

**Der kosmische  
Mikrowellenhintergrund:  
Messungen und deren  
Interpretation**

**Alexander Popp**

# Inhalt

1. Vorhersage der CMB
2. Messung und Eigenschaften der CMB
3. Kosmologie
4. Inhomogenitäten
5. Informationen in der CMB
6. Ausblick

# Gründe

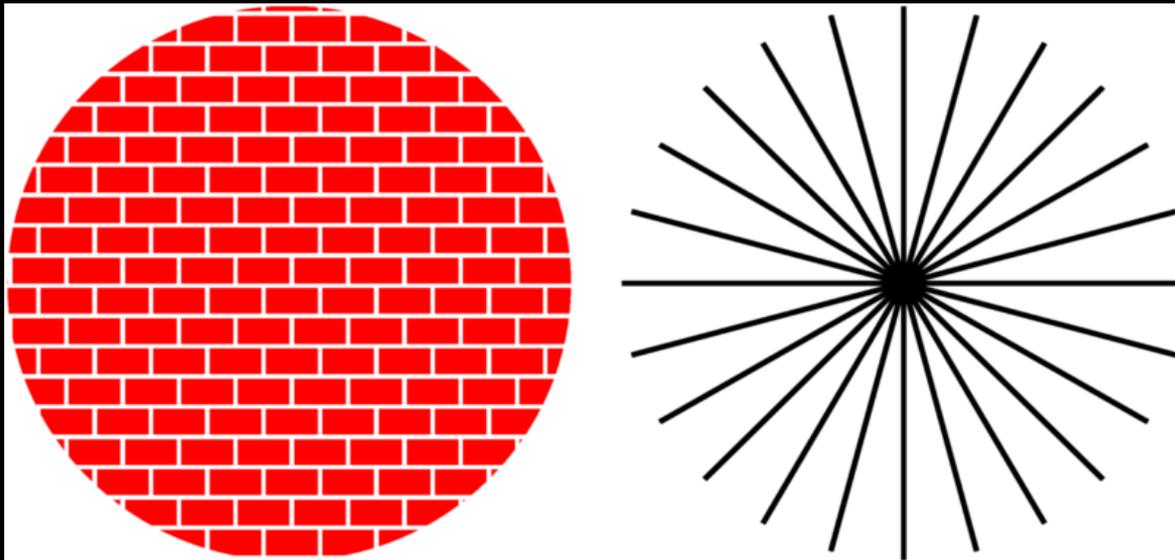
- Die meisten Galaxien bewegen sich von uns weg, mit einer Geschwindigkeit die mit dem Abstand zunimmt (Hubble-Gesetz)
- Es gibt eine isotrope Mikrowellenhintergrundstrahlung (CMB)
- Fast alle kosmischen Objekte haben einen Massenanteil von 25-30% Helium
- Die ältesten Sternhaufen haben ein Alter von etwa 12 Gyr

# Schlussfolgerung

- Wegen Rotverschiebung (Hubble-Gesetz)  
→ Kein statisches Universum
- Durch das Alter der Sternhaufen  
→ Mindestalter des Universums  $\sim 12$  Gyr
- Isotrope CMB  
→ Isotropes Weltmodell

# Kosmologisches Prinzip

Isotropie und Homogenität des Universums wird vorausgesetzt



Quelle: *Fact & Fiction in Cosmology*, Ned Wright, UCAL, 6 May 2005

Nicht isotrop

Nicht homogen

# Die Friedmann-Gleichung

- Es gilt das Kosmologische Prinzip
- Materie verhält sich im Universum wie eine ideale Flüssigkeit
- Es gilt die Allgemeine Relativitätstheorie

Aus Einsteinschen Feldgleichungen ergeben sich die Friedmann-Lemaître-Gleichungen:

$$\rightarrow \left( \frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{Kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} = H^2$$

$$\rightarrow \frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3P}{c^2} \right) + \frac{\Lambda}{3}$$

→ Erklärt Hubble-Expansion

# Gamow und die Primordiale Nukleosynthese



Publikation von 1948

Quelle: Wikipedia

1948 Publikation von R. Alpher,  
R. Herman und G. Gamow:

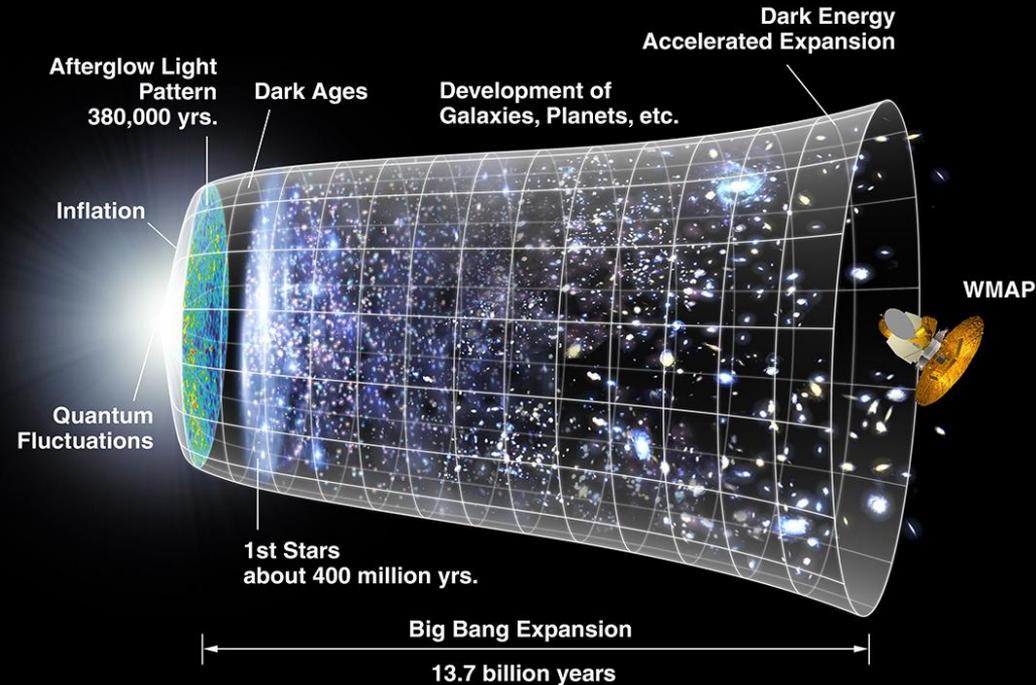
- Thermodynamische Beschreibung des Universums
- Beschreibt die Elemententstehung
- Geht von einem früheren Universum aus, das heiß und sehr dicht war
- Dichtes Universum muss expandieren und abkühlen um die Elemente so zu erzeugen wie sie beobachtet werden

→ **Big Bang Nucleosynthesis**

→ Erklärt 25-30% Heliumanteil

# CMB als Nebenprodukt seiner Arbeit

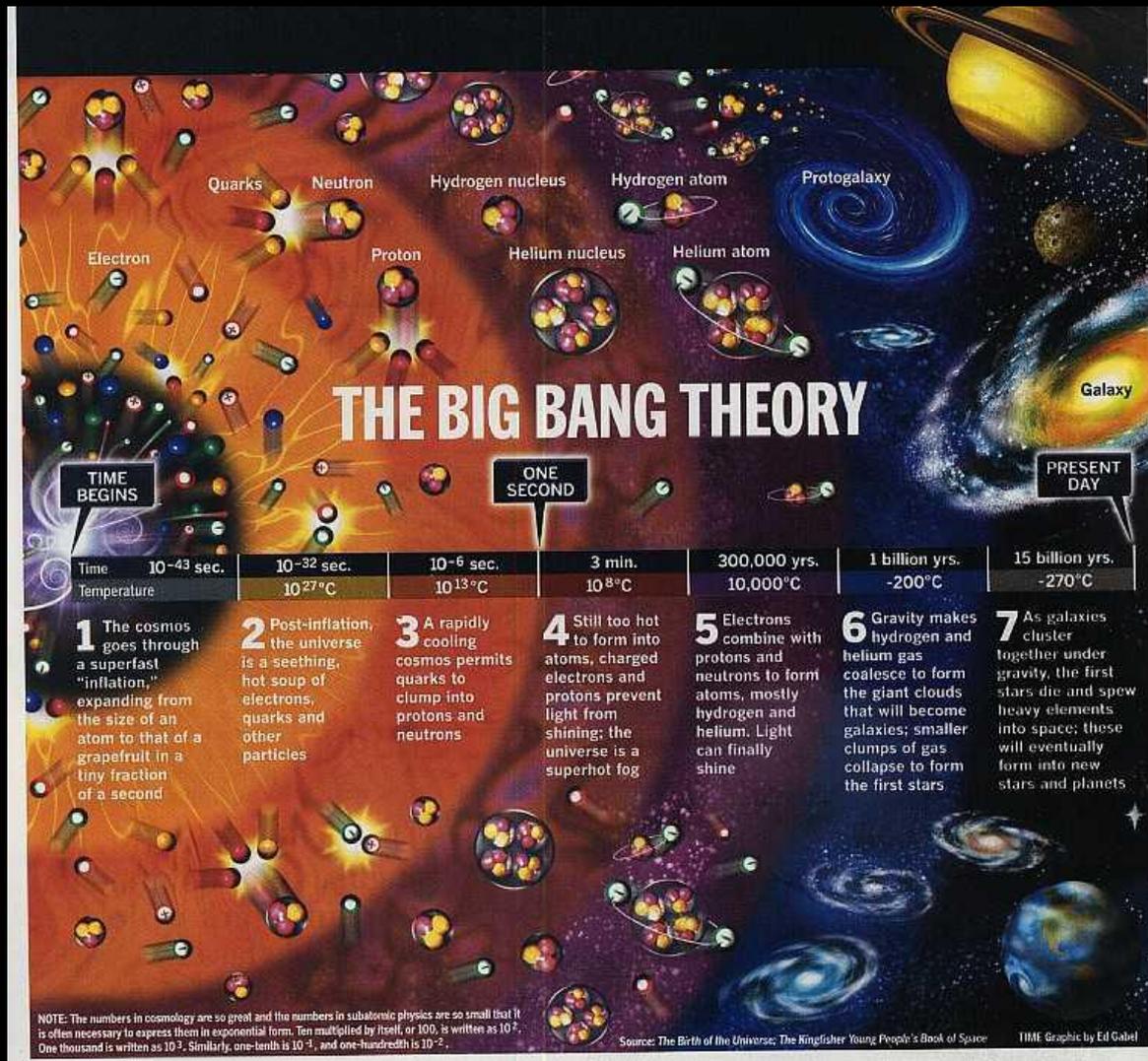
- Die Arbeit führt zwangsläufig zur CMB
- Die CMB entstand in der Rekombinationsära durch die Entkopplung der Photonen
- CMB hat eine perfekte Schwarzkörperstrahlung mit einer Temperatur von  $\sim 3$  Kelvin



