

11 Teilchenphysik in der Astrophysik

11.1 Astroteilchenphysik: Ein Überblick

11.2 Standardmodell der Kosmologie

11.3 Thermische Entwicklung des frühen Universums

11.4 Dunkle Materie und Dunkle Energie

11.5 Sternentwicklung: Nukleosynthese der schweren
Elemente

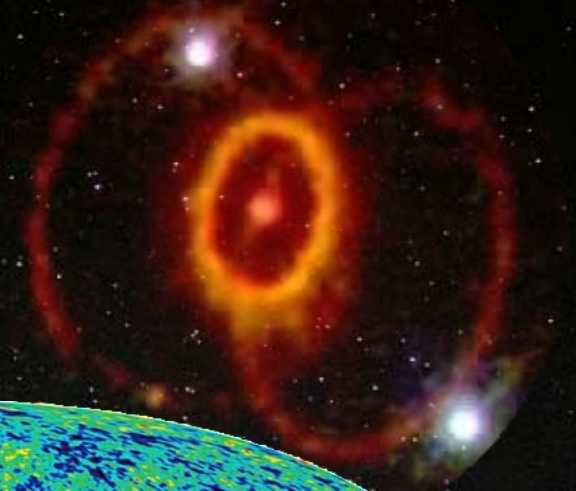
Einleitung

- **Astronomie:** Beobachtung von Objekten und Materie ausserhalb der Erdatmosphäre
- **Astrophysik:** Physikalische Verhalten und dynamische Entwicklung von Himmelsobjekten und Materie
- **Astroteilchenphysik:** Teilchenphysik \leftrightarrow Astrophysik
 - Woraus besteht das Universum?
 - Wie ist das Universum entstanden?
 - Wie wird es sich entwickeln?

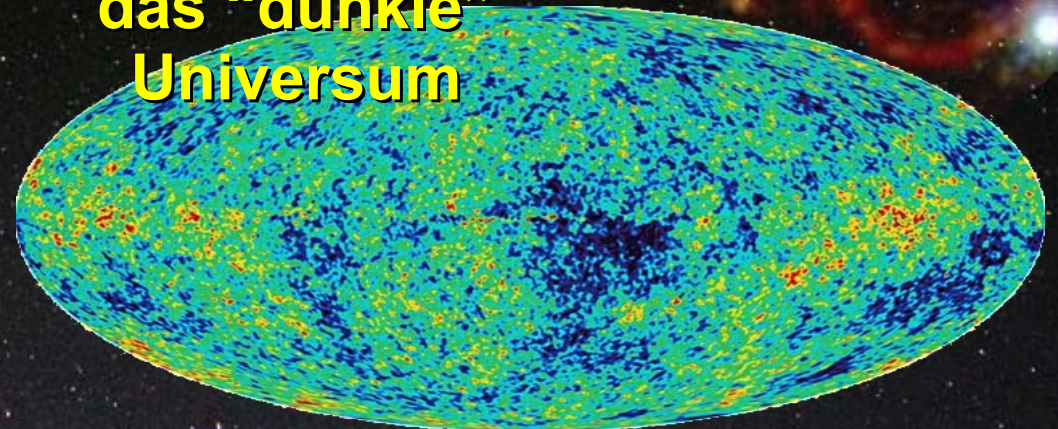
Solare Neutrinos



Neutrino- Astrophysik



**Kosmologie und
das "dunkle"
Universum**



**Astroteilchen-
physik**



**Gravitations-
wellen**



**Gamma-
Astrophysik**



**Kosmische
Strahlung**

Cassiopeia A



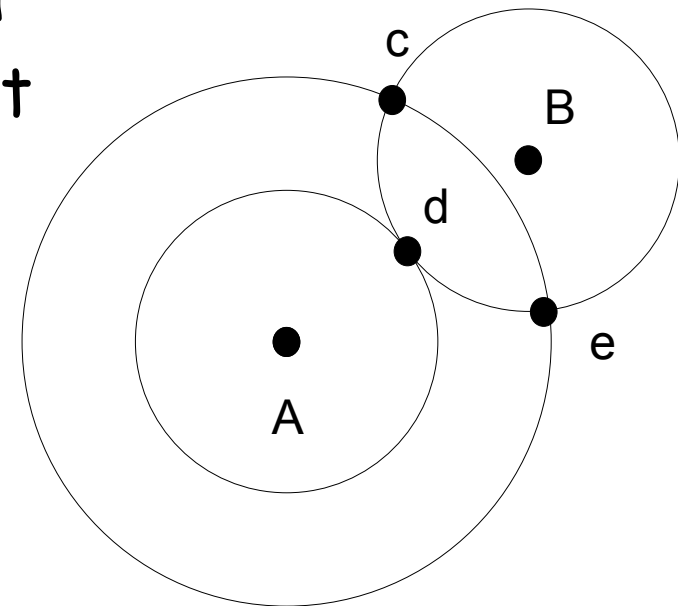
11.1 Standardmodell der Kosmologie

- Grundlage: **Kosmologisches Prinzip** (Verallgemeinerung des **Kopernikanischen Prinzips**).
- Für große Distanzen (>100 Mpc) wird angenommen:
 - Das Universum ist homogen
 - Das Universum ist isotrop
- $\text{Mpc} = \text{Mega-Parsec} = 10^6 \text{ pc}$, $1 \text{ pc} = 3,086 \times 10^{16} \text{ m}$

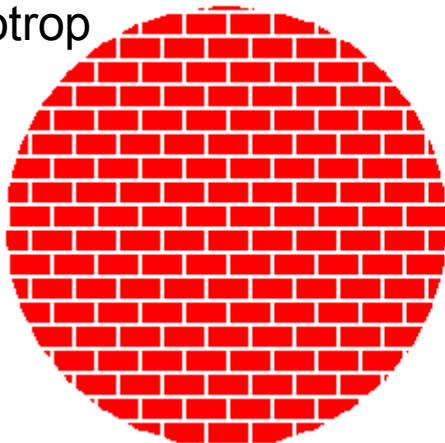
Isotropes und homogenes Universum

- Wenn das Universum für jeden Beobachter isotrop ist, dann ist das Universum auch homogen
- Beobachter A und B sehen isotropes Universum:

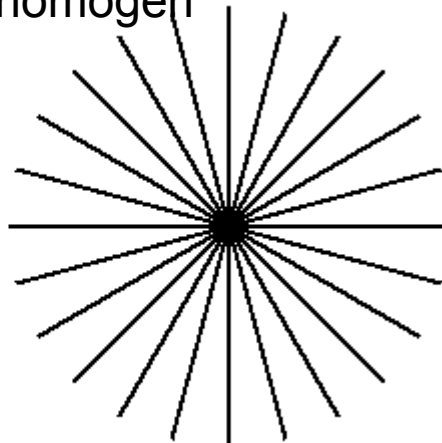
$$\rightarrow c=d=e$$



Homogen, aber nicht isotrop



Lokal Isotrop, aber nicht homogen



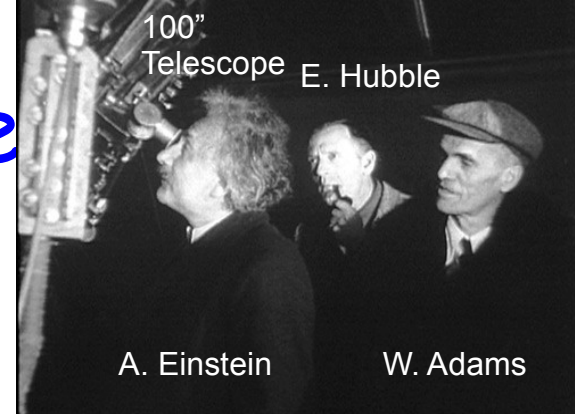
Anthropisches Prinzip (AP)

- AP in Kurzform:
 - Wenn das Universum nicht so beschaffen wäre, wie es jetzt ist, gäbe es uns nicht als Beobachter, der dieses Universum physikalisch beschreiben kann
- Teilweise Widerspruch mit kosmologischen Prinzip
- AP ist hilfreich, um "Fine-tuning"-Problem zu diskutieren
- AP ist in der modernen "Landscape"-Betrachtung ($>10^{500}$ Universen) relevant

