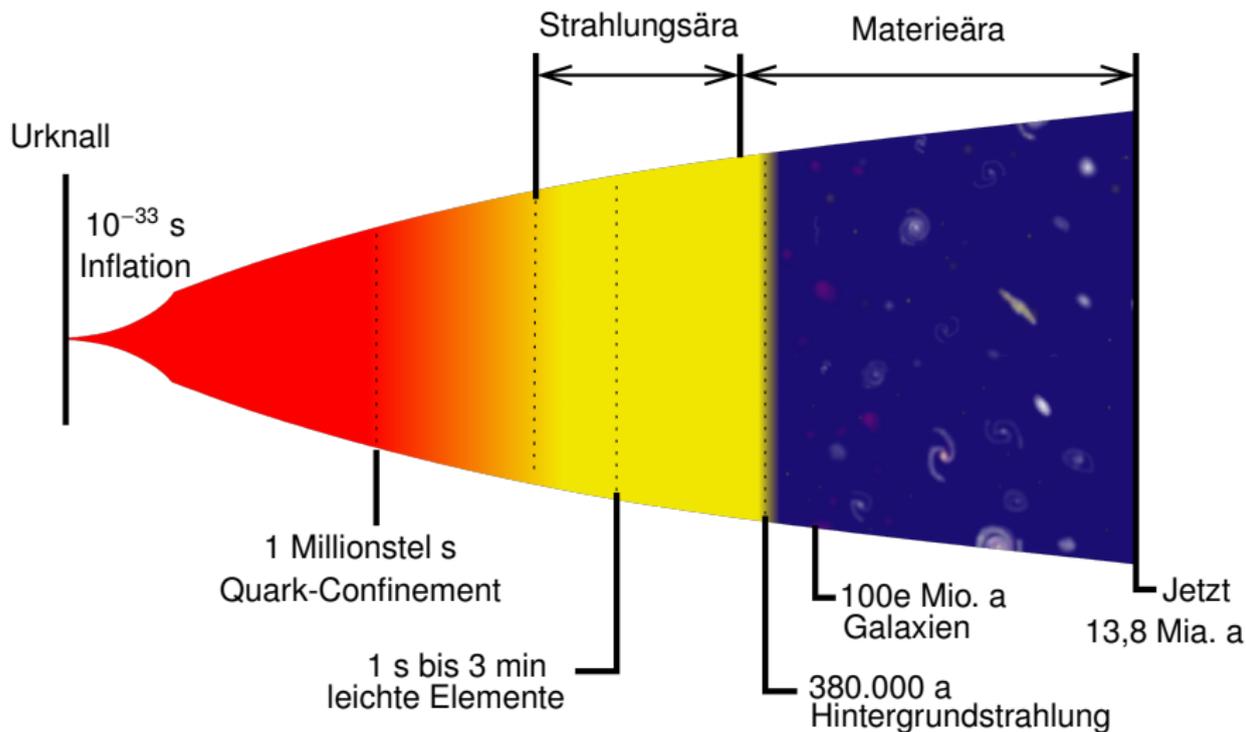
2,7 kT ist durchschnittliche Photonenergie, 27 kT die Mindestenergie des hochenergetischsten Bruchteils  $\eta$  – Ausgangspunkt heutiger Wert:  $kT = 0,2 \text{ meV}$