Entwicklung des Universums Quelle: <http://wmap.gsfc.nasa.gov/>

→ Erklärt die isotrope CMB

# Das Urknallmodell

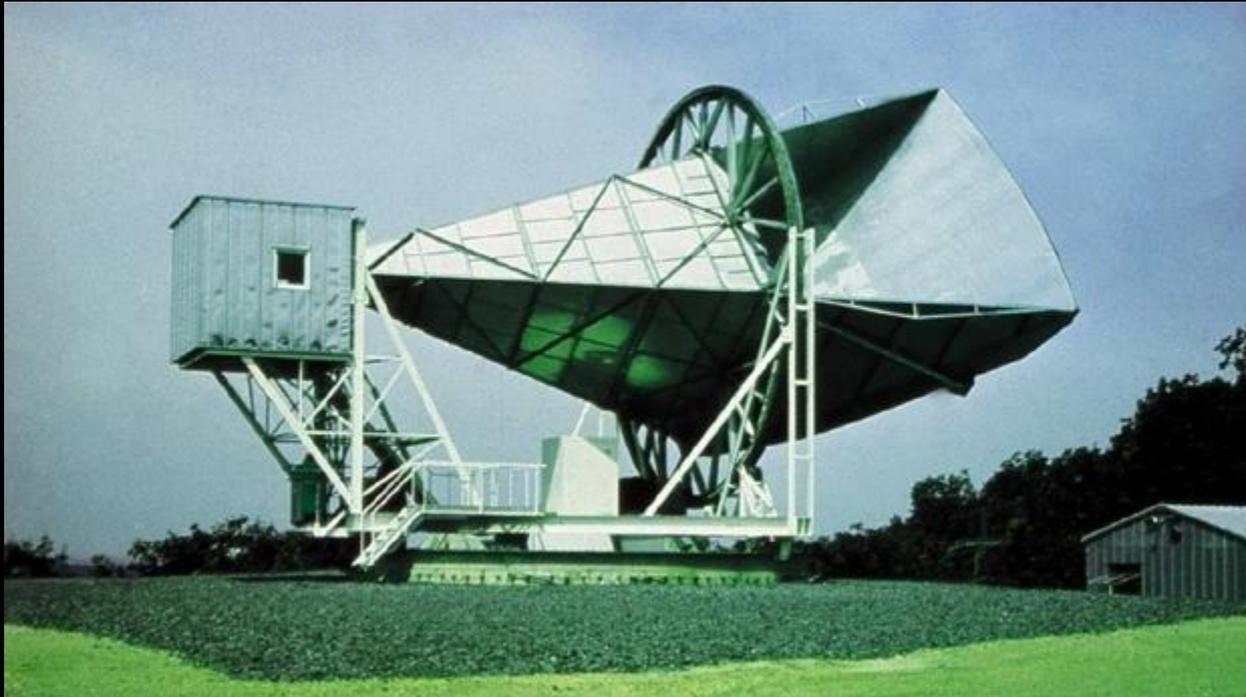


Urknallmodell Quelle: <http://ssscott.tripod.com>

# Inhalt

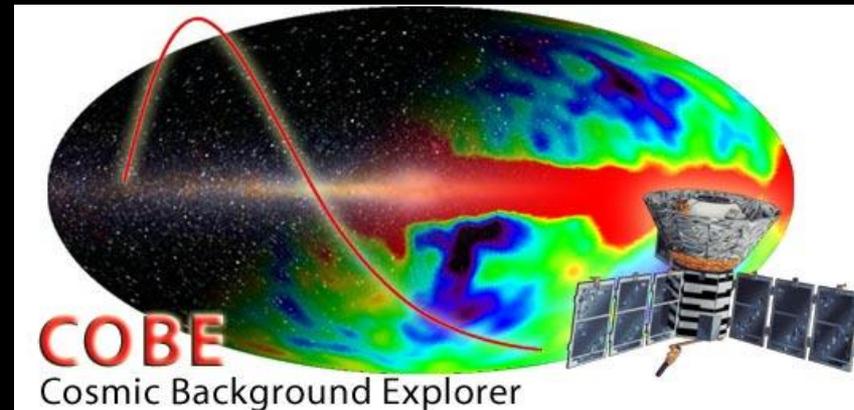
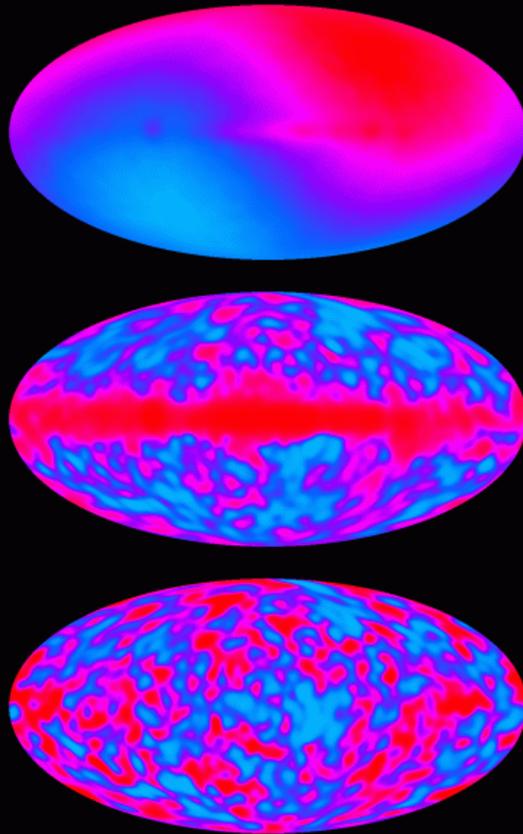
1. Vorhersage der CMB
2. Messung und Eigenschaften der CMB
3. Kosmologie
4. Inhomogenitäten
5. Informationen in der CMB
6. Ausblick

# Erste Messung der CMB 1965



Hornantenne von Arno Penzias und Robert Wilson *Quelle* <http://www.mpa-garching.mpg.de/>

# Cosmic Background Explorer kurz COBE



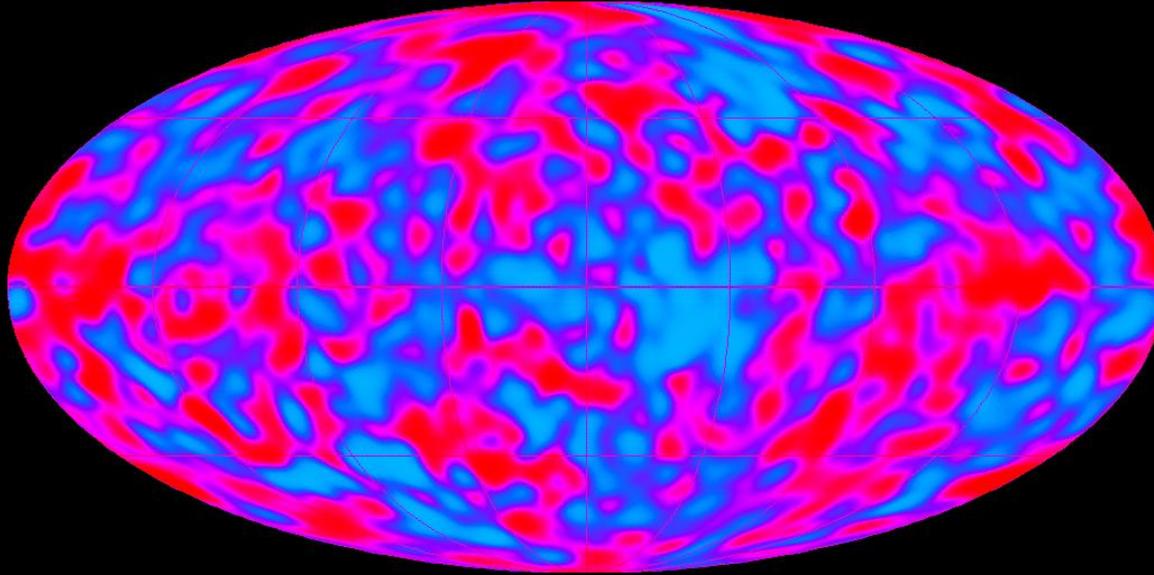
Cobe Satellit Quelle <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>

- Start 18.11.1989
- Dipol durch Eigenbewegung relativ zur CMB ( $\sim 300$  km/s)
- Strahlung aus der Galaktischen Scheibe

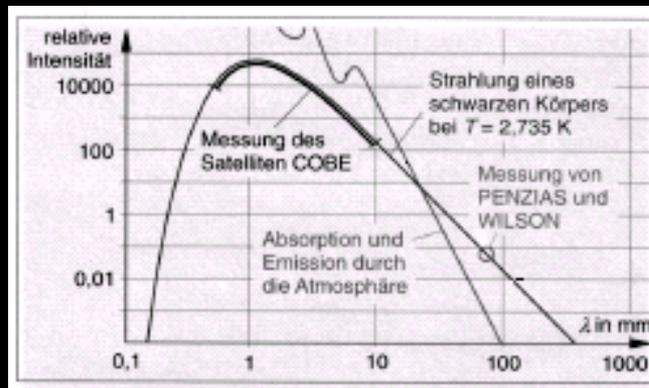
Messung der CMB

Quelle [http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/dmr\\_overview.cfm](http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/dmr_overview.cfm)

# CMB nach COBE



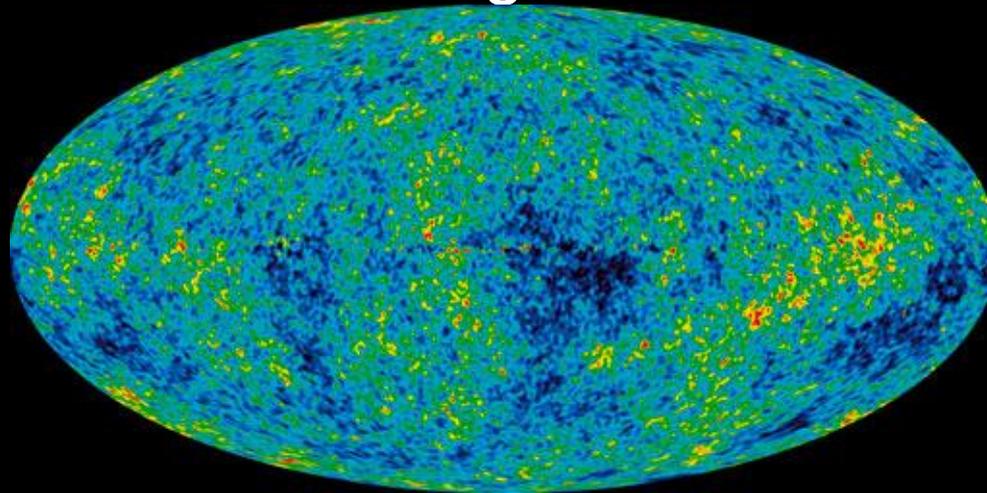
Ergebnis durch COBE – Fluktuationen im  $\mu\text{K}$ -Bereich Prozent Quelle <http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe>



Spektrum der CMB

Quelle <http://www.mpa-garching.mpg.de>

# Diffuse Vordergrundemission I



Seven Year Microwave Sky WMAP Quelle <http://map.gsfc.nasa.gov/>

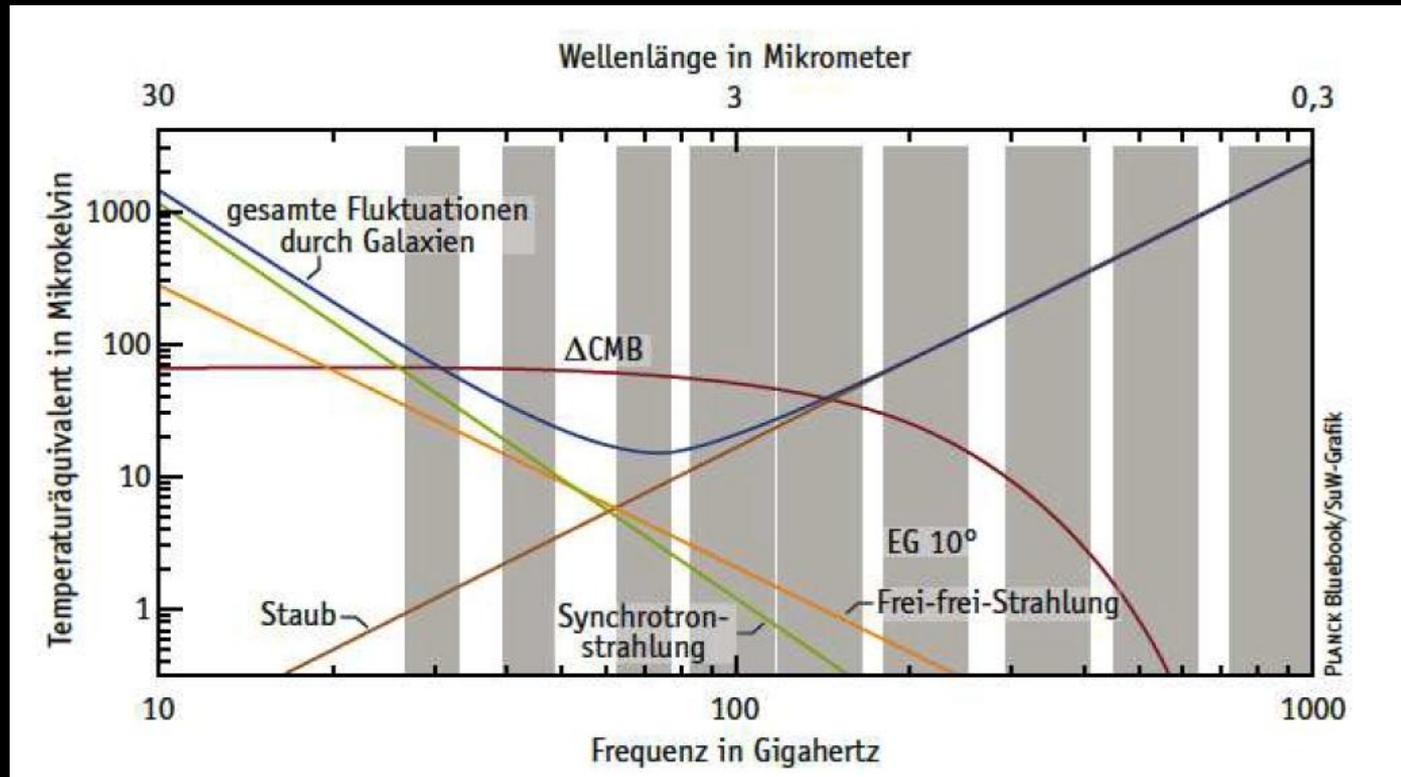
- Wärmestrahlung des interstellaren Staubs
- Synchrotronstrahlung
- Bremsstrahlung (Frei-Frei-Strahlung)