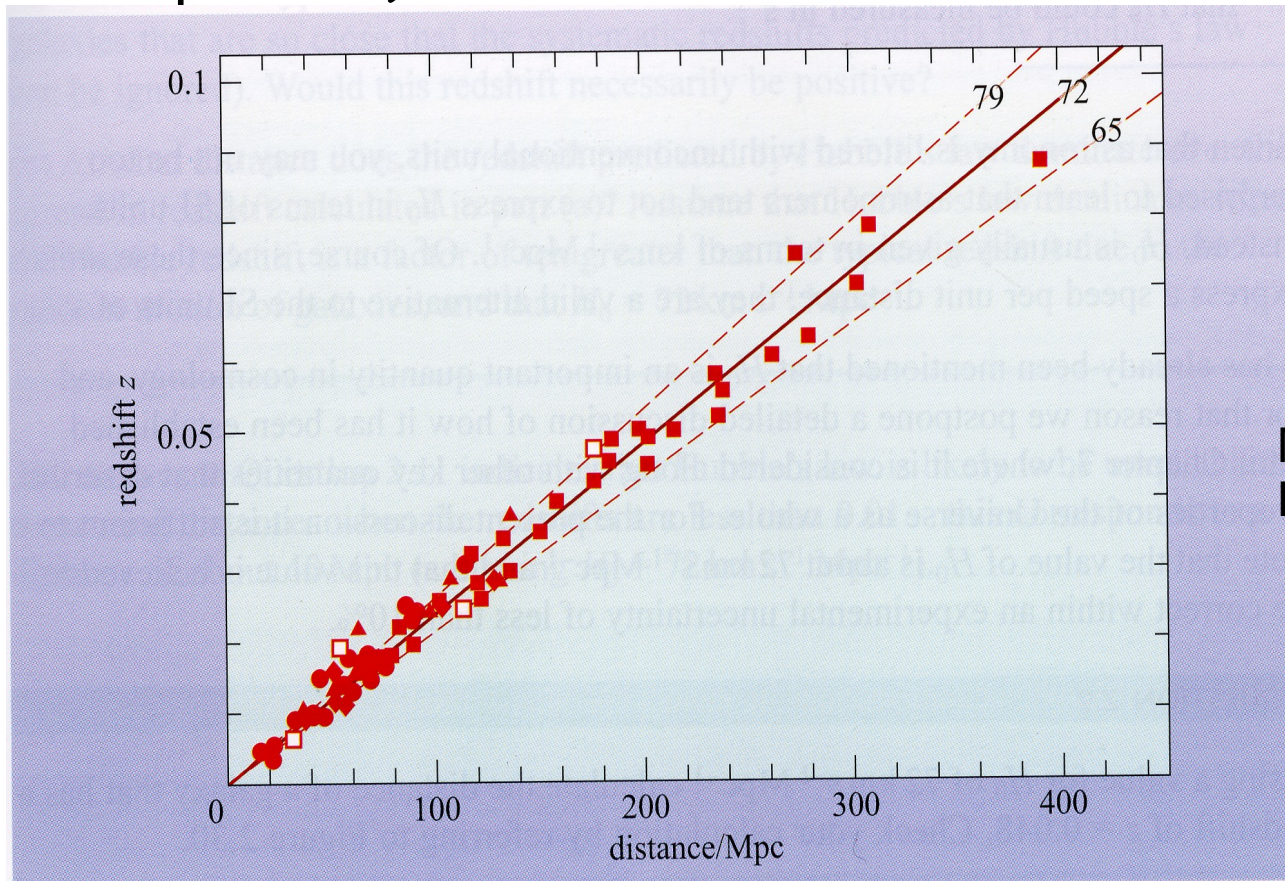
Fundamentale Kosmologische Beobachtungen

- Nachthimmel ist dunkel (->Universum ist endlich, dynamisch)
- Galaxien sind isotrop am Himmel verteilt (kosmol. Prinzip)
- ^4He ist universell mit relativer Häufigkeit: $\sim 25\%$ (primordiale Nukleosynthese)
- Hubbles Gesetz: $z \sim \text{Distanz}$ (Expansion des Universums)
- Älteste bekannte Objekte $\sim 12 \times 10^9$ Jahre (Minimales Alter des Universums)
- Thermische, isotrope Mikrowellenhintergrundstrahlung (CMB)-
>heißer "Big Bang", Dunkle nicht-baryonische Materie, flache, Euklidische Geometrie, Dunkle Energie

Edwin Hubbles Beobachtung de expandierenden Universums



- Beobachtung von "kosmologischer Rotverschiebung" z (spektrale Messung) von Sternen mit bekannter absoluter Leuchtkraft (z.B. Cepheiden) in anderen Galaxien



Hubbles Gesetz:

$$z = DH_0/c$$

$$z = \Delta\lambda/\lambda$$

$$H_0 \sim 75 \text{ km}/(\text{s Mpc})$$

Mögliche Ursachen für
Rotverschiebung:

Dopplereffekt

Gravitationseffekt

Expansion der Raumzeit

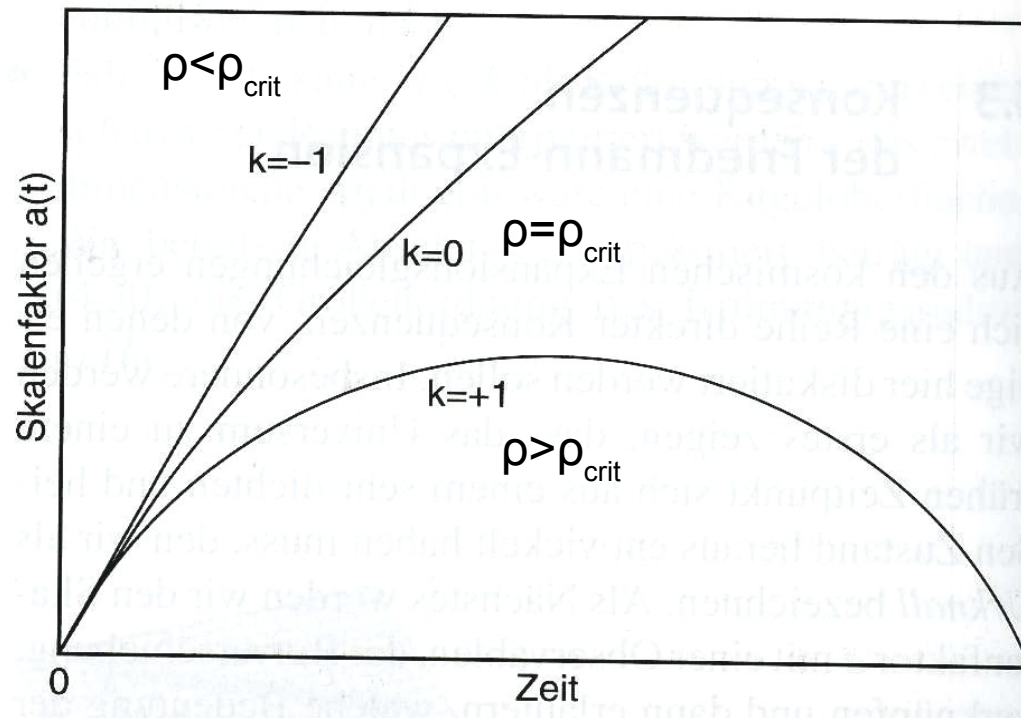
Expandierendes Universum

- **Skalenfaktor $a(t)$** in einem expandierenden Universum
 - Koordinatensystem zur Zeit $t=t_0$: $\mathbf{r}(t_0) = \mathbf{x}$
 - Zu einer Zeit $t>t_0$: $\mathbf{r}(t) = a(t)\mathbf{x}$
 - Homogene Dichte: $\rho = \rho(t)$
- Bewegungsgleichung für $a(t)$: $a(t=t_0)=1, da/dt(t_0)=H_0$
 - Kritische Dichte: $da/dt \rightarrow 0$ (für $H_0 = h \cdot 100 \text{ km}/(\text{sMpc})$)

$$\rho_{\text{cr}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1.88 \times 10^{-29} h^2 g/\text{cm}^3 \sim 6 m_p/\text{m}^3$$

Ein einfacher Fall

- Lösung für den einfachen Fall eines euklidischen Universums (keine intrinsische Krümmung der Raum-Zeit)->Lösung für $a(t)$
- Singularität für $t \rightarrow 0$ ($a(0)=0$): Big Bang!



Der allgemeine Fall für $a(t)$: Friedmann-Lemaître-Gleichung

- Materie: Strahlung kosmologische Konstante

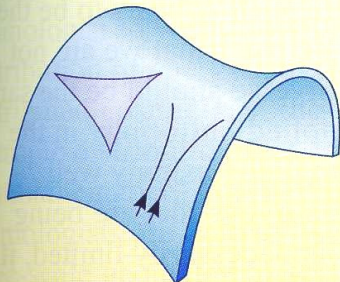
$$\Omega_m = \frac{\rho_{m,0}}{\rho_{cr}}$$

$$\Omega_r = \frac{\rho_{r,0}}{\rho_{cr}}$$

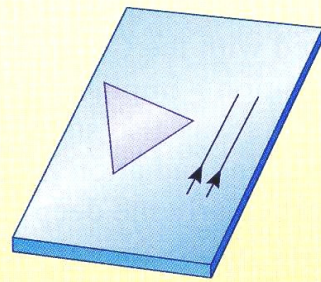
$$\Omega_\Lambda = \frac{\rho_v}{\rho_{cr}} = \frac{\Lambda}{3H_0^2}$$

$$H^2(t) = H_0^2 \left[a^{-4}\Omega_r + a^{-3}\Omega_m + a^{-2} \underbrace{(1 - \Omega_m - \Omega_\Lambda)}_{=-K} + \Omega_\Lambda \right]$$

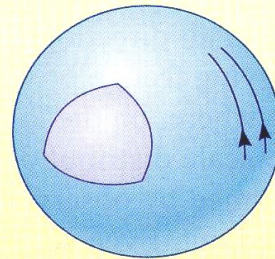
=-K



negative curvature



zero curvature



positive curvature

Geometrie der
Raumzeitkrümmung
Hyperbolisch ($K < 0$)
Flach (Euklidisch) $K = 0$
Sphärisch $K > 0$

