

Physikalisches Seminar

*Cosmic Microwave Background Radiation [CMB]  
Messungen und ihre Interpretation*

Bastian Falkner

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

24.06.10

# Gliederung

- 1 Vorhersage und Entdeckung
- 2 Spektrum der CMB
- 3 Anisotropie
- 4 Messungen mit WMAP

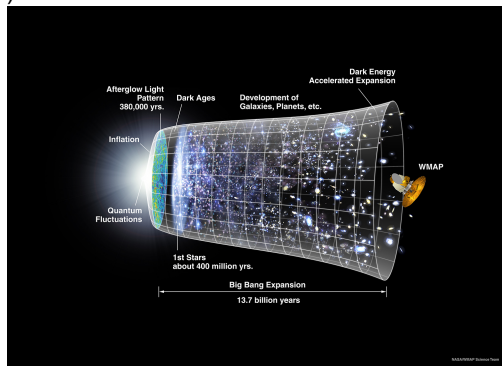
# Gliederung

- 1 Vorhersage und Entdeckung
- 2 Spektrum der CMB
- 3 Anisotropie
- 4 Messungen mit WMAP

# Theoretische Vorhersage der CMB

1948 Theoretische Vorhersage der Existenz der CMB durch R. Alpher, R. Herman und G. Gamow als Nebenprodukt ihrer Arbeit *Big Bang Nucleosynthesis* (BBN).

- ↳ Die BBN ist Teil der Urknalltheorie, in der während der *Rekombination* die Photonen entkoppeln.
- ⇒ Heutige CMB mit Schwarzkörperspektrum entsprechend einer Temperatur  $T \approx 5 \text{ K}$ .

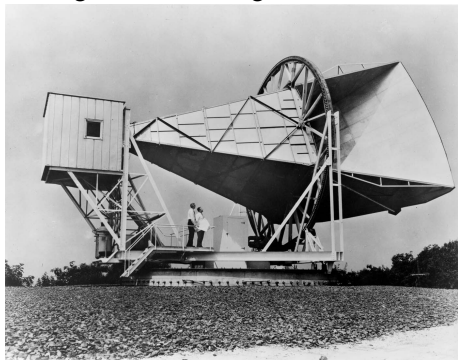


Entwicklung des Universums *Quelle: <http://wmap.gsfc.nasa.gov>*



# “Erste“ Messung

1965 Zufällige Entdeckung durch A. Penzias und R. Wilson mit ihrer



Horn Antenne Quelle: Wikipedia

Radio-Horn-Antenne. Isotropes, unpolarisiertes und saisonal variationfreies Rauschen, das erst durch R. Dicke und D. Wilkinson als CMB identifiziert wurde.

- Gleichzeitig: Entwurf eines Experiment zur Messung der CMB (Dicke). Zitat: "Boys, we've been scooped."
- Penzias und Wilson erhielten 1978 den Nobelpreis.

# Gliederung

- 1 Vorhersage und Entdeckung
- 2 Spektrum der CMB**
- 3 Anisotropie
- 4 Messungen mit WMAP

# Rekombination

Bedingungen nach der BBN

$$t \sim 3 \text{ Min}$$

$$T \sim 8 \cdot 10^8 \text{ K}$$

Zusammensetzung:

Photonen

Elektronen

Protonen (75%)

He-Kerne (25%)

Neutrinos (entkoppelt)

WIMPs

Im  
GG

$$\eta := \frac{n_b}{n_\gamma} \sim 2.74 \cdot 10^{-8} (\Omega_b h^2)$$

## Rekombination:

Freie Elektronen verbinden sich mit Atomkernen, wenn  $T < T_{\text{rec}}$ .

$$T_{\text{rec}} \approx \chi_{\text{H}} = 13.6 \text{ eV} \approx 1.6 \cdot 10^5 \text{ K}$$

**ABER:**  $\eta \ll 1 \Rightarrow T_{\text{rec}} \approx 3000 \text{ K}$

Über den Ionisationsgrad  $x(z)$  erhält man die optische Tiefe der Thomson-Streuung:

$$\tau(z) = 0.37 \left( \frac{z}{1000} \right)^{14.25}$$

$$\Rightarrow z_{\text{CMB}} \sim 1000 \sim 380000 \text{ yr}$$

## Zeitliche Entwicklung eines Planck-Spektrums

Aus der Planck-Funktion  $B_\nu$  ergibt sich die Anzahldichte  $dN_\nu$  von Photonen pro Frequenzintervall  $d\nu$  bei einer Temperatur  $T_0$  zu:

$$\frac{dN_\nu}{d\nu} = \frac{4\pi}{c} \frac{B_\nu}{h\nu} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T_0}\right) - 1}$$