Lösung:

Messen der CMB in mehreren Wellenlängen

→ Durch unterschiedliche Spektren kann die Vordergrundemission herausgerechnet werden

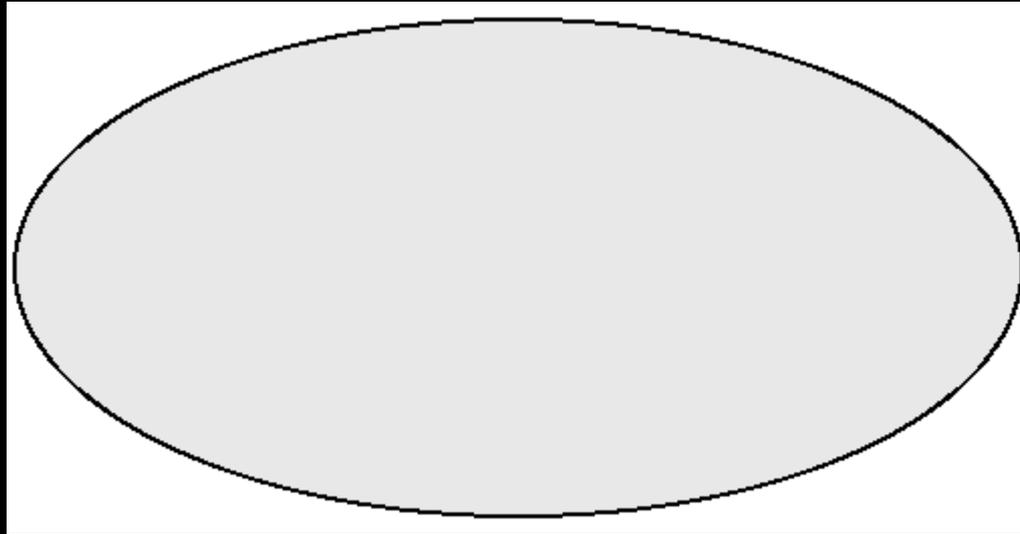
# Diffuse Vordergrundemission II



Messbereiche des Planck-Satelliten Quelle <http://www.suw-online.de/artikel/936596>

Das Minimum der diffusen Vordergrundemission und damit das am wenigsten gestörte Fenster der Fluktuationen des CMB liegen bei 70 GHz.

# Homogenität und Isotropie der CMB



Temperatur der CMB skaliert zwischen 0 K (Schwarz) und 3 K (Weiß)

Quelle [http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo\\_01.htm](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmo_01.htm)

Die Schwankungen der CMB sind sehr klein (im  $\mu\text{K}$ -Bereich)

→ homogen und isotrop

# Inhalt

1. Vorhersage der CMB
2. Messung und Eigenschaften der CMB
3. Kosmologie
4. Inhomogenitäten
5. Informationen in der CMB
6. Ausblick

# Die Friedmann-Gleichung

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} = H^2$$

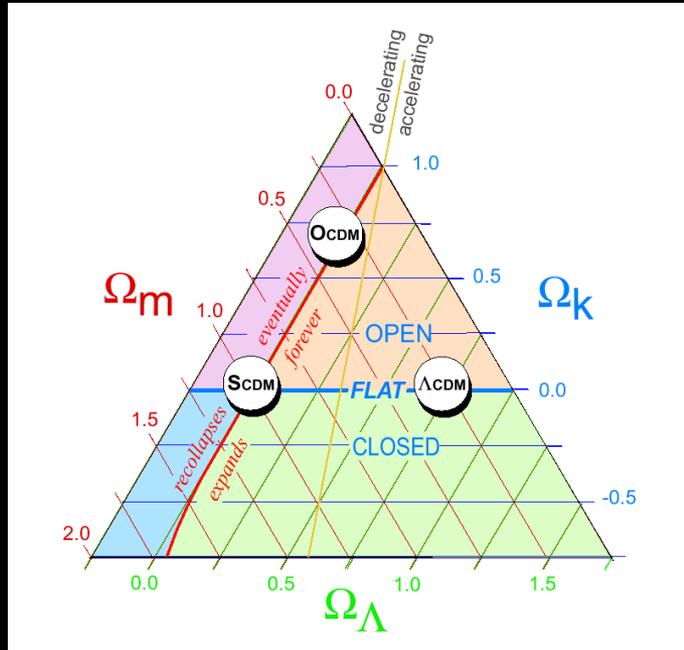
$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right) + \frac{\Lambda}{3}$$

Dimensionslose Parameter:

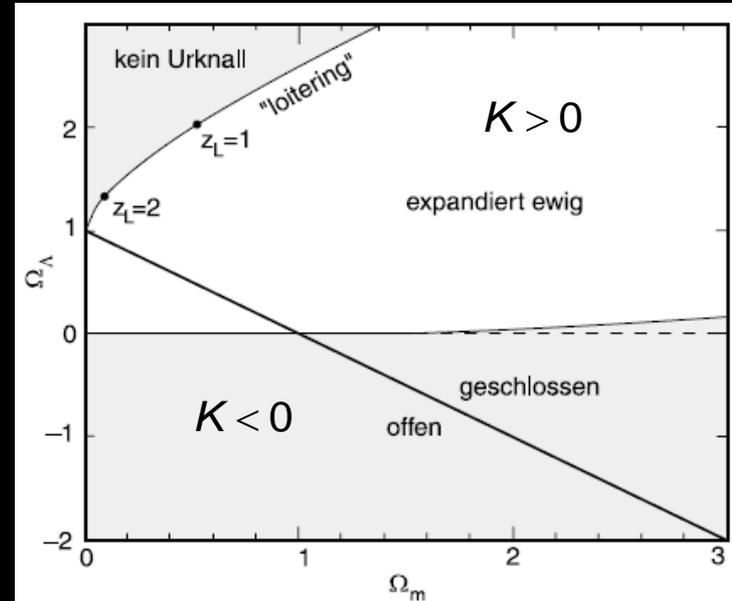
$$\Omega_m = \frac{8\pi G}{3H^2}\rho \quad \Omega_K = -\frac{Kc^2}{R^2H^2} \quad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H^2}$$

$$\Omega_m + \Omega_K + \Omega_\Lambda = 1$$

# Kosmologisches Dreieck



Kosmologisches Dreieck Quelle: [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)

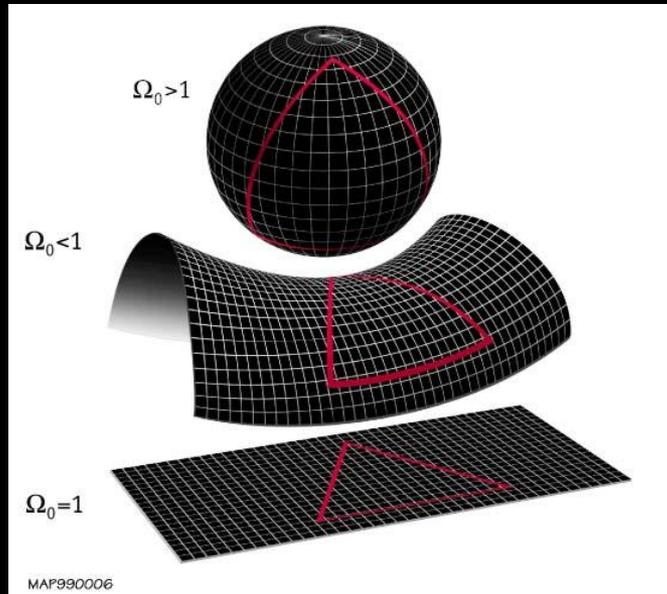


Fundamentalebene der Kosmologie Quelle: Peter Schneider

Die Dichteparameter bestimmen das Verhalten der Modelle des Universums

$$\Omega_m + \Omega_K + \Omega_\Lambda = 1$$

# Krümmung



Mögliche Krümmungen Quelle <http://map.gsfc.nasa.gov/>

$$K = 1 \quad \Omega_0 > 1$$

$$K = -1 \quad \Omega_0 < 1$$

$$K = 0 \quad \Omega_0 = 1$$

Gesamtdichteparameter: 
$$\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_r + \Omega_\Lambda$$

# Materiedichte

Materiedichte:  $\rho_m(t) = \rho_{m,0} \cdot R(t)^{-3}$   $\Omega_m = \frac{\rho_{m,0}}{\rho_{cr}}$

Strahlungsdichte:  $\rho_r(t) = \rho_{r,0} \cdot R(t)^{-4}$   $\Omega_r = \frac{\rho_{r,0}}{\rho_{cr}}$

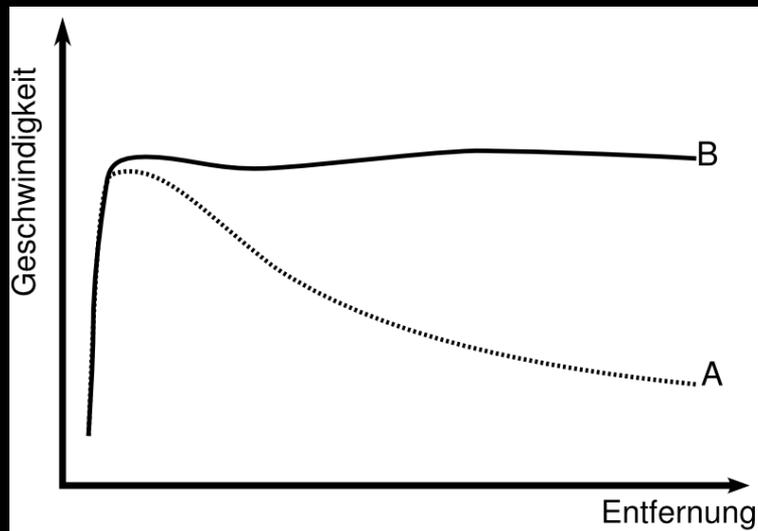
Vakuumsdichte:  $\rho_v(t) = \rho_v = \text{const}$   $\Omega_v = \frac{\rho_v}{\rho_{cr}}$

Kritische Dichte:  $\rho_{cr} = \frac{3H_0^2}{2\pi G}$

# Dunkle Materie

Gründe für Dunkle Materie:

- Rotationskurven von Galaxien
- Dynamik von Galaxien in Galaxienhaufen
- Gravitationslinsen



Erwartete und beobachtete Rotationskurve einer Galaxie

Quelle <http://www.wikipedia.de>

Dominanter Teil von  $\Omega_m$

Problem:

Sehr schwache Wechselwirkung

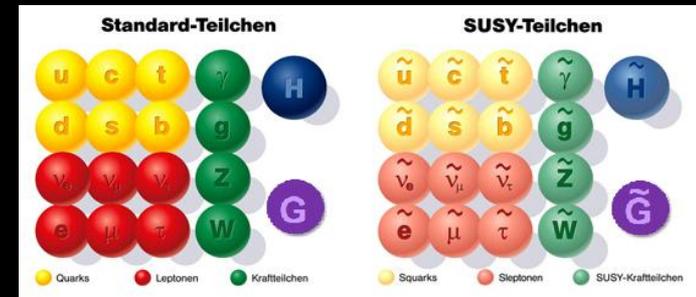
# Was ist Dunkle Materie?

- Dunkle, nicht strahlende baryonische Materie  
→ Braune Zwerge, MACHOs, Staubwolken

- Heiße Dunkle Materie  
→ relativistische Neutrinos

- Kalte Dunkle Materie  
→ WIMPs  
→ SUSY-Teilchen (Neutralino?)

- Oder doch MOND?