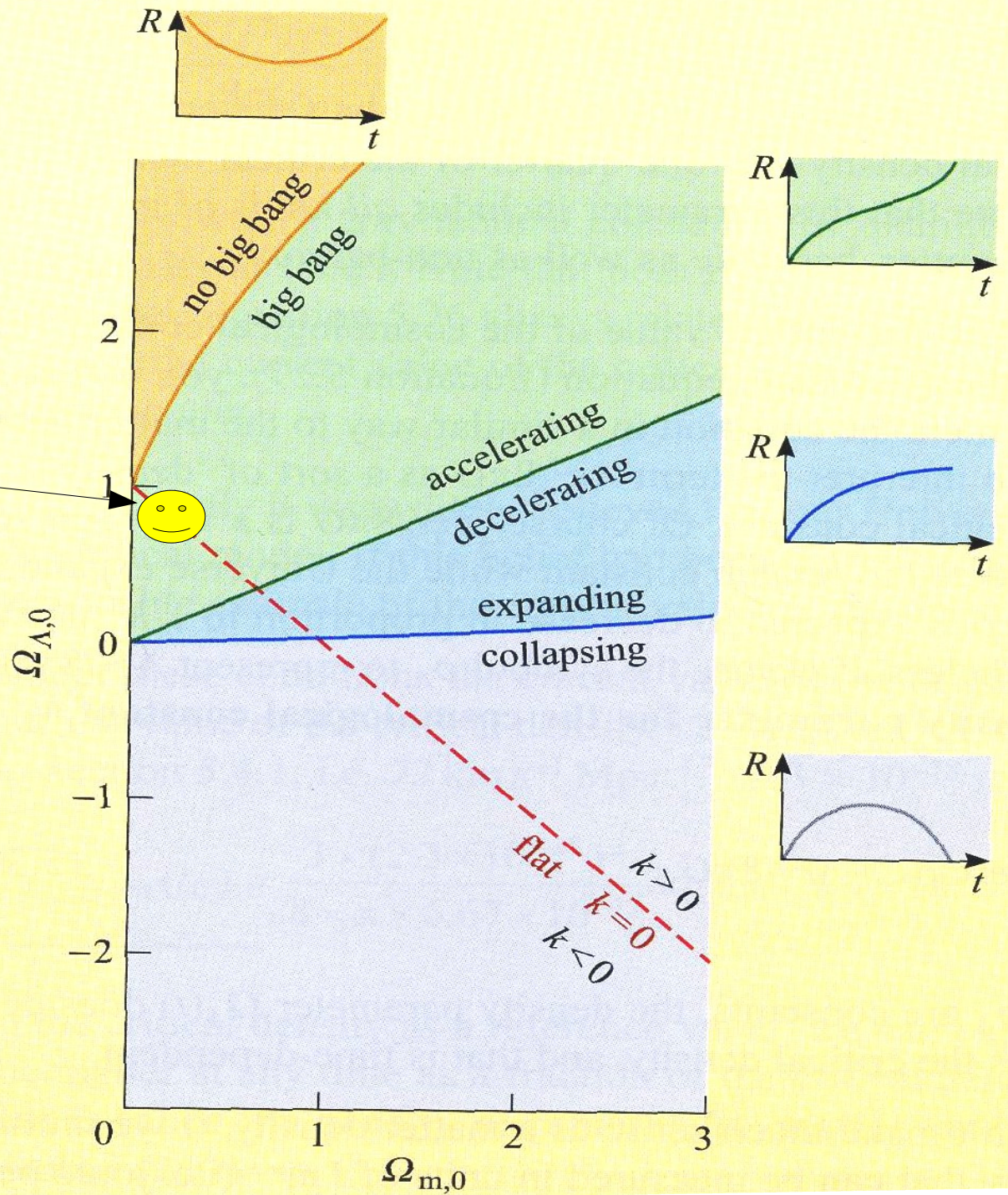
“unsere”
Kosmologie!

$$\Omega_{\Lambda} \sim 0.7$$

$$\Omega_m \sim 0.3$$

$$h \sim 0.7 \quad (H_0 \sim 70 \text{ km/s/Mpc})$$

$$t = 14 \times 10^9 \text{ a}$$

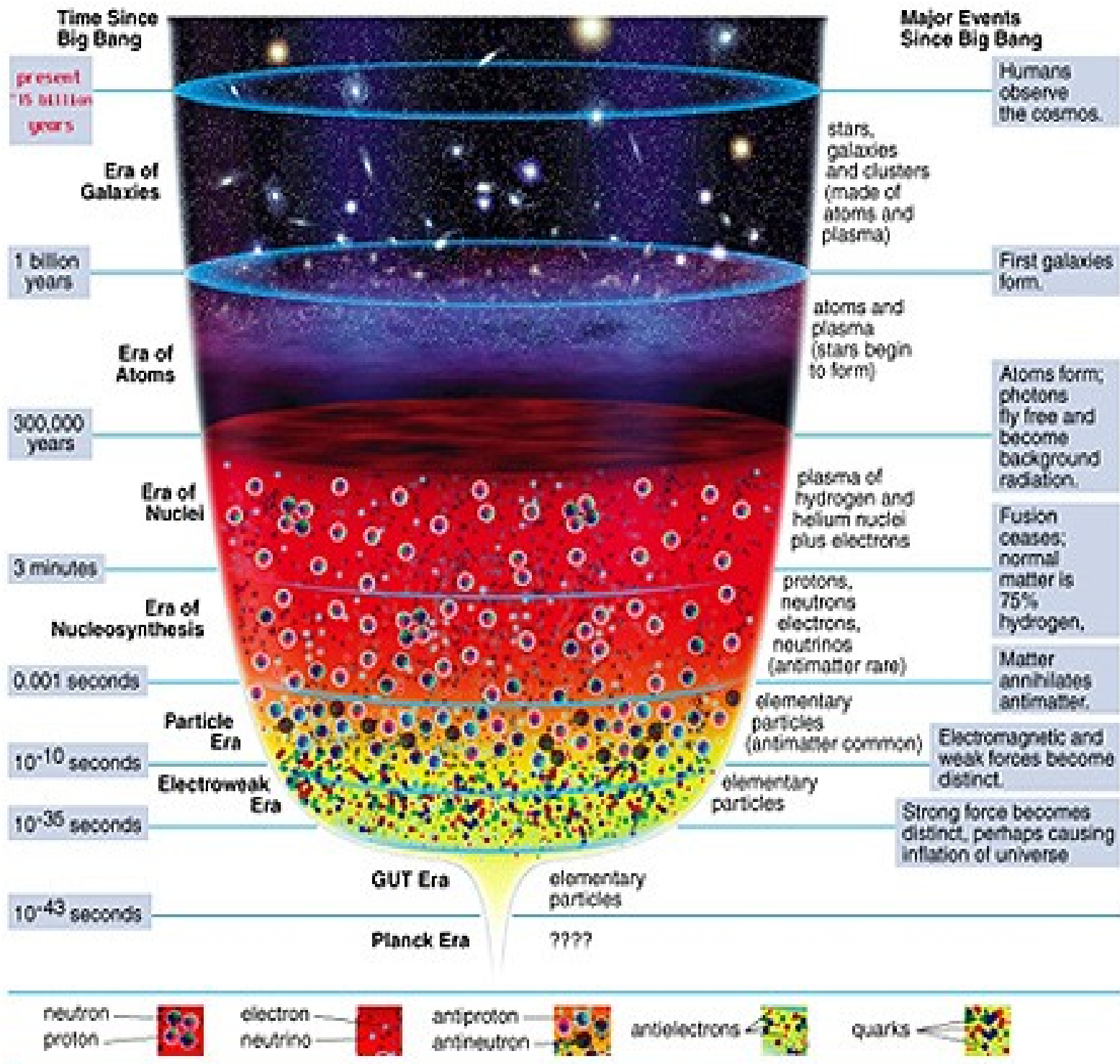


11.3 Thermische Entwicklung des frühen Universums

- WO bzw. WANN fangen wir an?
- Wir betrachten Raum-Zeit als Kontinuum (Gravitation ist klassische Theorie)
- Für extrem hohe Energien, kurze Zeit nach der Singularität, sind alle fundamentalen Kräfte vermutlich vereinheitlicht gewesen - keine kohärente Theorie möglich!
- Natürliche Größen: Planck-Einheiten (aus \hbar, G, c):

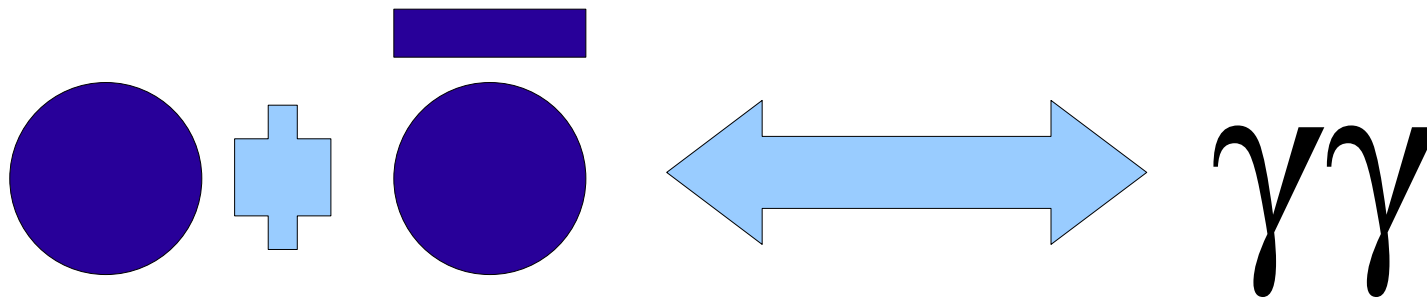
$$t_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5 \times 10^{-44} \text{ s} \quad l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 10^{-35} \text{ m}$$

$$m_p = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \approx 2 \times 10^{-8} \text{ kg} \approx 10^{19} \text{ GeV}/c^2$$



Vor 14 Milliarden Jahren..