# Entwicklung Photonenenergie mit Skalenfaktor

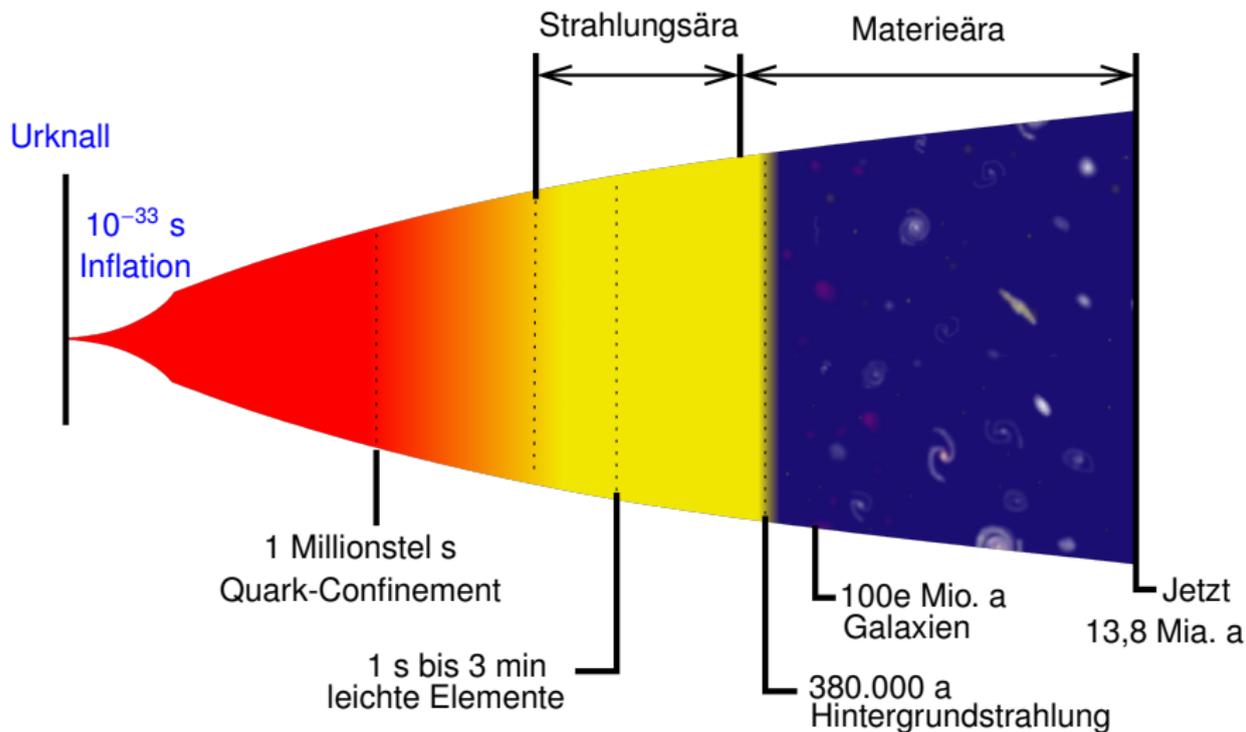


2,7 kT ist durchschnittliche Photonenenergie, 27 kT die Mindestenergie des hochenergetischsten Bruchteils  $\eta$  – Ausgangspunkt heutiger Wert:  $kT = 0,2 \text{ meV}$