SUSY – Teilchenzoo

Quelle <http://www.weltderphysik.de/de/4232.php>

# Dunkle Energie $\Lambda$

- Weder eine Energieform baryonischer Art noch der Dunklen Materie!
- Nicht sichtbar, daher „dunkel“
- Dunkle Energie dominiert das jetzige Universum  $\Omega_{\Lambda} = \frac{\Lambda c^2}{3H^2}$
- Wirkt wie Antigravitation



Quelle <http://www.wissenschaft-online.de/>

# Flachheitsproblem I

- Heutige Beobachtungen der Gesamtdichte ergibt  $0,01 \leq \Omega_0 \leq 2$
- Ausgangspunkt:

$$\Omega_0 \sim 1 \quad \wedge \quad \Omega_\Lambda = 0$$

- Die Friedmann-Gleichung kann umgeschrieben werden:

$$\Omega_0 - 1 = \frac{k}{R^2 H^2}$$

- Das Verhältnis der Krümmung zweier Zeitpunkte für ein materiedominiertes, nahe zu flaches Universum wäre:

$$\frac{\Omega_0(t) - 1}{\Omega_0(t_0) - 1} = \left( \frac{t}{t_0} \right)^{2/3}$$

- Für ein strahlungsdominiertes Universum:

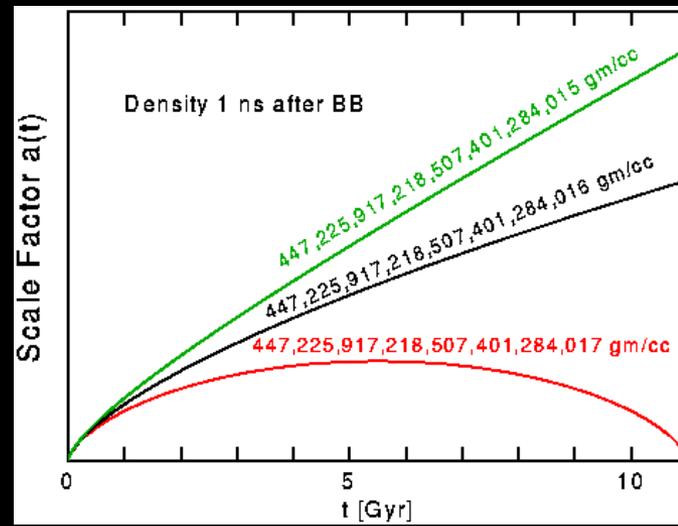
$$\frac{\Omega_0(t) - 1}{\Omega_0(t_0) - 1} = \frac{t}{t_0}$$

# Flachheitsproblem II

- Dadurch würde sich das Verhältnis zwischen heute und ca. einer Sekunde nach dem Urknall wie folgend ergeben:

$$\frac{\Omega_0(1s) - 1}{\Omega_0(t_{\text{heute}}) - 1} \sim 10^{-12} \dots 10^{-16}$$

- Daher wäre  $\Omega_0$  sehr nahe an 1 im früheren Universum



Quelle <http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/>

# Strukturproblem

- Die heute beobachteten Strukturen (z.B. Sterne, Galaxien) des Universums lassen sich nicht durch das Standardmodell erklären

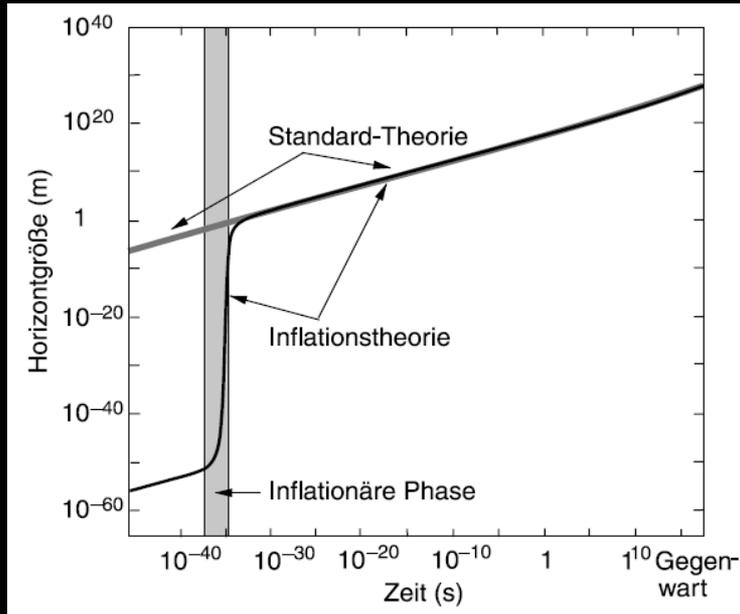
Welches Modell kann diese und andere Probleme lösen?

## Die Inflation



Quelle [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

# Die Inflation als Lösung



Änderung am Standardmodell durch Inflation

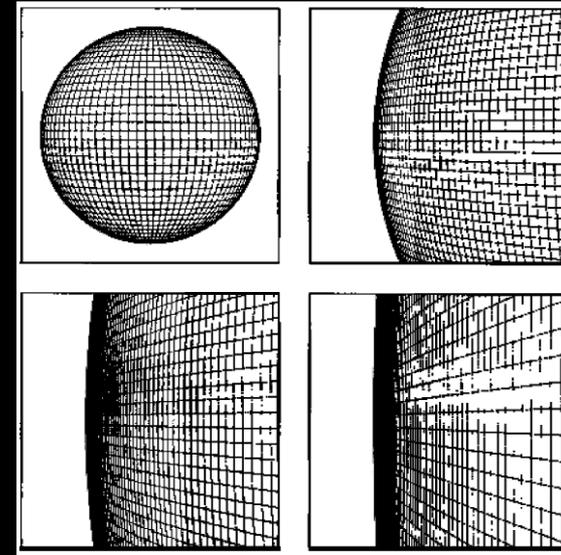
Quelle: Peter Schneider

$$R(t) = C \cdot \exp\left(\sqrt{\frac{\Lambda}{3}} t\right)$$

$$t \sim 10^{-34} \text{ s} \rightarrow t \sim 10^{-32} \text{ s}$$

$$l \sim 10^{-26} \text{ m} \rightarrow l \sim 10^{14} \text{ m}$$

$$\text{Faktor} \sim 10^{40}$$



Flachheitsproblem wird „begradigt“

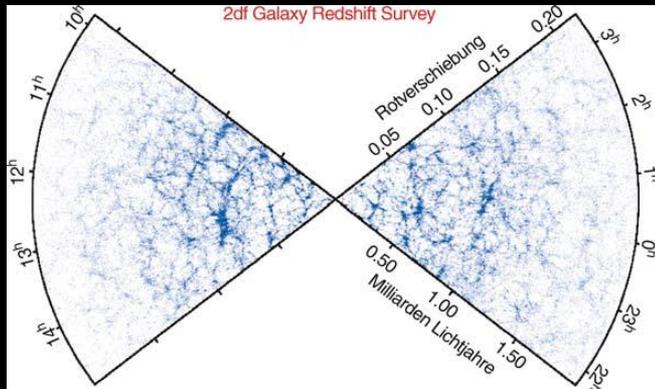
Quelle: Peter Schneider

- Quantenfluktuationen vor der Inflation bilden danach die Saat für die Strukturbildung (DM zu erst, dann Baryonen)

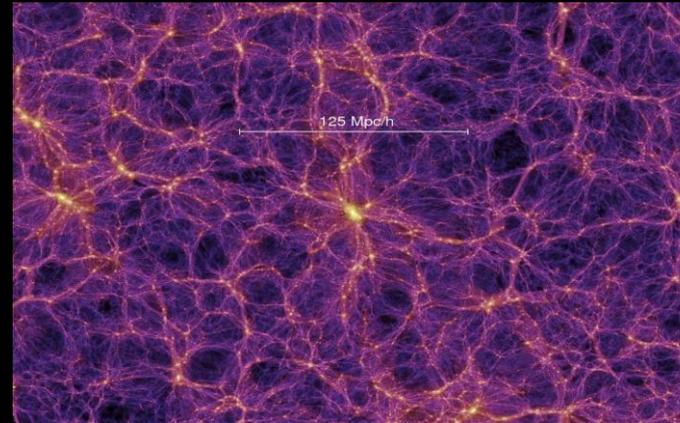
# Inhalt

1. Vorhersage der CMB
2. Messung und Eigenschaften der CMB
3. Kosmologie
4. Inhomogenitäten
5. Informationen in der CMB
6. Ausblick

# Korrelationsfunktion der Objekte

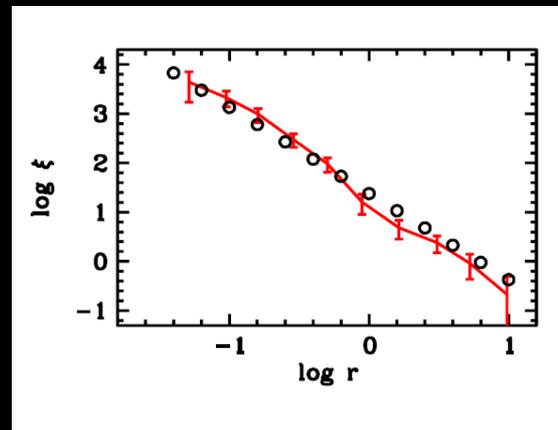


Rotverschiebungsuntersuchung Quelle: Peter Schneider



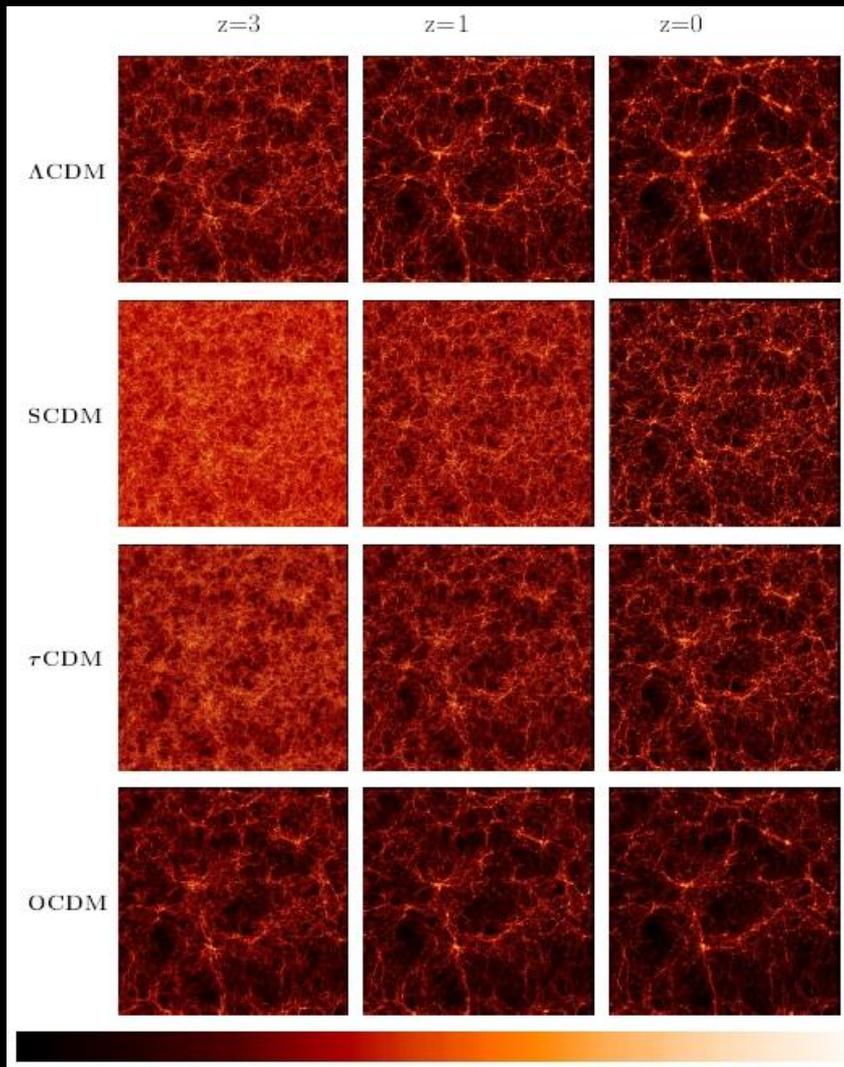
Millennium Simulation Quelle: <http://www.mpa-garching.mpg.de/>

- Wo eine Galaxie ist, ist die Wahrscheinlichkeit eine zweite zu finden deutlich höher → Sie korrelieren miteinander

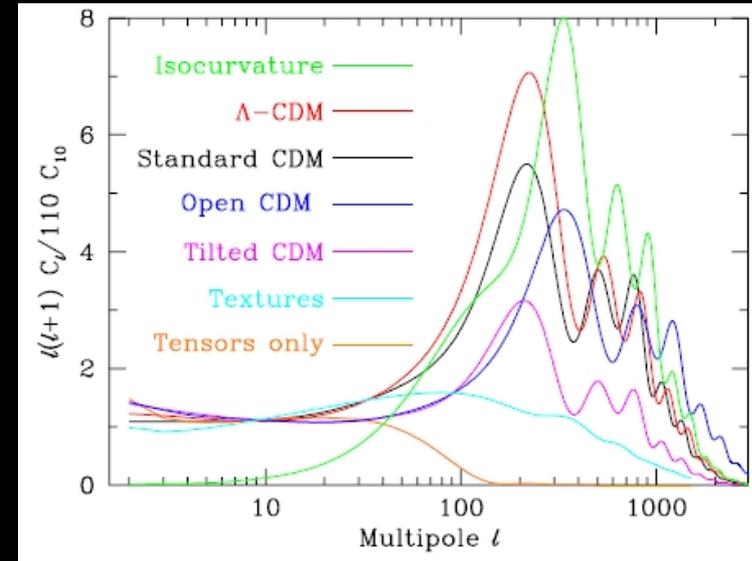


Paarkorrelationsfunktion Quelle: Weinberg et al. (2004)