- $t < 10^{-43}$ s: Planck-Ära, Vereinheitlichung aller 4 Kräfte, Quantisierung von Raum-Zeit? $T > 10^{32}$ K $\rightarrow 10^{19}$ GeV
- $t \geq 10^{-43}$ s: Gravitation entkoppelt, elektroschwache und starke WW gleich stark (GUT). Elementare Teilchen entstehen und zerstrahlen: Quarks, Leptonen, Eichbosonen, Higgs, ... im thermischen Gleichgewicht laufen Annihilation und Erzeugung mit gleicher Rate

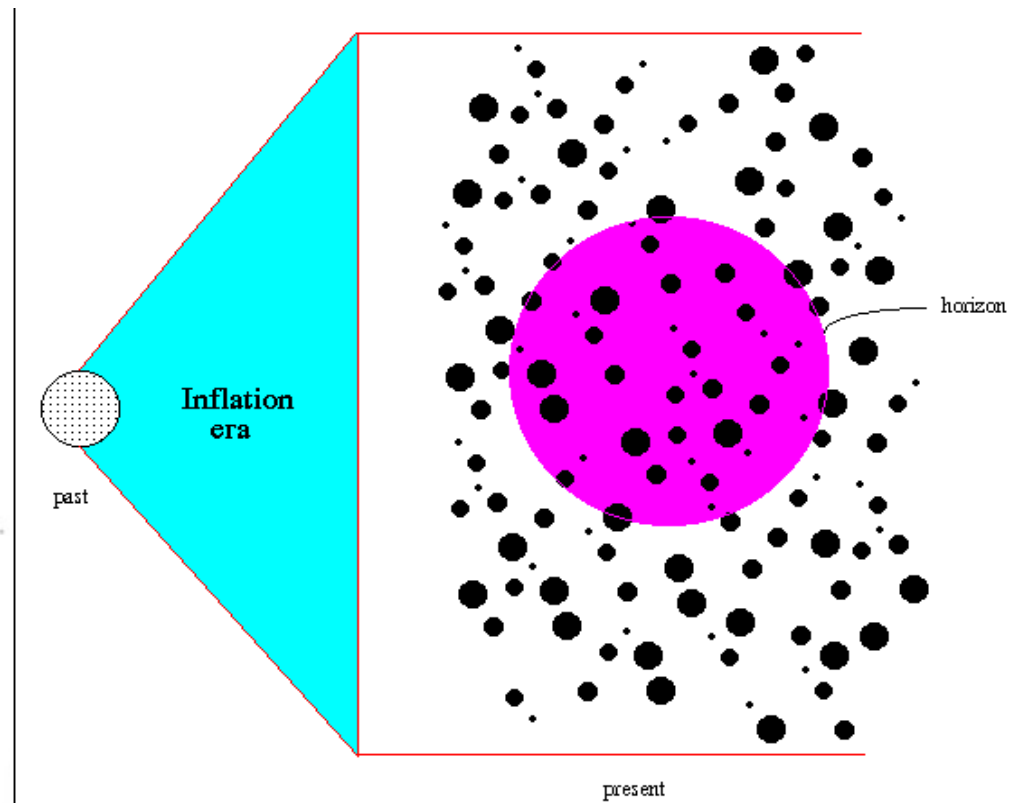
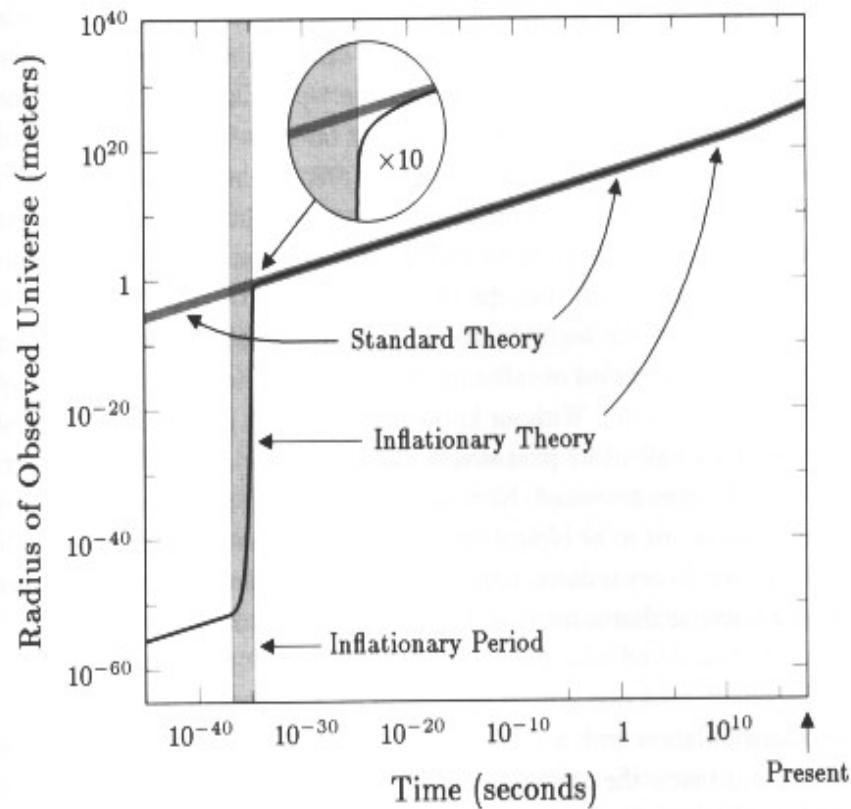


Teilchen

Antiteilchen

Inflation

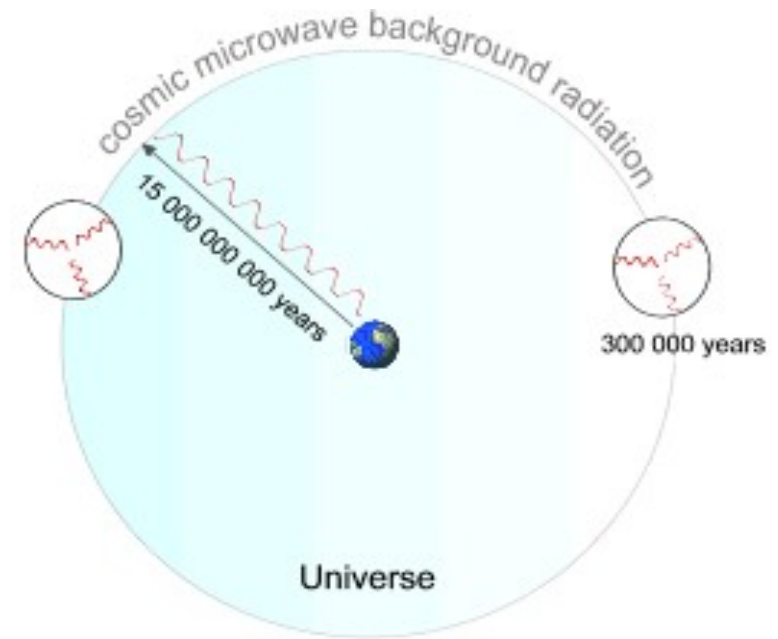
- 10^{-35} s - 10^{-32} s: Phase kurzzeitiger Expansion: 10^{-50} m \rightarrow 1 m



Inflation wirkt wie ein gigantisches Vergrößerungsglas!