# Die kosmische Geschichte



# Urknall und Inflation



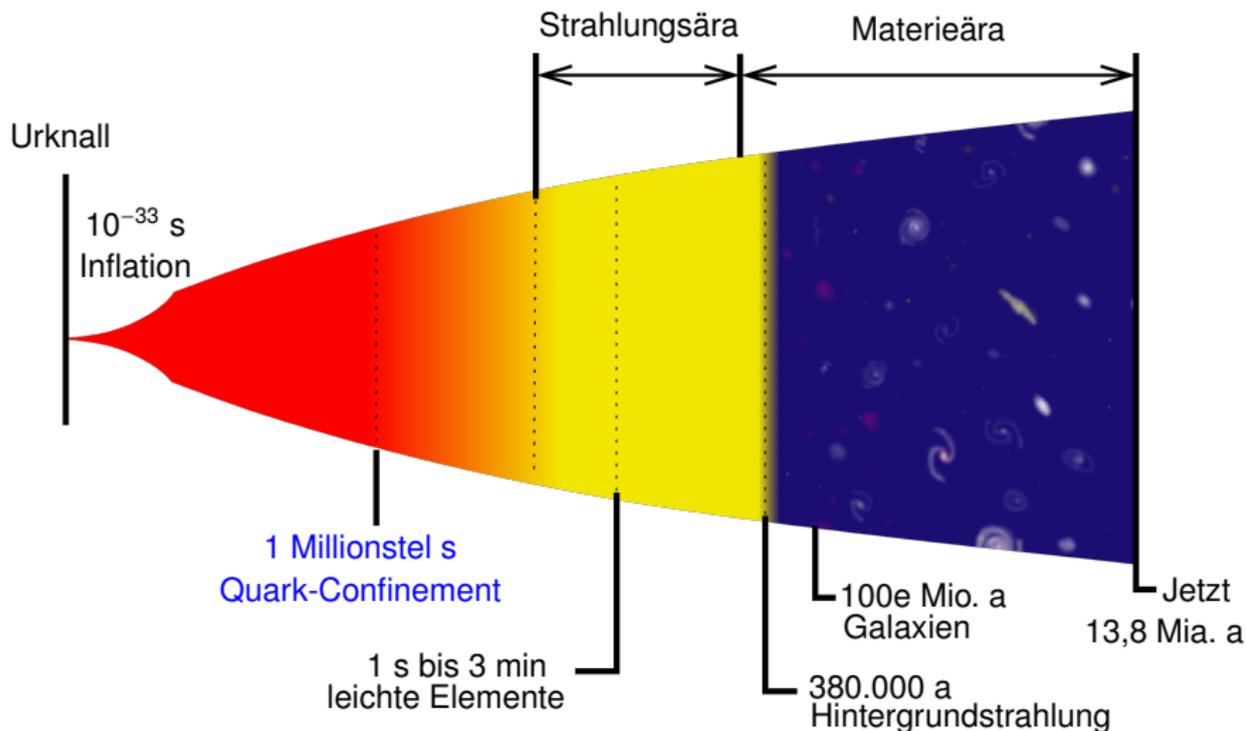
# Urknall und Inflation

- Singulärer Anfang  $a(t = 0) = 0$ : Urknall
- Quantengravitation — kein sicheres Modell!
- Vereinheitlichung von Kräften (?)
- Inflation: Phase  $a(t) \sim \exp(H_i \cdot t)$
- Vielfalt von Inflationsmodellen
- Inflation erklärt  $\Omega_K = 0$  (euklidische Geometrie)
- Inflation erklärt beobachtete Homogenität



Bild: Friedrich Böhlinger

# Heiße Elementarteilchensuppe



# Heiße Elementarteilchensuppe

- Elektroschwache Symmetriebrechung (Higgs!)
- Quarks zu Hadronen bei  $t = 10^{-6}$ s
- Materie vs. Antimaterie I: Hadronen vernichten sich  $t = 1$ s
- Ebenfalls  $t = 1$ s: Neutrinos entkoppeln
- Materie vs. Antimaterie II: Leptonenvernichtung  $t = 10$ s

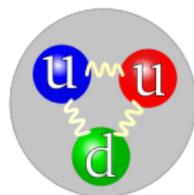
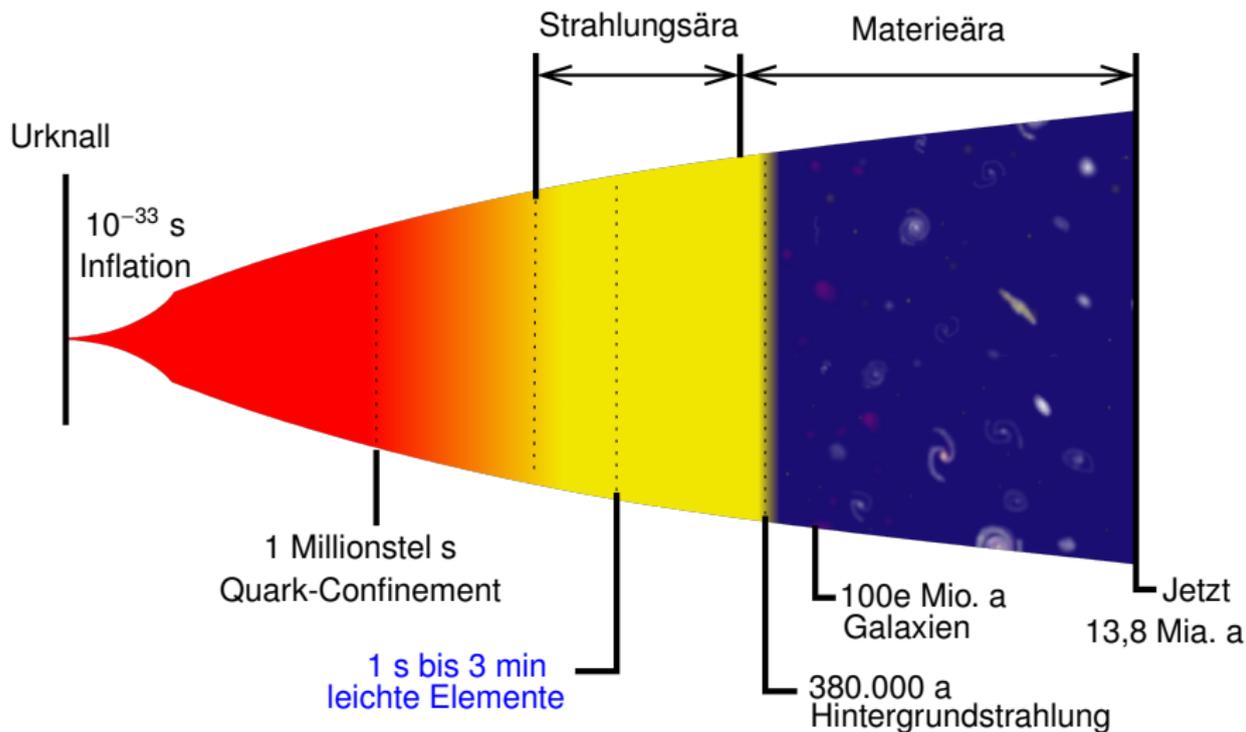