# Inhomogene Weltmodelle



Simulation der Modelle Quelle <http://www.mpa-garching.mpg.de/Virgo/>



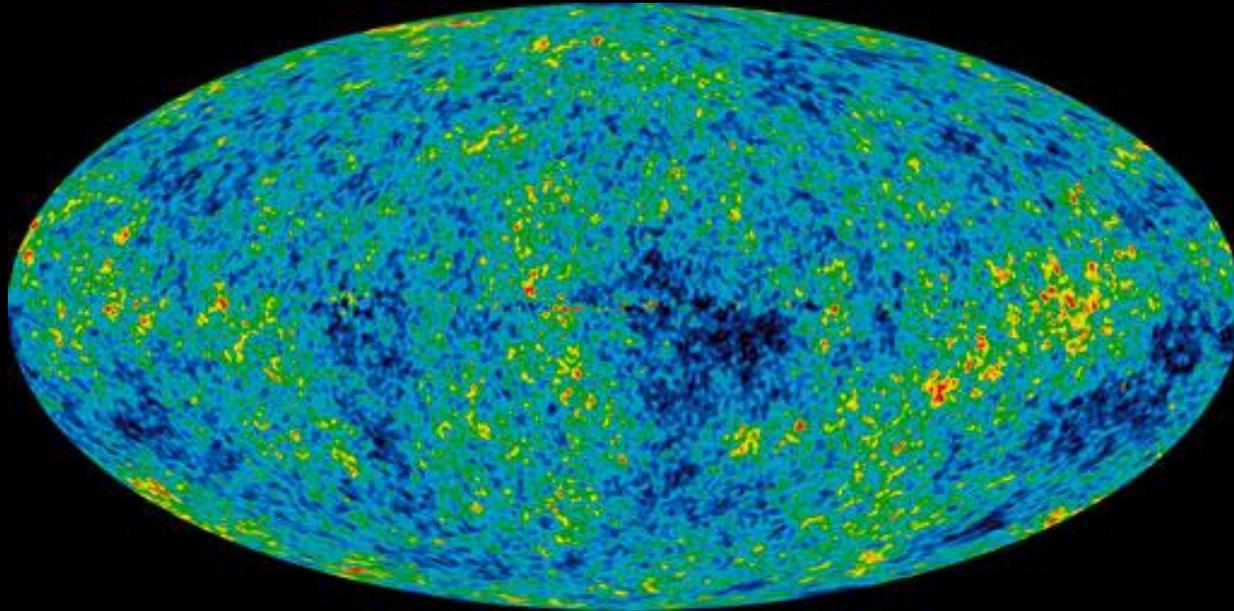
Simulation der Modelle als Leistungsspektrum

Quelle Smoot & Scott et al. (2000)

# Inhalt

1. Vorhersage der CMB
2. Messung und Eigenschaften der CMB
3. Kosmologie
4. Inhomogenitäten
5. Informationen in der CMB
6. Ausblick

# Weiter Störungen in der CMB-Messung

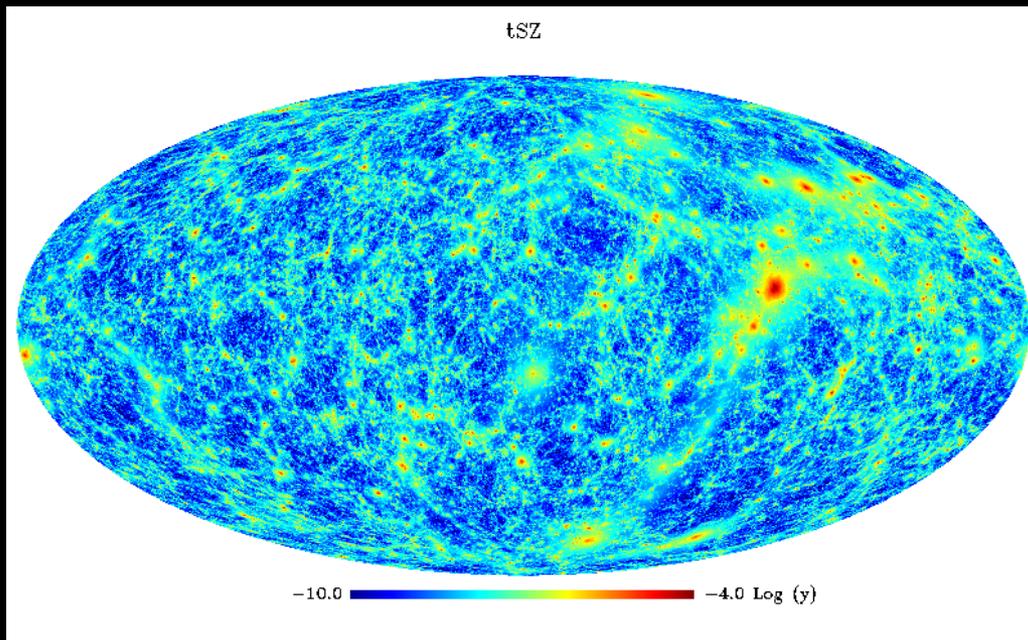


Seven Year Microwave Sky WMAP Quelle <http://map.gsfc.nasa.gov/>

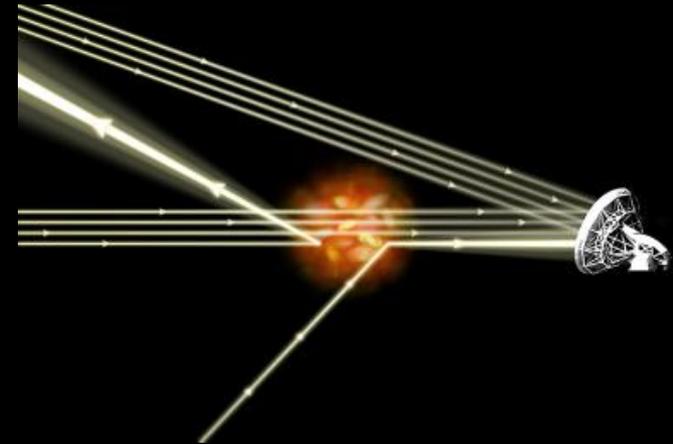
- Wechselwirkungen der CMB-Photonen mit Materie auf dem Weg durch das Universum

# Sunyaev-Zeldovich Effekt

- Bei diesem Effekt werden Photonen der CMB an Elektronen im heißen Gas von Galaxienhaufen gestreut
- Dabei tritt der inverse Compton-Effekt auf und im Mittel wird die Energie der CMB-Photonen erhöht

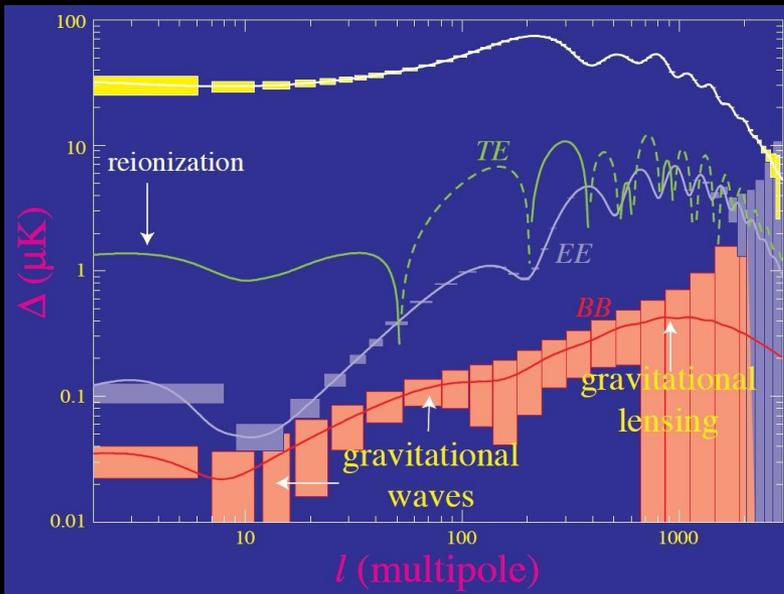


Simulation des SZ-Effektes Quelle <http://www.astro.up.pt/~asilva/research.html>

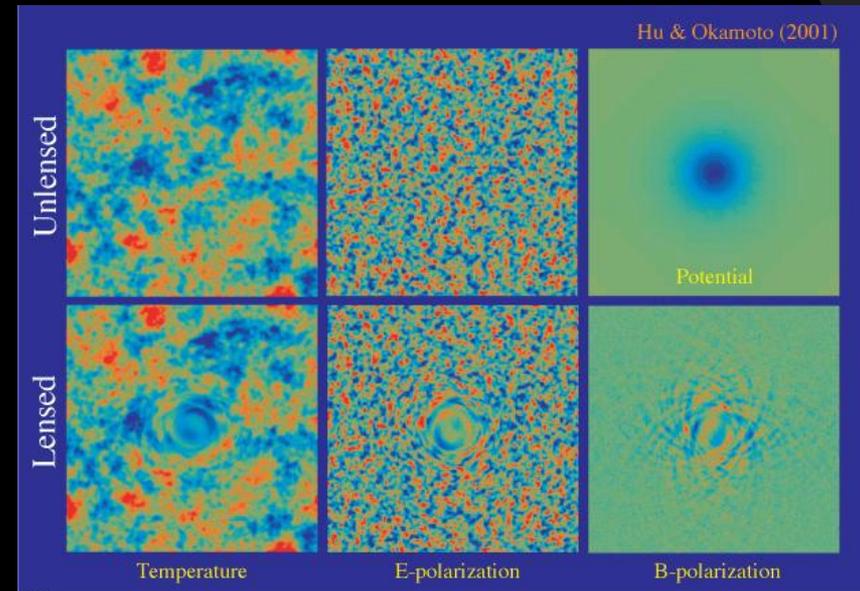


SZ-Effekt Quelle: <http://chandra.harvard.edu>

# Der Lensing Effekt



Quelle Wayne Hu et al. (2006)

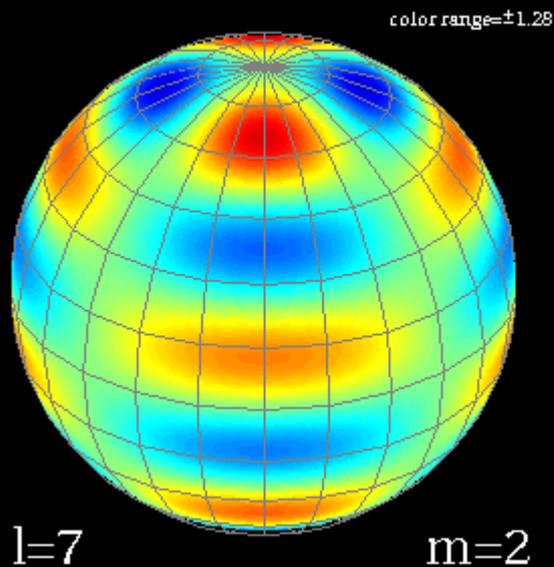


Quelle <http://background.uchicago.edu/~whu/CMBlens/cmblens.html>

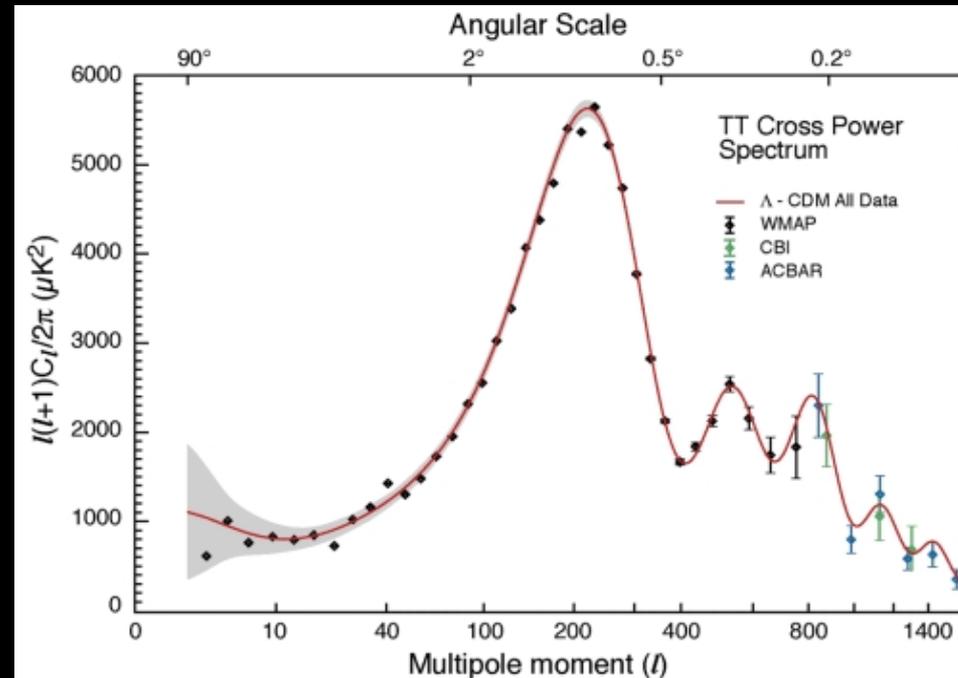
- Ausschmieren der CMB besonders in kleinen Bereichen durch Gravitationslinsen
- Erzeugt aus E-Polarisation eine B-Polarisation