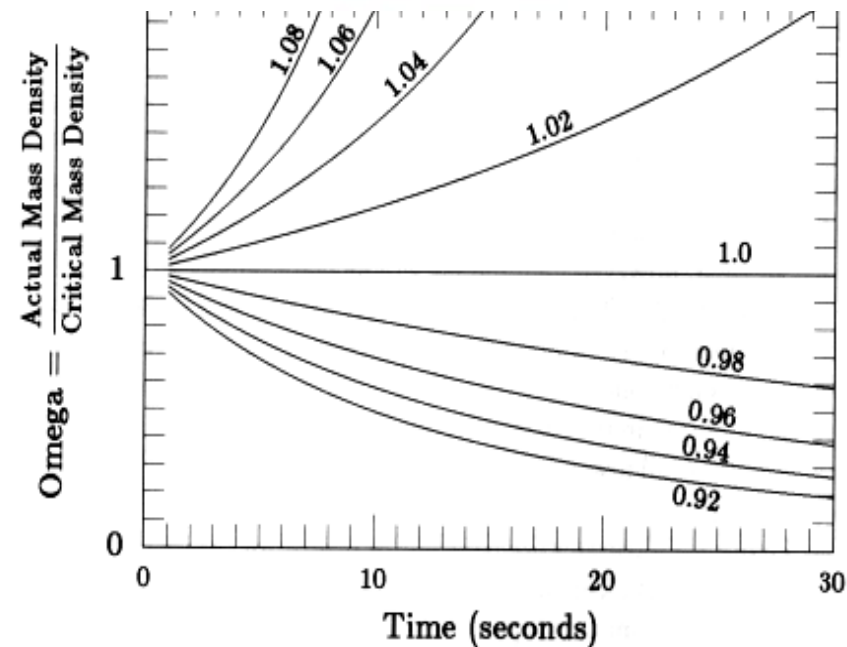
Einschub: Warum wir Inflation brauchen

- Horizont-Problem: Warum ist der CMB nahezu isotrop?
- Flachheits-Problem (oder: warum Bleistifte nicht an der Spitze stehen)



- $0.98 < \Omega_0 < 1.02$

- $\frac{1}{1 + \frac{0.02}{1+z}} < \Omega < \frac{1}{1 - \frac{0.02}{1+z}}$

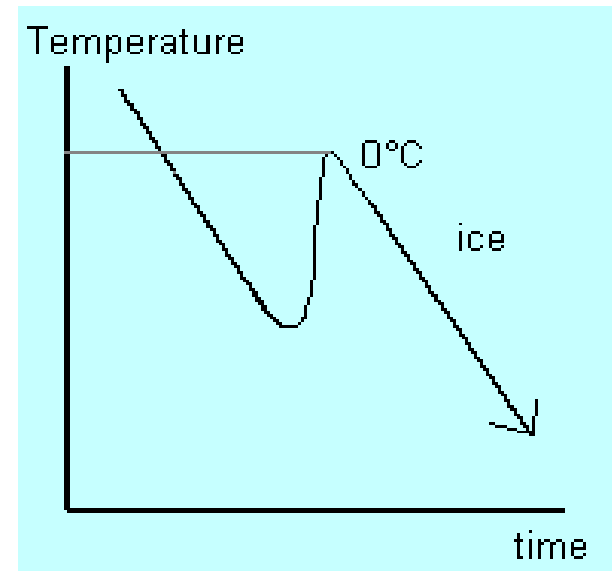
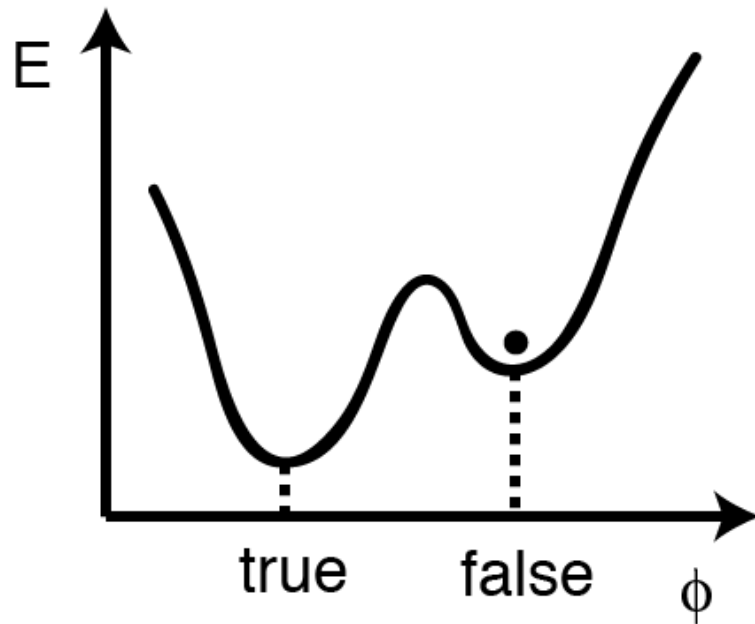


Einschub: Wie Inflation funktionieren könnte

- Es wird eine hohe Vakuumenergiedichte benötigt (ähnlich kosmologische Konstante): "Inflaton"
- Abkühlende Universum wird in einem "falschen" Vakuum gefangen
- Schnelle Expansion, bis Grundzustand erreicht wird (analog zu unterkühltem Wasser)
- Abgabe der Energie: Aufheizung des Universums
- Inflaton könnte am Phasenübergang, der zur Entkopplung der starken Wechselwirkung führte, beteiligt sein

Inflaton-Potenzial

Analog: Unterkühltes Wasser



Nach der Inflation..

- $t \sim 10^{-33} \text{ s}$: Universum bei $T \sim 10^{28} \text{ K}$
- $t \sim 10^{-12} \text{ s}$: Elektromagnetische und schwache Wechselwirkung spalten auf $T \sim 10^{16} - 10^{15} \text{ K}$ bzw. $E = 10^{11} \dots 10^{12} \text{ eV}$ - Phasenübergang
- $t \sim 10^{-12} \dots 10^{-6} \text{ s}$: Quarks und Gluonen im thermischen Gleichgewicht - Quark-Gluon-Plasma
- $t \sim 10^{-5} \text{ s}$: Quarks und Gluonen kondensieren zu Barionen und Mesonen ($T = 2 \times 10^{12} \text{ K}$ bzw. $E = 200 \text{ MeV}$)
- $t \sim 10^{-4} \text{ s}$: Protonen zerstrahlen **nicht** vollständig (CP-Verletzung: Bariogenese!) $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$

Einschub Bariogenese

- Übersichts-Artikel: Dolgov et al. 1997 (hep-ph/9707419)
- Asymmetrie zwischen Barionen und Antiteilchen

$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma}$$

- Wie groß ist diese Asymmetrie (η)?
 - Wir zählen alle Barionen im Universum...
 - Wir zählen alle Photonen im Universum..
 - Und wir nehmen an, dass keine Antiteilchen existieren

Wieviele ~~Sterne~~ Barionen sind am Himmel

Sonnenmasse = $2 \times 10^{30} \text{ kg}$

- Anzahl an Galaxien: $N_{\text{gal}} \approx 10^{11}$
- Typische Masse einer Galaxie: $M_{\text{gal}} \approx 10^{11} M_{\odot}$
- Zahl der Atome / $M_{\odot} = 1.2 \times 10^{57}$ Atome
- Gesamtzahl: $N_{\text{bar}} = N_{\text{gal}} \cdot M_{\text{gal}} \cdot 1.2 \times 10^{57} = 1.2 \times 10^{79}$
- Dichte $n_{\text{bar}} = N/V$ mit $V = 4\pi/3 r^3 = 1.4 \times 10^{86} \text{ cm}^3$:
 $n_{\text{bar}} = 8.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-3}$
- Dichte der CMB-Photonen: $n_{\gamma} = 410 \text{ cm}^{-3}$

$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_{\gamma}} \approx 2 \times 10^{-10}$$

Genauere Analyse
 $2.6 < \eta / 10^{-10} < 6$

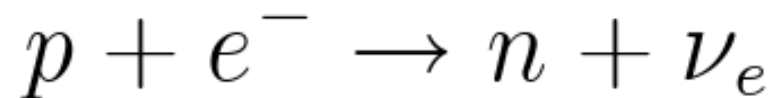
Weiter geht es..Barionen sind da

- Photonen dominieren mit ca. 10^{10} Photonen/Barion!
- $t \sim 1s$: $T=10^{10}$ K bzw. $E=1$ MeV

- Neutronen fangen an häufi $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$



dominant: Zerfall



Einfangreaktionen selten!

- Schwache WW "friert" aus
- Neutrinos entkoppeln
- Protonen werden gegen Neutronen angereichert

Nukleosynthese - drei Minuten..

- Nach Bariogenese: $n/p \sim \exp(-Q/T) \sim 1/6$ mit $Q=1,293$ MeV

- Neutronzerfall ($t_{1/2}=615$ s): $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

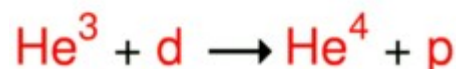
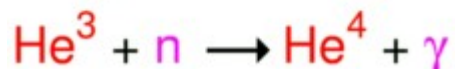
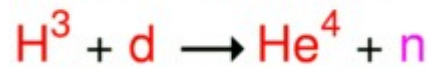
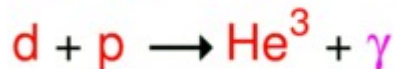
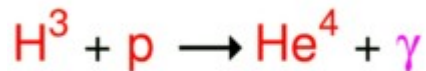
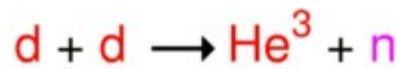
- Deuteriumbildung ($t > 100$ s, wenn $kT < 0,1$ MeV)