Bild: Arpad Horvath



Bild: ALICE Collaboration/CERN

# Entstehung der leichten Elemente



# Nukleosynthese: Vergleich mit Beobachtungen

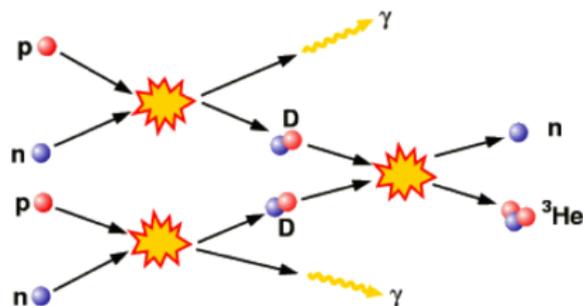
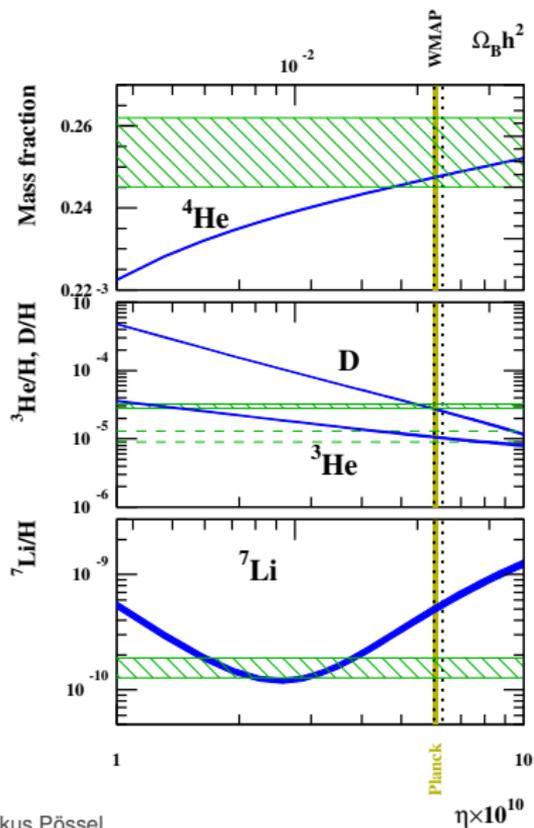
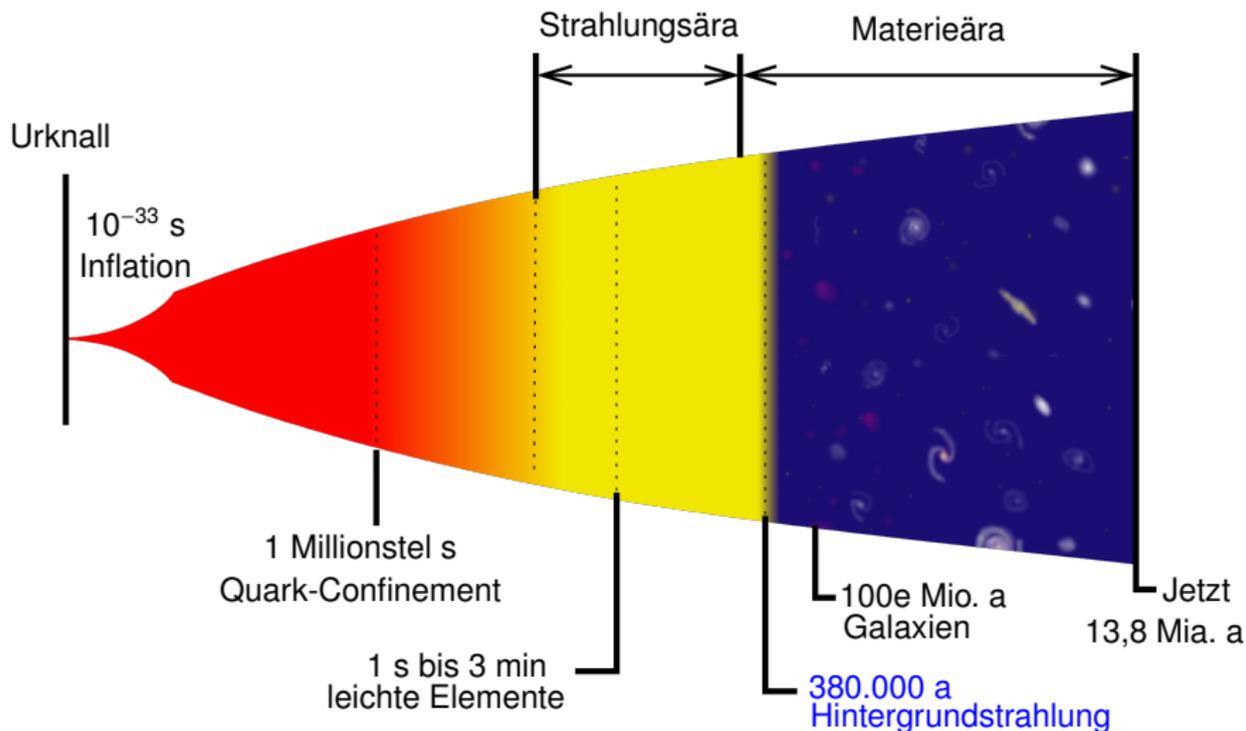