# Leistungsspektrum der CMB

- Multipolentwicklung der CMB



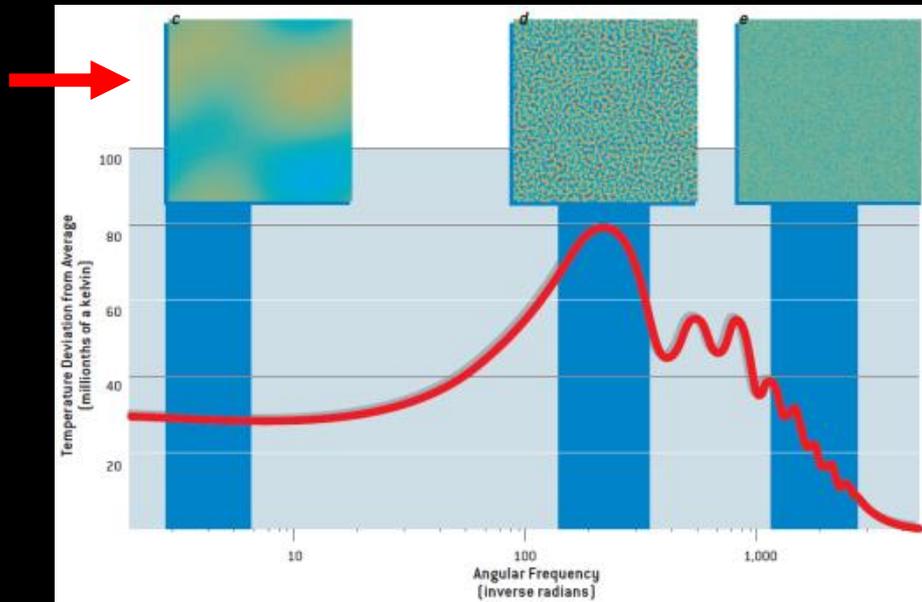
Quelle <http://find.spa.umn.edu/~pryke/logbook/20000922/>



Quelle [http://map.gsfc.nasa.gov/news/5yr\\_release.html](http://map.gsfc.nasa.gov/news/5yr_release.html)

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2$$

# Sachs-Wolfe-Effekt

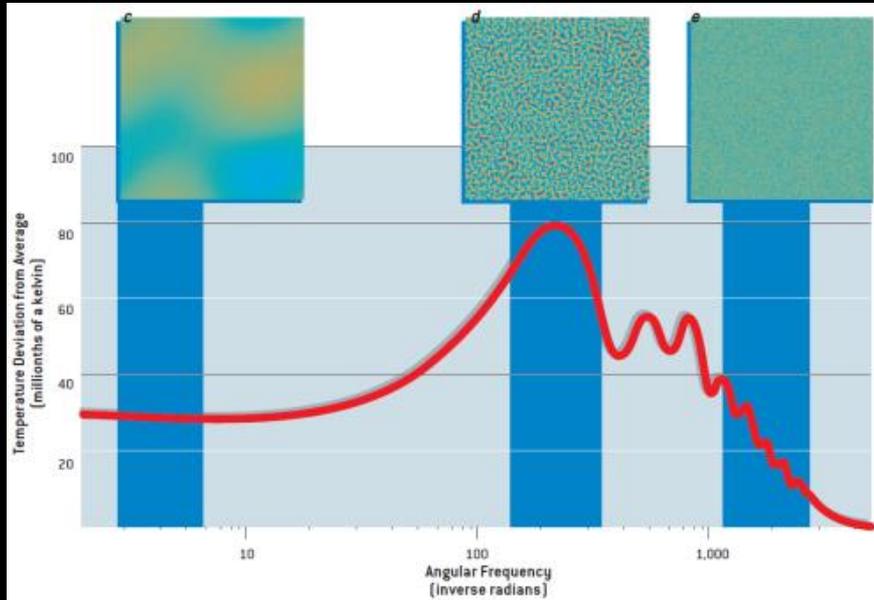


Quelle: *THE COSMIC SYMPHONY* By Wayne Hu and Martin White

- Dichteschwankungen kurz vor der Rekombination (Quantenfluktuationen → Inflation) verschieben Energie der CMB-Photonen
- Potentialtöpfe von Dunkler Materie
- Schwankungen  $\sim 30^\circ$  am Himmel

- Dichtere Gebiete erscheinen kühler als dünnere Gebiete (Gravitationsrotverschiebung)
- Integrierter Sachs-Wolfe Effekt → Messung der Expansion?

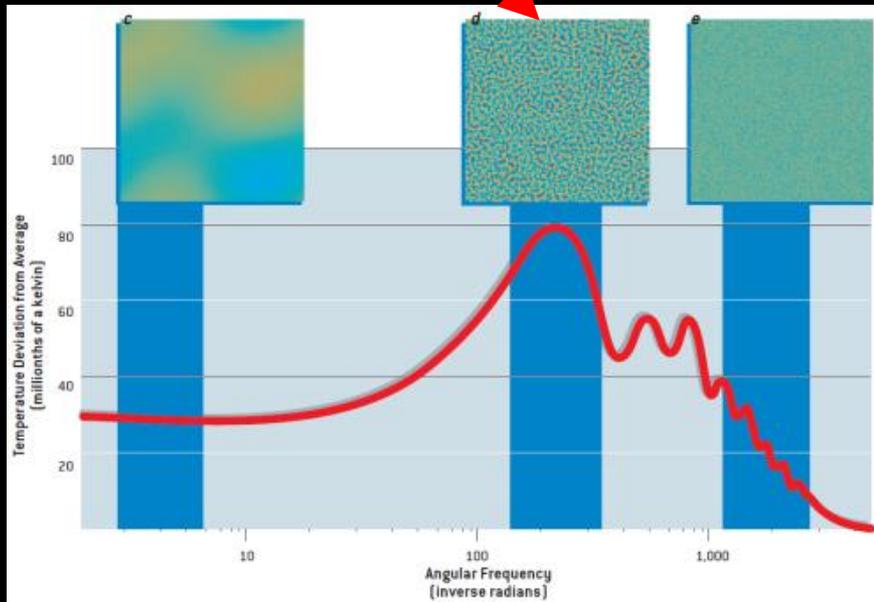
# Silk-Dämpfung



Quelle: *THE COSMIC SYMPHONY* By Wayne Hu and Martin White

- Die Strahlung verhindert eine vorzeitige Klumpung von baryonische Materie
- Dunkle Materie muss sich vor der Rekombination entkoppelt haben, damit es überhaupt Dichteschwankungen geben kann
- Schwankungen  $\sim 0,1^\circ$  am Himmel

# Akustische Schwingungen/Oszillation

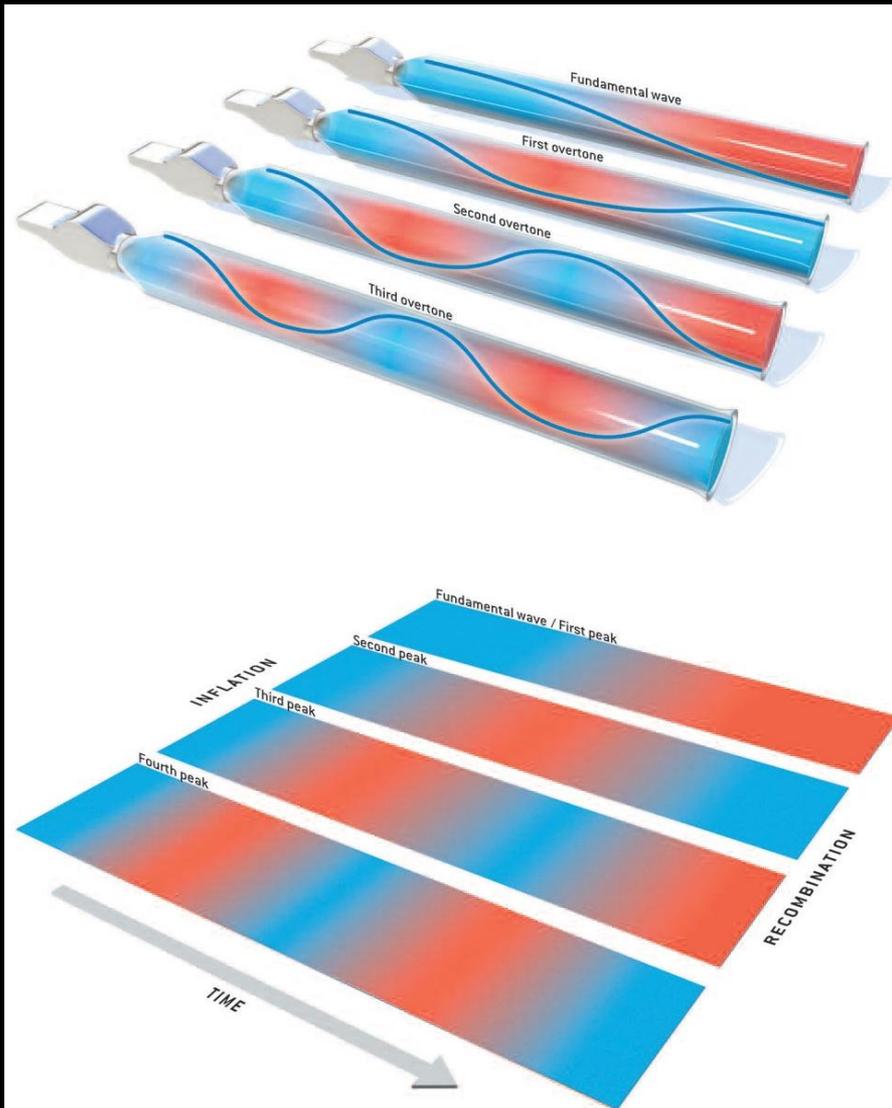


Quelle: *THE COSMIC SYMPHONY* By Wayne Hu and Martin White

- Durch den Fluss der baryonischen Materie in die DM-Potentiale und gleichzeitigem Gegenwirken der Strahlung kommt es zu akustischen Oszillationen zwischen Inflation und Rekombination

- Der erste Peak dieser Schwingungen ist bei einem Multipolmoment von etwa 200 und entspricht  $1^\circ$
- Die nächsten beiden Peaks sind Oberschwingungen