$n/p \sim 1/7$

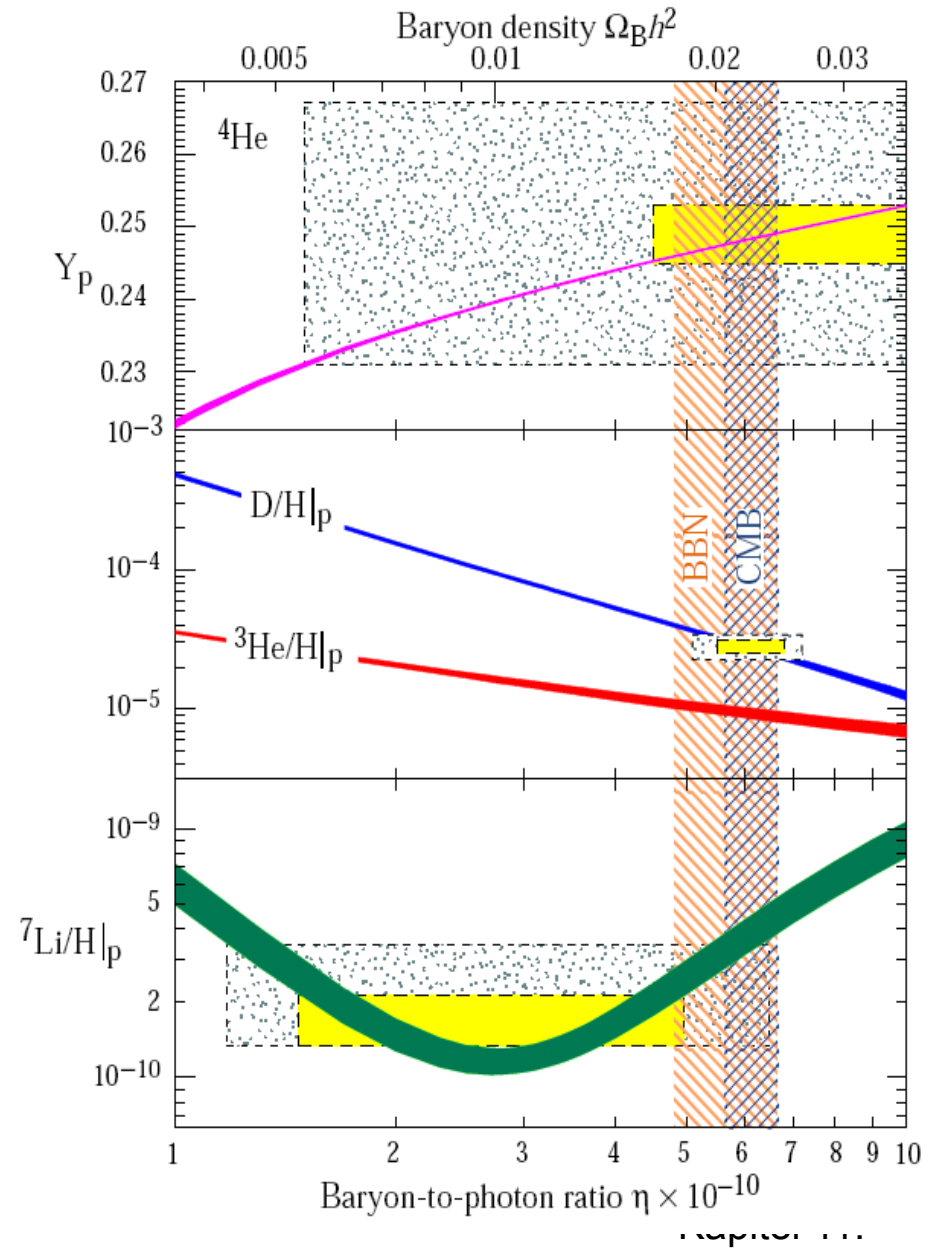
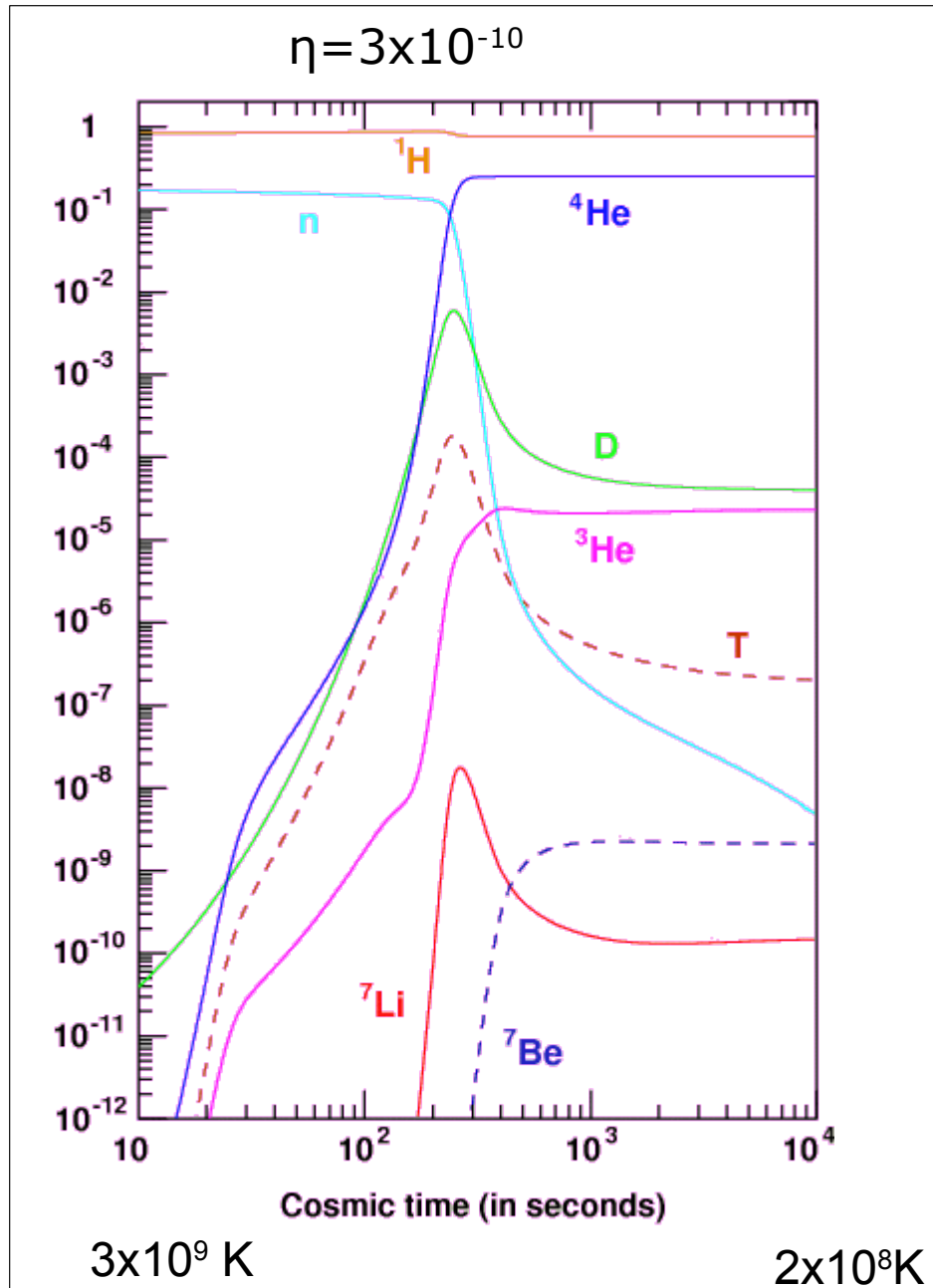


- Sobald Deuterium vorhanden ist:

- ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$, ${}^3\text{H}$ entstehen



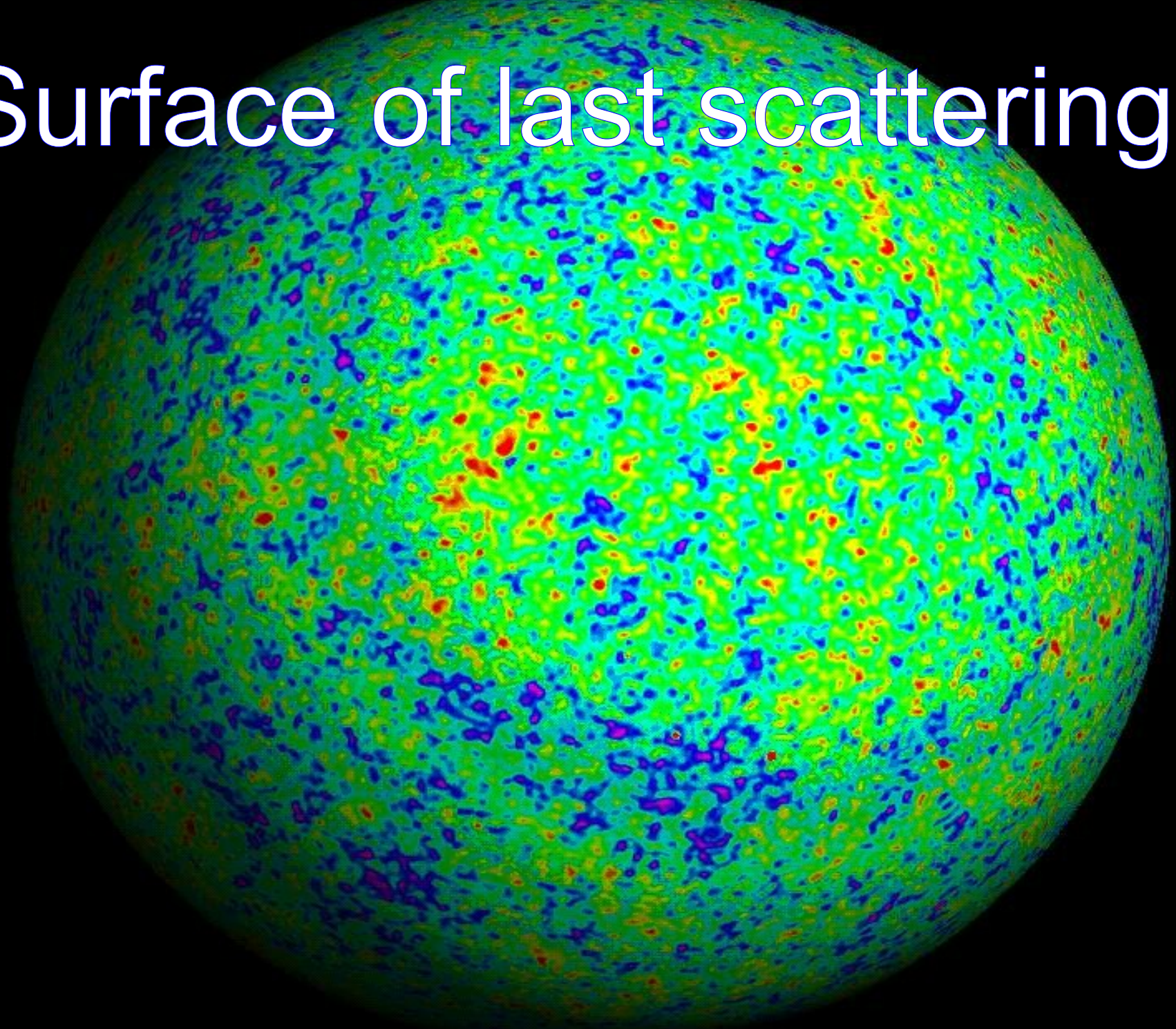
Zeitliche Entwicklung der Massenhäufigkeiten