Abbildung links aus Coc 2016

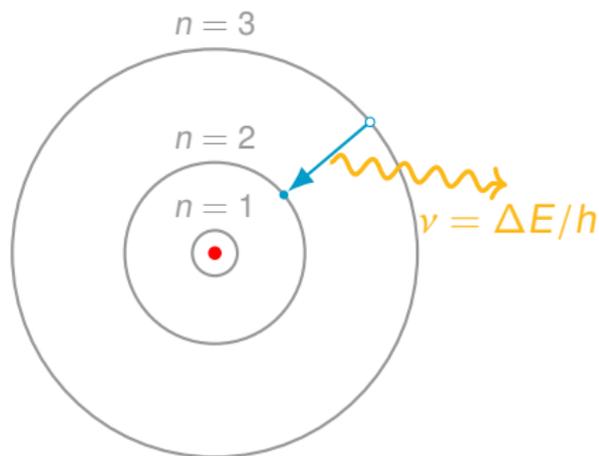
Alles gut bis auf Lithium-7 –  
niemand weiß derzeit, warum

Lösung Lithium-6-Problem: Lind  
et al. 2013

# Kosmische Hintergrundstrahlung



# Rekombinationsphase



Ist das frühe Universum weit genug abgekühlt, finden sich Atomkerne und Elektronen zu Atomen zusammen — das Universum wird durchsichtig bei kosmischer Zeit

$$t_{rec} = 380.000 \text{ Jahre}$$

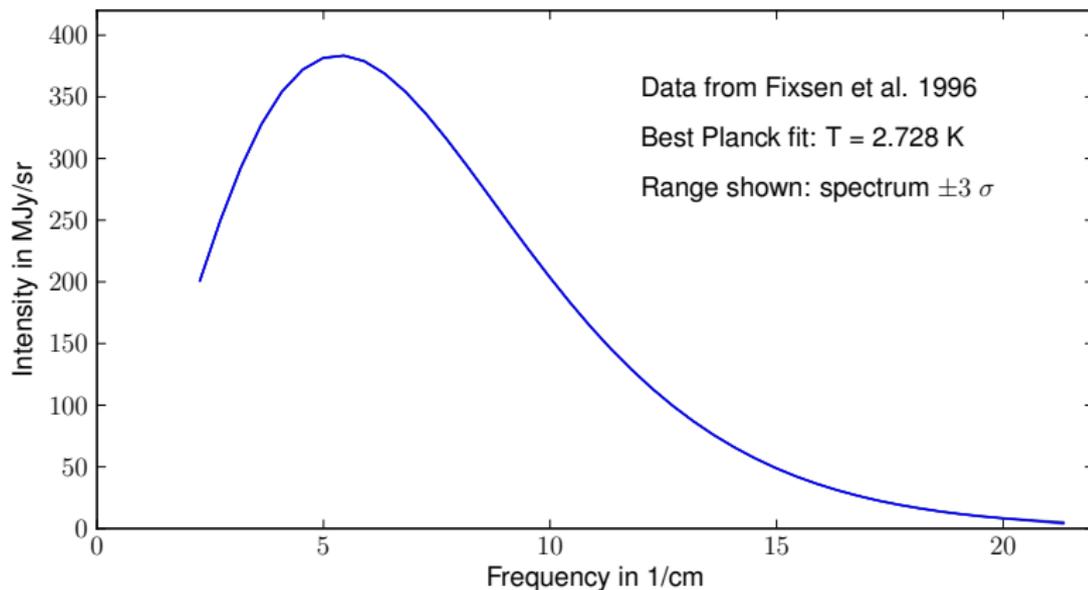
# Freisetzung kosmische Hintergrundstrahlung



Gedankenexperiment: Im Raum verteilte Lampen; instantaner „Lichtblitz“

⇒ wir empfangen jetzt, in diesem Moment die Hintergrundstrahlung von einer Kugel geeigneter Größe um uns herum!