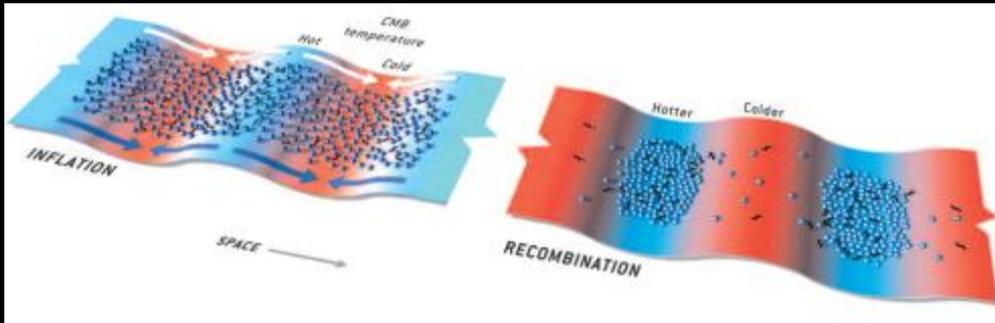
# Akustische Oszillationen I



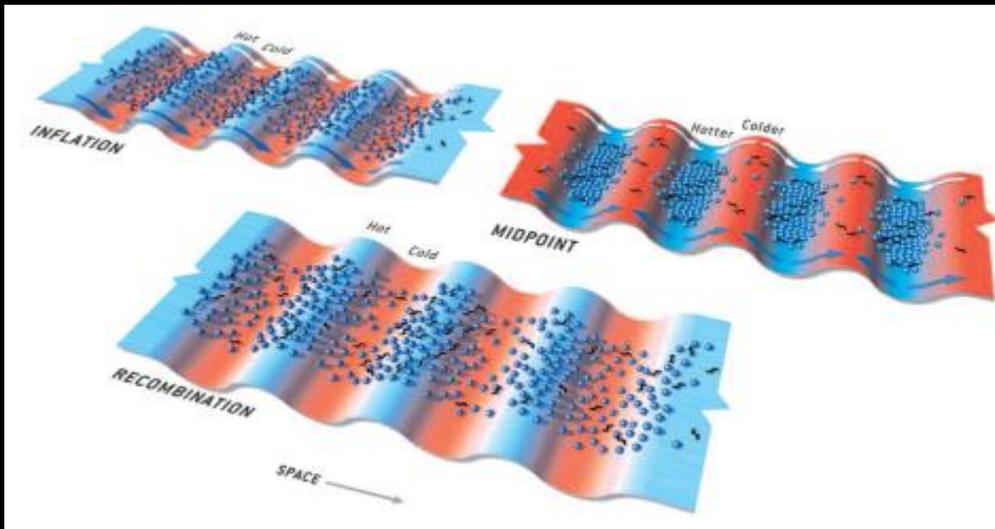
- Nach der Inflation entstehen Schallwellen (Dichteschwankungen)
- Hier zu sehen sind die Hauptschwingung und die Oberschwingungen, welche Temperaturschwankungen verursachen

Quelle: THE COSMIC SYMPHONY By Wayne Hu and Martin White

# Akustische Oszillationen II



1. Maximum Quelle: *THE COSMIC SYMPHONY* By Wayne Hu and Martin White



2. Maximum Quelle: *THE COSMIC SYMPHONY* By Wayne Hu and Martin White

- Große Dichteschwankungen der akustischen Oszillation verstärken sich durch Potentialerzeugung durch DM

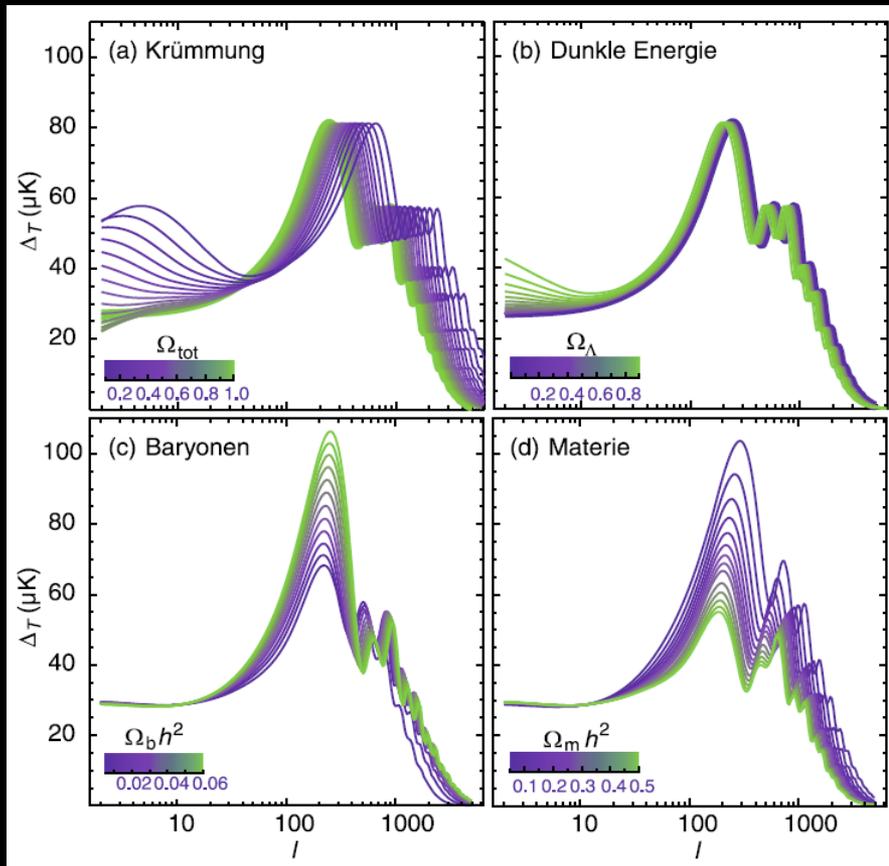
1. Peak  $\sim 1^\circ$

- Oberschwingungen sind nicht mit DM-Wellen in Phase, daher schwächer als Hauptschwingung

• 2. & 3. Peak als Oberschwingungen sichtbar

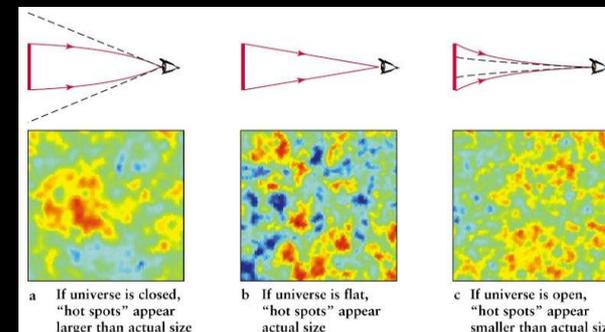
• Höhere  $\rightarrow$  Silk-Dämpfung

# Bestimmung der Parameter aus der CMB



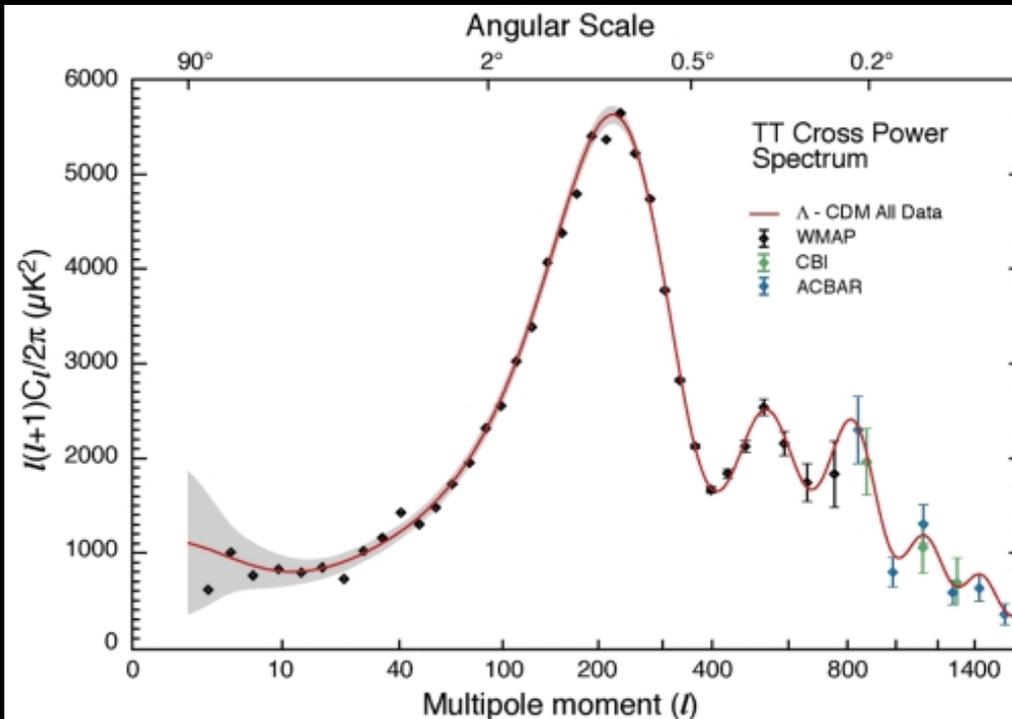
Parameteranpassung Quelle: Peter Schneider

- Aus dem Leistungsspektrum kann man sehr viele Informationen über den Aufbau des Universums gewinnen.
- Die Lage des ersten Peaks gibt die Krümmung an (a)
- Die Höhe des ersten Peaks gibt dagegen die Baryonendichte an, wenn gleichzeitig der zweite Peak sinkt (c)



Krümmung in der CMB Quelle: <http://crab0.astr.nthu.edu.tw>

# Parameter aus den WMAP Daten



Quelle [http://map.gsfc.nasa.gov/news/5yr\\_release.html](http://map.gsfc.nasa.gov/news/5yr_release.html)

$$t_0 = 13.69 \pm 0.13 \text{ Gyr}$$

$$H_0 = 71.9^{+2.6}_{-2.7} \text{ km/s/Mpc}$$

$$\Omega_b = 0.0441 \pm 0.0030$$

$$\Omega_{\text{DM}} = 0.214 \pm 0.027$$

$$\Omega_{\Lambda} = 0.742 \pm 0.030$$

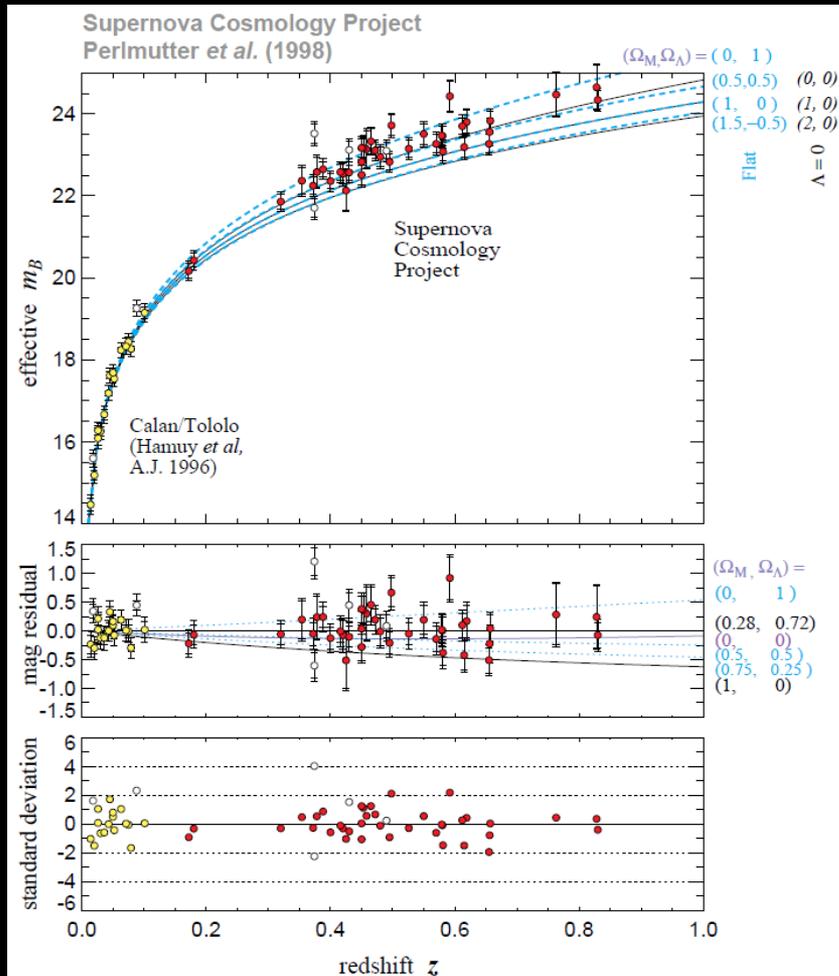
$$z_{\text{CMB}} = 1090.51 \pm 0.95$$

$$t_{\text{CMB}} = 380081^{+5843}_{-5841} \text{ yr}$$

# Inhalt

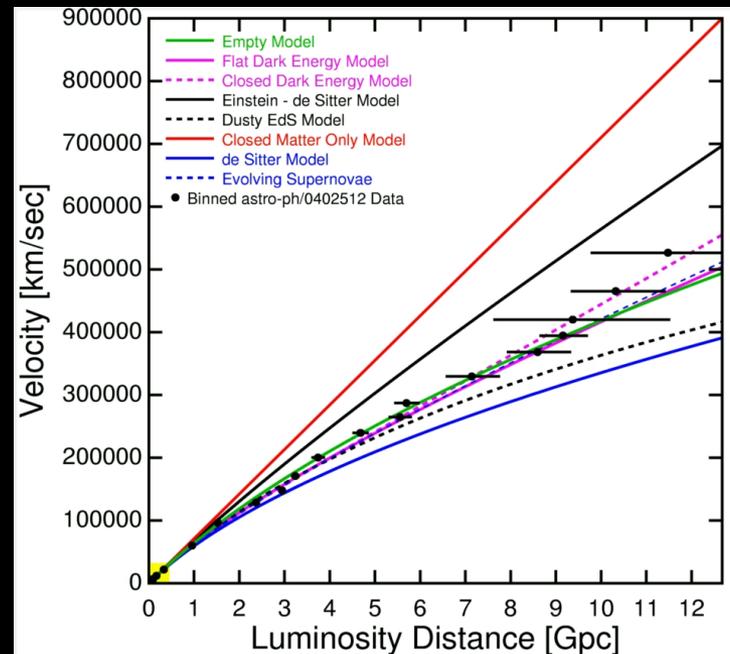
1. Vorhersage der CMB
2. Messung und Eigenschaften der CMB
3. Kosmologie
4. Inhomogenitäten
5. Informationen in der CMB
6. Ausblick