$$\left. \begin{array}{l} dN'_{\nu'} = dN_\nu \cdot a^3 \\ d\nu' = d\nu \cdot a \\ \nu' = \nu \cdot a \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{dN'_{\nu'}}{d\nu'} = \frac{dN_\nu \cdot a^3}{d\nu \cdot a} = a^2 \frac{8\pi(\nu'/a)^2}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h(\nu'/a)}{k_B T_0}\right) - 1}$$

$$= \frac{8\pi\nu'^2}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu'}{k_B T'}\right) - 1}$$

$$1 + z = a^{-1} \quad \Rightarrow$$

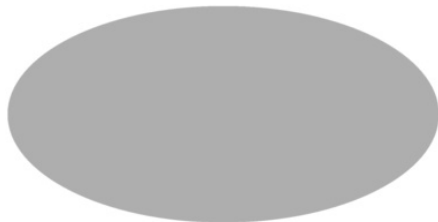
$$T' = T_0 \cdot a = T_0 / (1 + z)$$

⇒ Ein Planck-Spektrum bleibt während der Expansion des Universums erhalten.

# Fazit

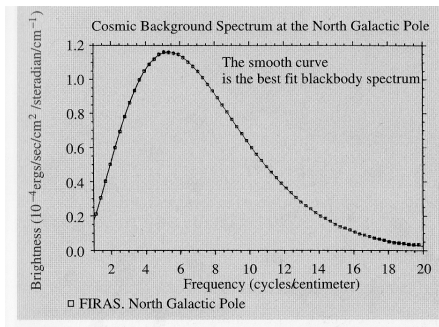
Erwartung: Isotrop am Himmel verteiltes Planck-Spektrum mit der Temperatur  $T \sim 3000 \text{ K}/(1000) = 3 \text{ K}$ .

Stimmt mit Messungen von Penzias und Wilson (1965) überein.



CMB Temperatur

Quelle: <http://www.astro.ucla.edu/~wright/>



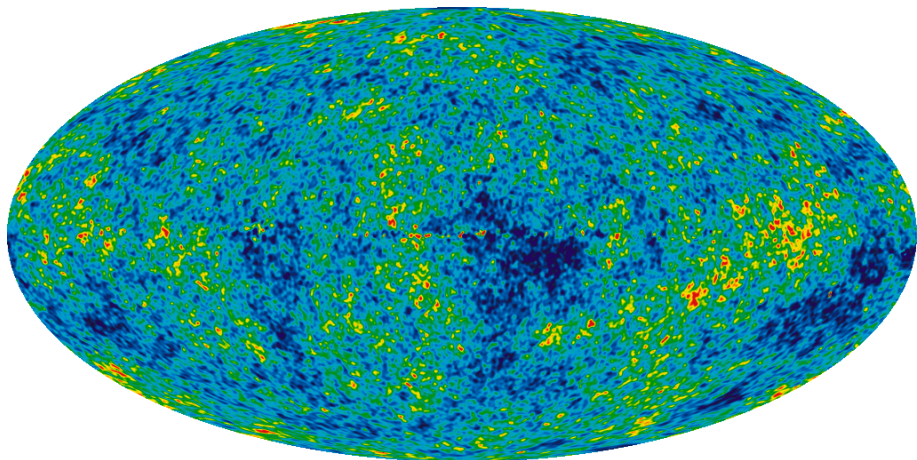
CMB Spektrum (COBE) Quelle: Karttunen & Kröger

**Bemerkung:** Die Messung der CMB bestätigt das Urknallmodell.

# Gliederung

- 1 Vorhersage und Entdeckung
- 2 Spektrum der CMB
- 3 Anisotropie**
- 4 Messungen mit WMAP

# Die CMB (W)MAP



$$-200\mu\text{K} < \Delta T < 200\mu\text{K}$$

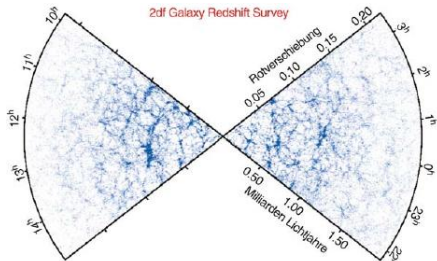
CMB Quelle: <http://wmap.gsfc.nasa.gov>

# Strukturbildung & Anisotropie

Weitere wichtige Eigenschaft der CMB, die **Anisotropie**:  
 Wäre die CMB perfekt homogen gäbe es uns nicht! Denn unser  
 Universum

weist Strukturen auf (Galaxien, Gruppen, Haufen, Voids)

→ ist **nicht** homogen auf Skalen  $\leq 100$  Mpc



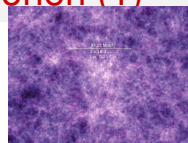
Galaxienstruktur Quelle: Schneider

Strukturen entsprechen **Dichtefluktuationen**, welche schon in der Frühzeit des Universums bestanden haben müssen (insbesondere vor der Rekombination).