# Planck-Kurve: COBE-FIRAS (Mather et al.)



Daten aus Fixsen et al. 1996 via <http://lambda.gsfc.nasa.gov>

# Inhomogenitäten in der Hintergrundstrahlung

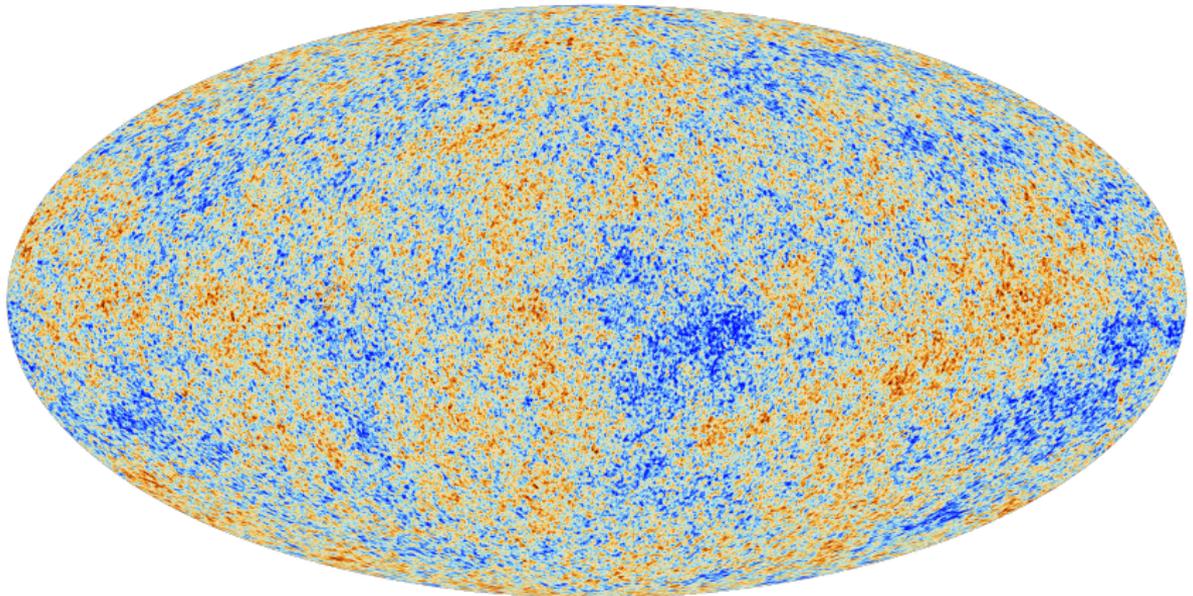
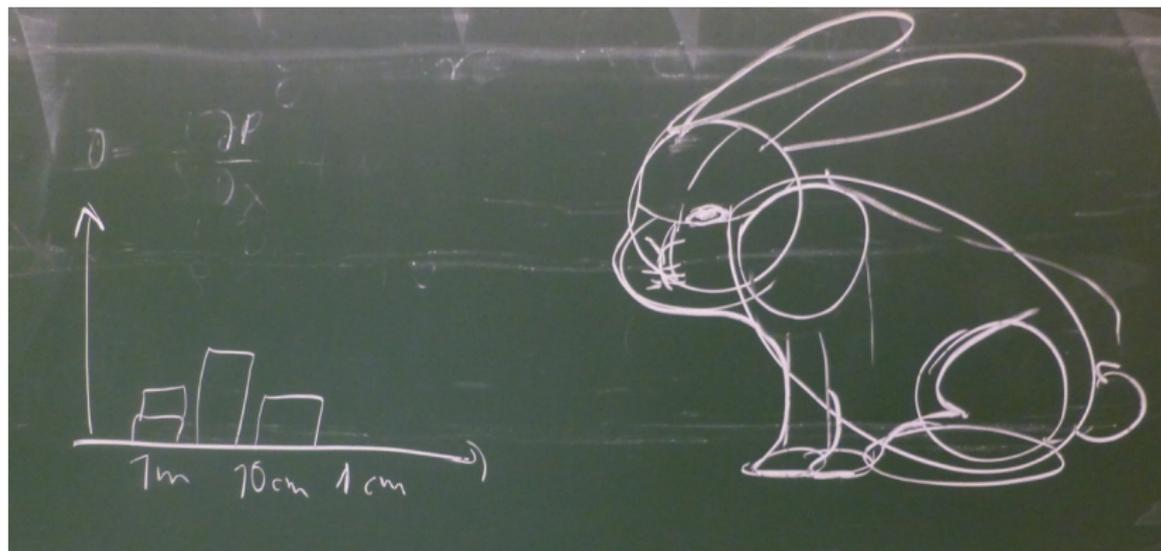