Nach der Nukleosynthese

- $t \sim 1000$ s: Nukleosynthese-Prozesse abgeschlossen, Expansion und weitere Abkühlung des Plasmas (e, Nukleide, Photonen). Photonen streuen an freien Elektronen (optisch dick)
- $t \sim 300\ 000$ Jahren: $T \sim 3000$ K bzw. $\sim eV$: Kombination von $e+p \rightarrow H$ Atomen! Photonen entkoppeln
 - Übergang Strahlung \rightarrow Materiedominiertes Universum ($E_\gamma = 1$ eV, $E_p = GeV$)
 - Sternentstehung kann (im Prinzip) losgehen..

Surface of last scattering

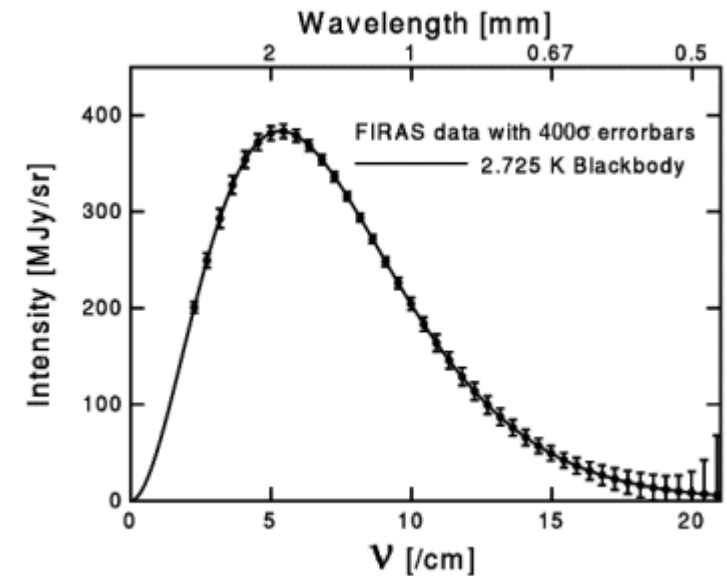


Energiespektrum des CMB

- Spektrum eines Schwarzkörpers:

$$I(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

- Temperatur: $T=(2,728 \pm 0,002)$ K
- Nahezu isotrop: $\Delta T/T \sim 10^{-5}$
- Genaue Vermessung durch Satelliten WMAP, PLANCK



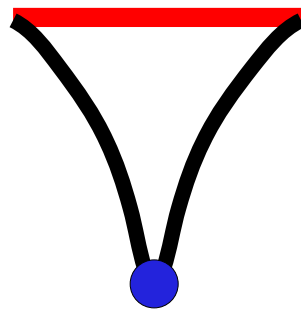
Ursachen für die Anisotropien

- Akustische Wellen in Plasma im thermischen Gleichgewicht:
 - Höhere Dichte: Kontraktion durch Gravitation der Barionen->Aufheizung
 - Heißes Plasma: Größerer Strahlungsdruck
 - Wenn Strahlungsdruck größer als Anziehung durch Gravitation: Expansion und Abkühlung
 - Das kühle Plasma kontrahiert wieder..
- Zur Zeit t_{rec} entkoppeln Photonen: Momentaufnahme des oszillierenden Plasmas (verschiedene Moden)

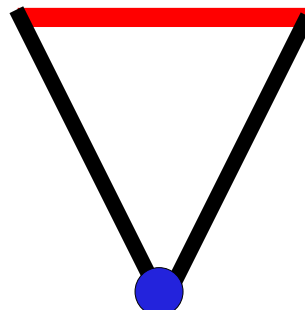
Größte Wellenlänge

- Akustische Wellen im relativistischen Plasma $c_s \sim c/\sqrt{3}$
- Maximale Wellenlänge: $\lambda = t_{\text{rec}} c_s \approx r_H(t_{\text{rec}})/\sqrt{3}$
- t_{rec} : Zeit bis zur Rekombination
- Entsprechende Winkelskala: $\theta = \lambda/D_A \approx 1^\circ$ ($\Omega = 1$)
- D_A : Winkeldistanz

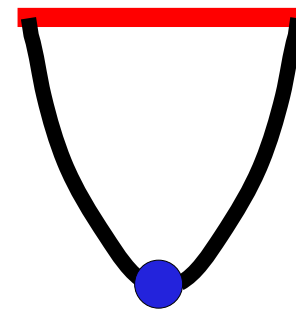
Beobachter sieht
eine Einheitslänge in
verschiedenen
Raumkrümmungen