# Standardkerze Supernova 1a



Quelle Max Camenzind et al. (2008)

- Durch die konstante Helligkeit von Sn 1a kann die Entfernung bestimmt werden
- Dadurch können die Parameter für die Weltmodelle weiter eingeschränkt werden

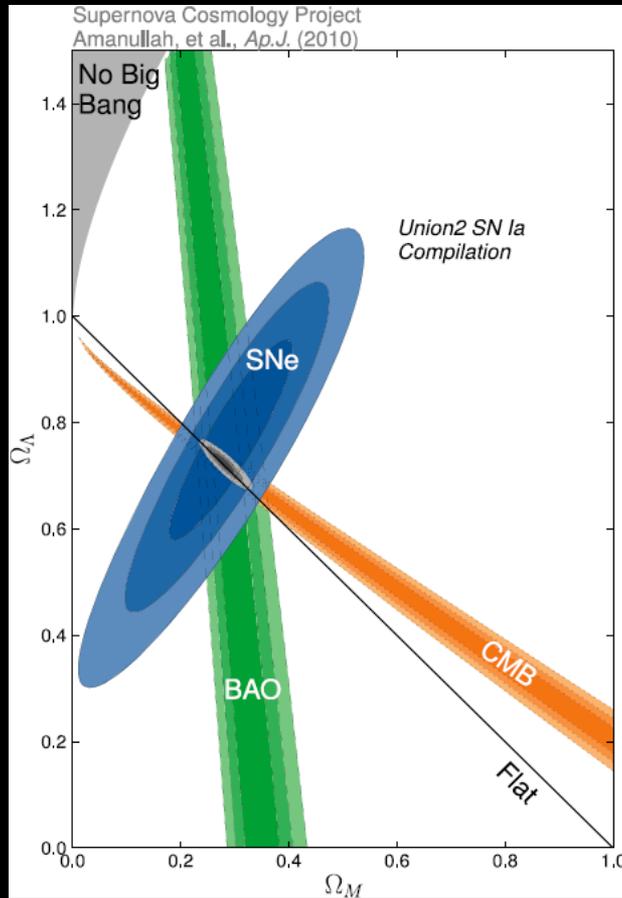


Quelle Max Camenzind et al. (2008)

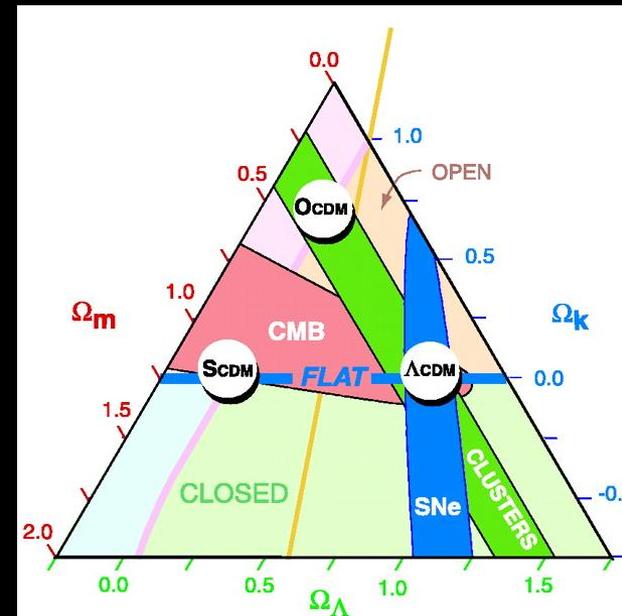
# Das $\Lambda$ CDM Universum

$$\Omega_K = 0$$

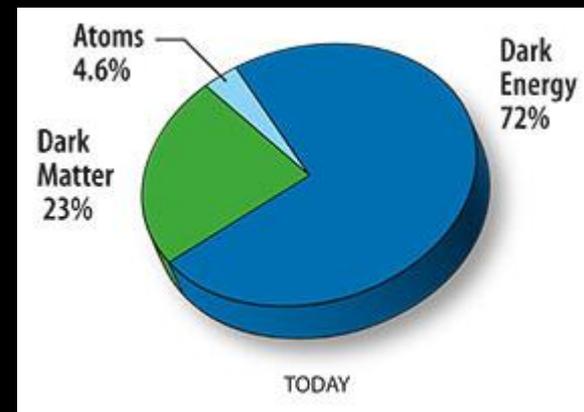
$$\Omega_\Lambda + \Omega_m \cong 1$$



Quelle <http://supernova.lbl.gov/Union/>



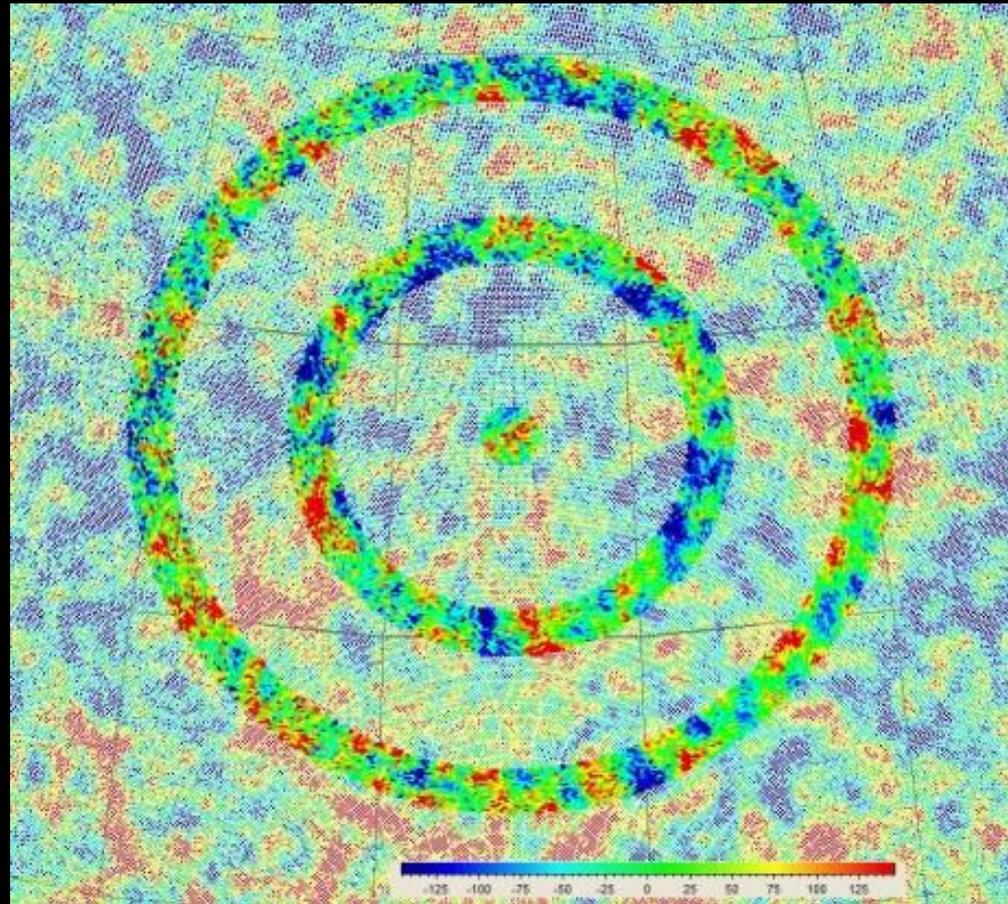
Kosmologisches Dreieck Quelle: [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)



Quelle <http://map.gsfc.nasa.gov>

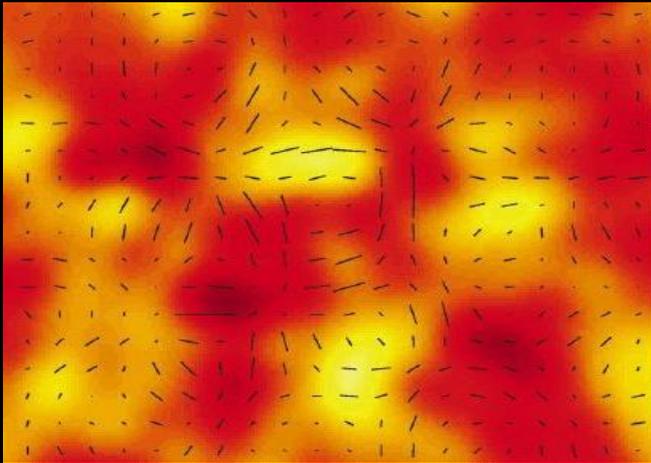
# Konzentrische Ringe in der CMB

- Es wurden konzentrische Kreise mit signifikant niedrigen Temperaturschwankungen gefunden
- Sogar Ringe mit gleichem Mittelpunkt
- Sowohl in WMAP-Daten als auch in BOOMERanG-Daten zu finden
- Mögliche Ursache sind Zusammenstöße von Schwarzen Löchern in dem Universum aus dem unseres entstanden ist



Konzentrische Kreise signifikant niedriger Energieschwankungen  
Quelle V. G. Gurzadyan & Roger Penrose et al. (2010)

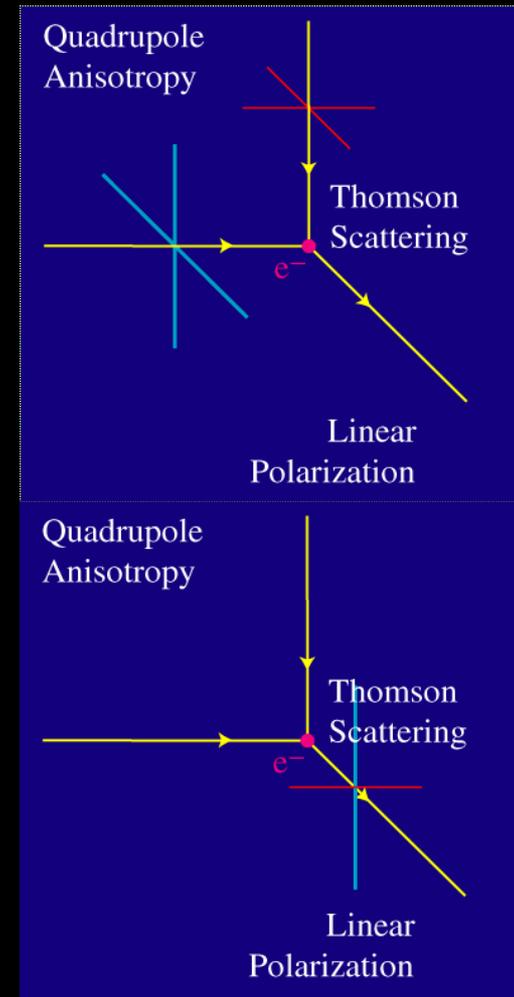
# Polarisation der CMB



Quelle <http://universe-review.ca/F02-cosmicbg.htm>

- E-Polarisation wird durch skalare Störungen (Dichteschwankungen) erzeugt
- B-Polarisation entsteht durch E-Polarisation bei Wirbelstörungen
- Nützliche Zusatzinformationen

→ **Planck Satellit**



Quelle [cosmology.berkeley.edu](http://cosmology.berkeley.edu)

# Quellen

- Einführung in die Extragalaktische Astronomie und Kosmologie, Peter Schneider, 2008
- <http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/index.html>
- <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- <http://background.uchicago.edu/>
- Skript zur Vorlesung Galaxies and Cosmology WS0910, Jörn Wilms
- UNSER KOSMOS Das Moderne Weltbild der Astronomie, Max Camenzind, 2008
- [http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/mcamenzi/FRWModelle\\_SS2010.pdf](http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/mcamenzi/FRWModelle_SS2010.pdf)
- Concentric circles in WMAP data may provide evidence of violent pre-Big-Bang activity, Gurzadyan & Penrose, 2010
- Fact & Fiction in Cosmology, Ned Wright, 2005

# Titel der Seite