Bild: ESA/Planck Collaboration

# Parameterbestimmung aus der Hintergrundstrahlung



Hilfs-Ellipsen beim Zeichenprozess zeigen an, welche Größenskalen bei der Zeichnung eine Rolle spielen – welche Größenskala wie häufig vorkommt, lässt sich beschreiben (Histogramm)

# Parameterbestimmung aus der Hintergrundstrahlung

Spektrum der Inhomogenitäten hängt von den Parametern ab, z.B.  $\Omega_m, \Omega_b, \Omega_\Lambda$  (insbes. Höhe und Ausprägung der Maxima)

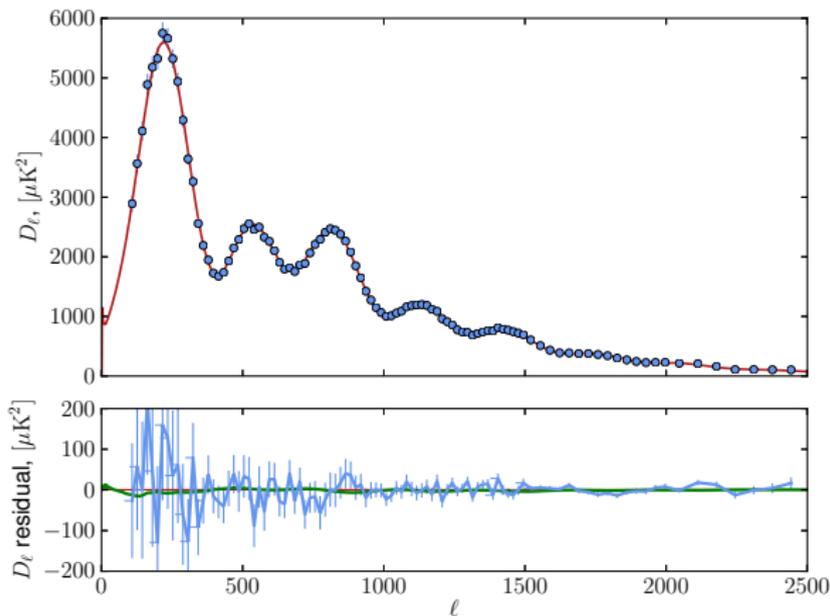


Bild: ESA/Planck Collaboration, A&A 571, A15 (2014)