$K < 0$

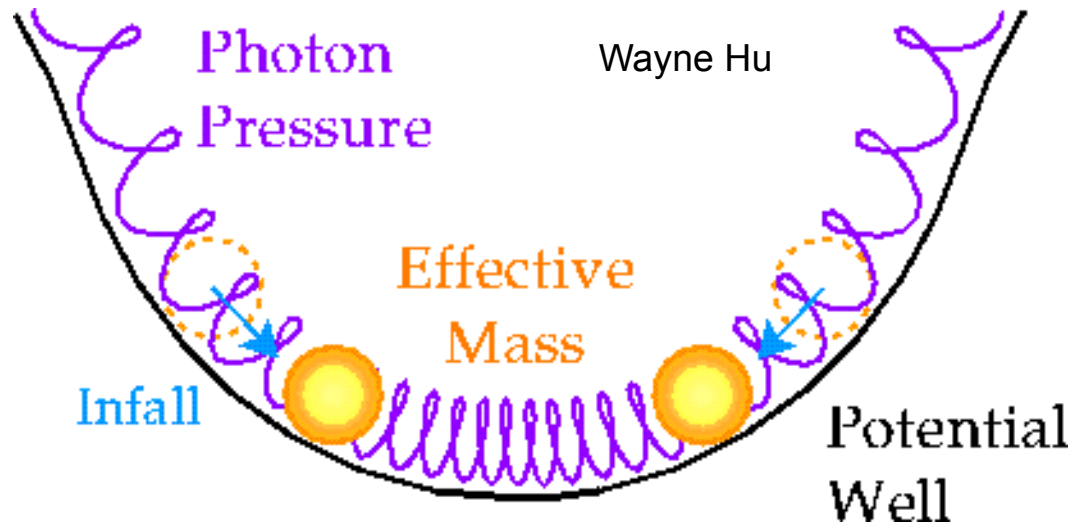


$K = 0$



$K > 0$

Analogie



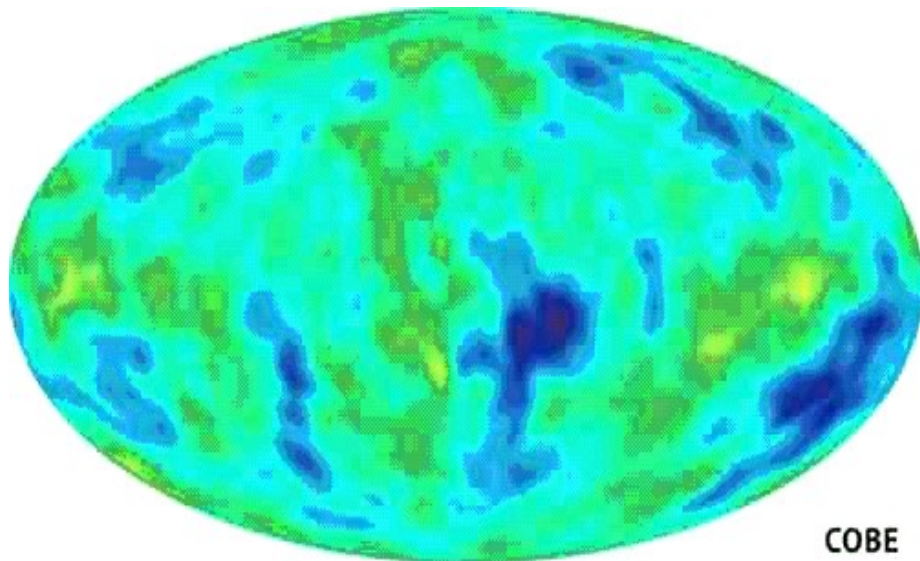
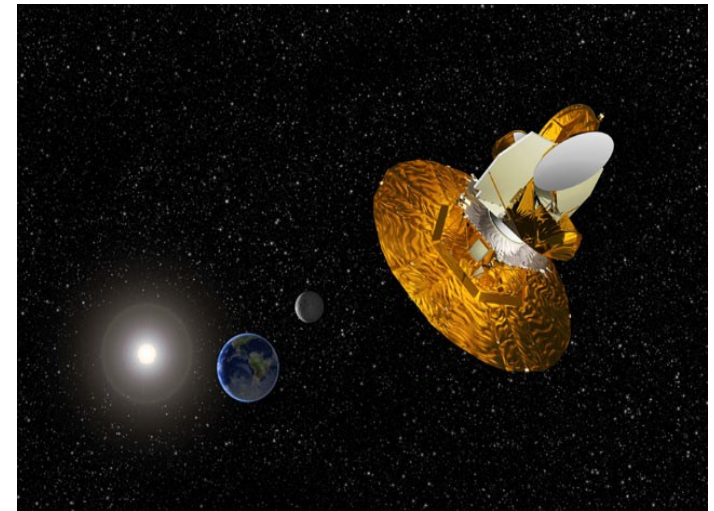
- Wir sehen akustische Wellen
- Photonen entsprechen der "Feder"
- Kopplung an Elektronen und Barionen über Strahlungsdruck
- Gravitation als Rückstellkraft

Quantitative Auswertung der Anisotropien

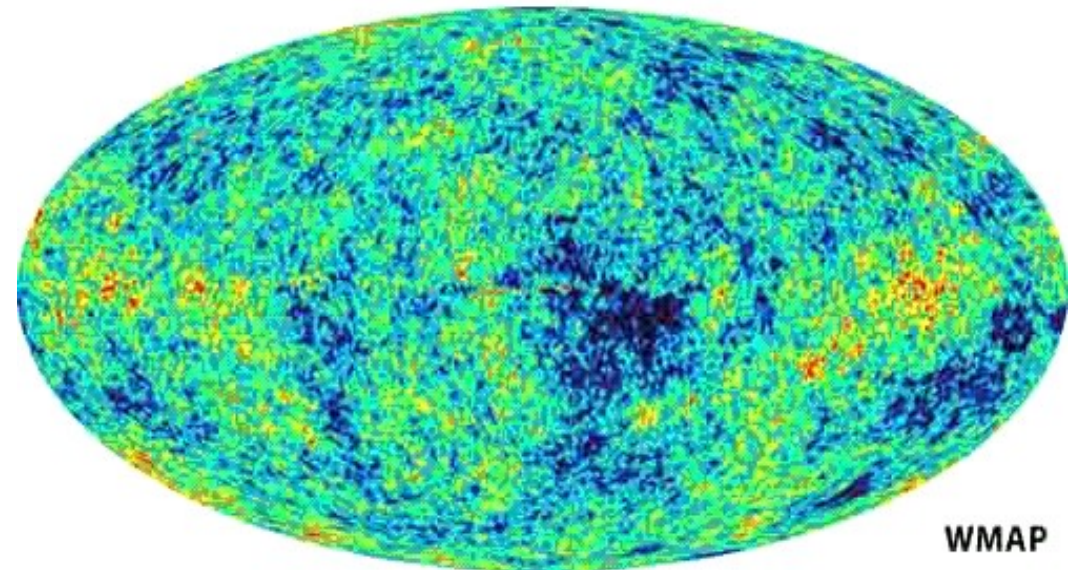
- Zerlegung in Kugelflächenfunktionen $Y_{\ell m}(\theta, \varphi)$
- Kugelflächenfunktionen sind vollständig und orthonormal
- Koeffizienten c_ℓ (nach Summierung über m) und das Leistungsspektrum $\ell(\ell+1)c_\ell$
- Multipolmoment ℓ entspricht einer Winkelskala $\theta \sim 180^\circ / \ell$
- Messungen mit WMAP und bei kleinen Winkeln Ballonen (bzw. bald PLANCK)

WMAP* Präzisionsmessungen

- NASA-Mission, Start 2001
- Vermessung des CMB bei 5 Frequenzen (Vordergrundemission)
- Winkelauflösung von ca. $0,3^\circ$
- Messung der Polarisation möglich

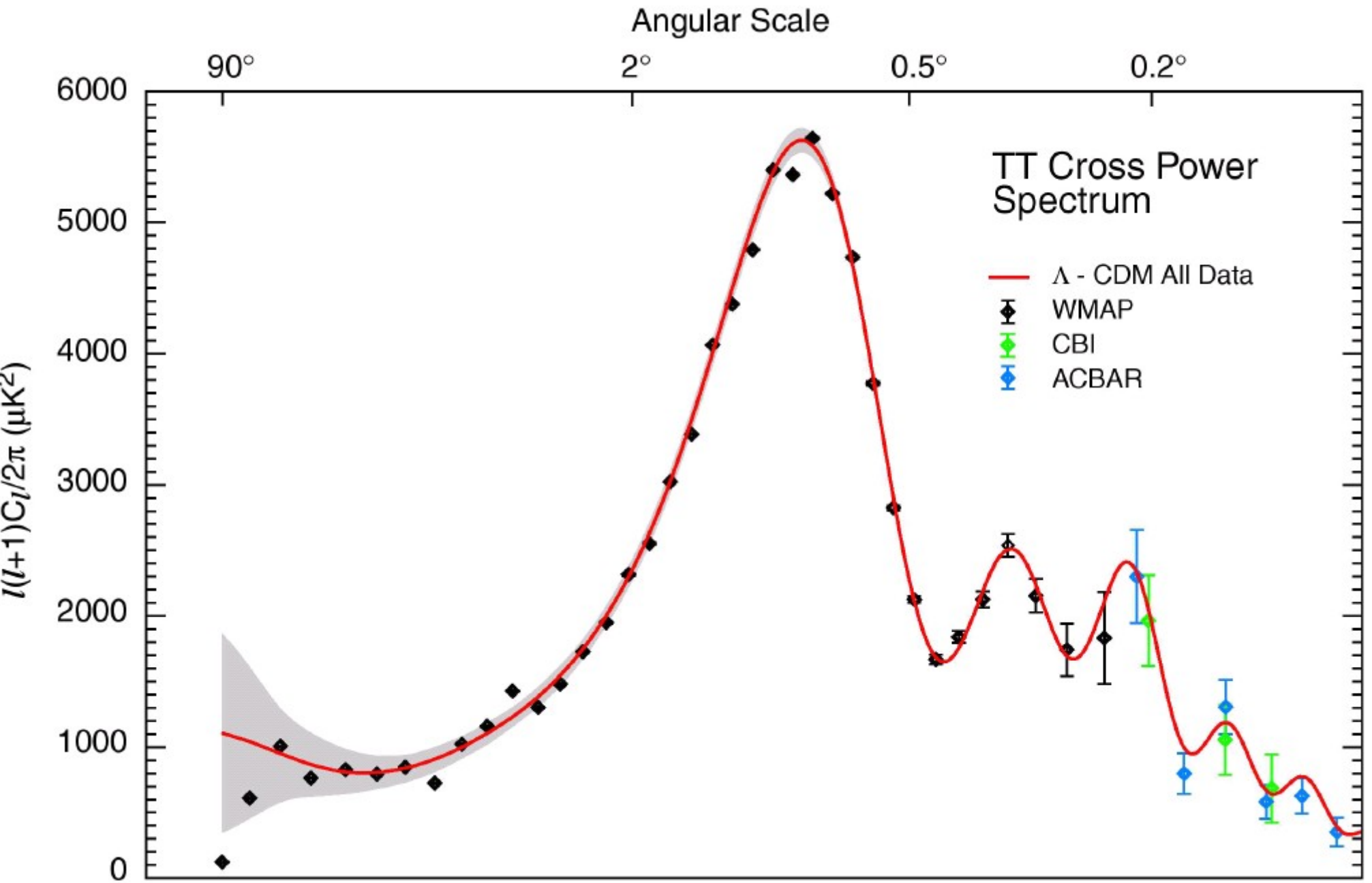


COBE



WMAP

Messungen des Leistungsspektrums



Kommentar zu den "Fehlern" (graues Band im vorigen Bild)

- Wir messen nur einen Himmel - statistische Fehler sind also denkbar ungünstig
- Jede Multipolzahl ℓ hat $2\ell+1$ unabhängige Momente
- Hieraus ergibt sich Einschränkung auf die Genauigkeit (unabhängig vom Instrument)

$$\Delta C_\ell = \frac{C_\ell}{\sqrt{2\ell+1}}$$

Resultat aus den WMAP-Beobachtungen der kosmische Kuchen.