# Parameterbestimmung

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

$$\Omega_\gamma = 0,005\%$$

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

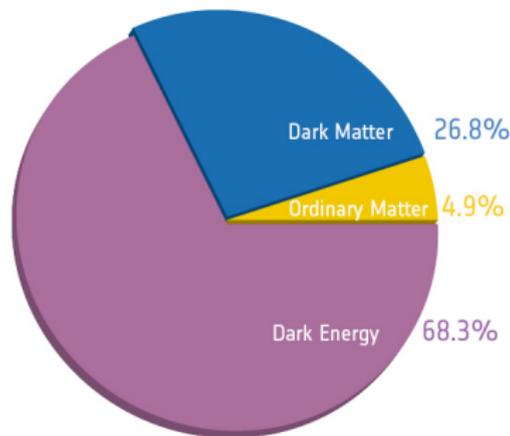


Bild: ESA/Planck Collaboration

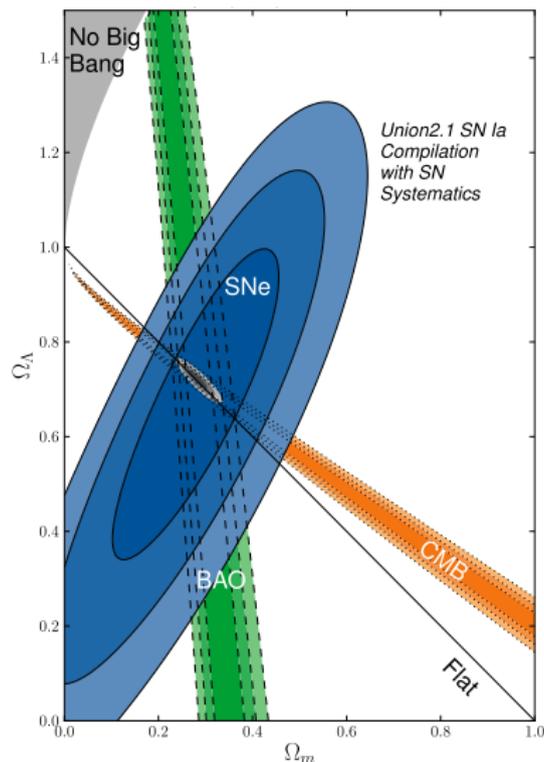
Wobei  $\Omega_b$  = normale (baryonische) Materie (Protonen, Neutronen, ...)

$\Omega_{cdm}$  = dunkle Materie (keine Wechselwirkung mit Licht),

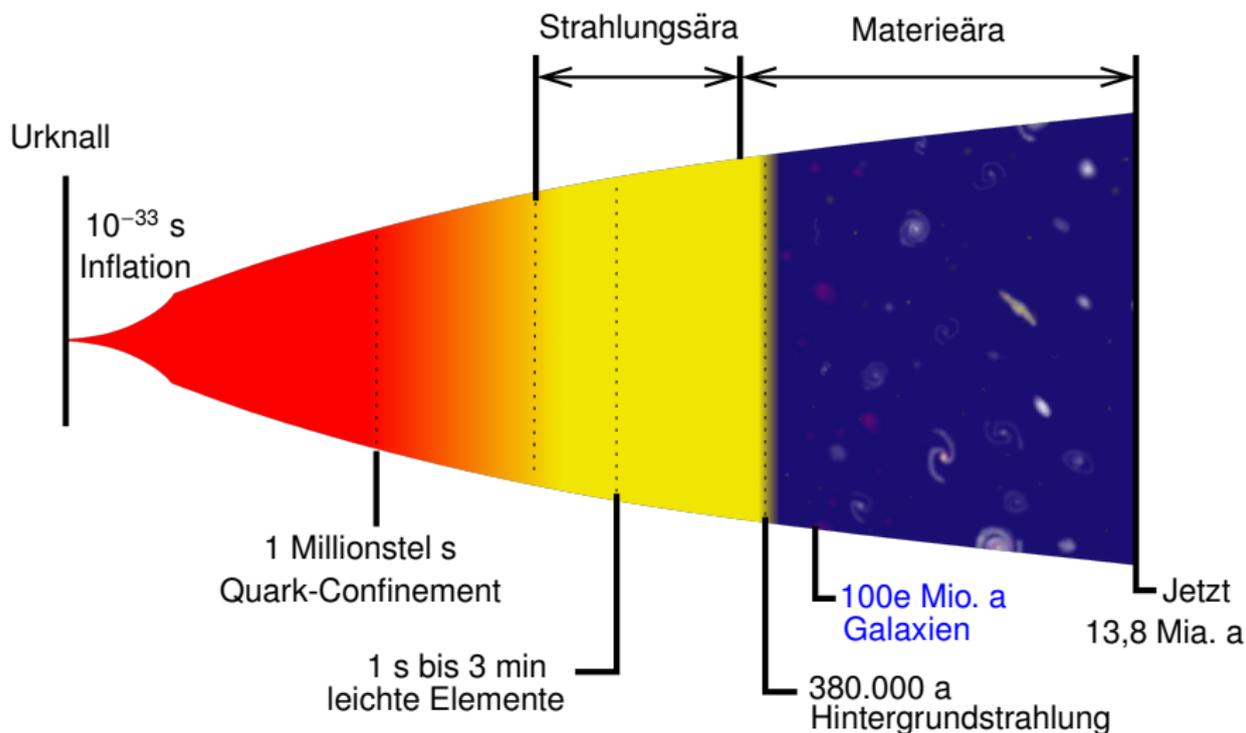
$\Omega_\Lambda$  = (beschleunigende) Dunkle Energie

# Mehr als nur Parameterbestimmung

Suzuki et al. 2011



# Galaxienentwicklung



⇒ Strukturentstehung ab dem nächsten Termin!