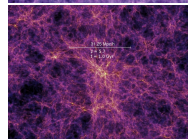


# Abschätzung der Größe der Fluktuationen (1)

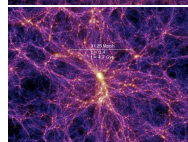
- Ursache in Inflation begründet: Quantenfluktuationen  $\Rightarrow$  makroskopischen Schwankungen
- Aus Friedmann-Gleichungen und obigen Beobachtungen:  
Wachstumsfaktor seit Rekombination  
 $\sim 1000 \Leftrightarrow$  Dichteschwankungen der Größenordnung  $\delta_{\text{CMB}} \gtrsim 10^{-3}$



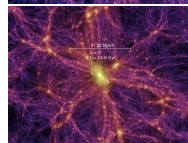
$z = 18.3$   
 $t = 0.21 \text{ Gyr}$



$z = 5.7$   
 $t = 1.00 \text{ Gyr}$



$z = 1.4$   
 $t = 4.70 \text{ Gyr}$

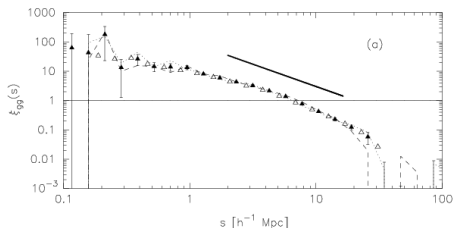


$z = 0$   
 $t = 13.6 \text{ Gyr}$

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

# Leistungsspektrum $P(k)$

- Dichtefluktuationen theoretisch beschrieben durch Korrelationsfunktion  $\xi(r)$  bzw. Leistungsspektrum  $P(k)$
- $P(k)$ : Amplitude der Anisotropie als Funktion der Längenskala  $L \simeq 2\pi/k$
- Formal ist  $P(k)$  die Fourier-Transformierte der (Zwei-Punkt)-Korrelationsfunktion  $\xi(r)$
- Veranschaulichung anhand Galaxienverteilung:

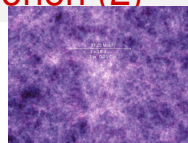


Quelle: Tucker et al., 1997

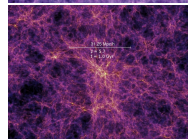
- WSK eine Galaxie am Ort  $\vec{x}$  im Volumenelement  $dV$  zu finden :  $P = \bar{n}dV$
- $P(\vec{x}, \vec{y}) = (\bar{n}dV)^2 [1 + \xi_g(\vec{x}, \vec{y})]$
- Homogenität  $\Rightarrow \xi_g(\vec{x} - \vec{y})$
- Isotropie  $\Rightarrow \xi_g(|\vec{x} - \vec{y}|)$

# Abschätzung der Größe der Fluktuationen (2)

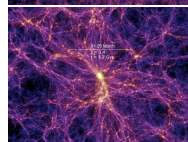
- Aber frühere Messungen zeigten  $\delta_{\text{CMB}} \ll 10^{-3} \Rightarrow$  CMB zu homogen!
- Hinweis auf kalte (nicht relativistische) Dunkle Materie (DM)
- Photonen WW mit Baryonen nicht aber mit DM
  - Baryonen durch Photonendruck nicht an Gravitationspotential der DM gebunden
  - Nach Rekombination folgen Baryonen dem Gravitationsfeld der DM
  - kalt: Kleine Strukturen bilden sich zuerst



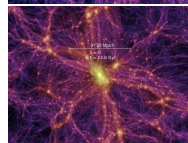
$z = 18.3$   
 $t = 0.21$  Gyr



$z = 5.7$   
 $t = 1.00$  Gyr



$z = 1.4$   
 $t = 4.70$  Gyr



$z = 0$   
 $t = 13.6$  Gyr

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

# Beeinflussende Effekte: Primäre Anisotropien (1)

## Primäre Anisotropien: Effekte während der Rekombination

### 1 Sachs-Wolfe-Effekt:

Gravitative Rotverschiebung (relativistische Betrachtung):

$$\Delta T = \frac{1}{3} \frac{\varphi}{c^2}$$

### 2 Dopplereffekt durch Pekuliargeschwindigkeit der Rekombinations-Elektronen (korreliert mit Dichtfluktuationen):

$$\Delta T = \frac{\Delta v_{\parallel}}{c}$$

### 3 Gebiete höherer Baryonendichte (durch adiabatische Kompression) haben eine höhere Temperatur.

## Beeinflussende Effekte: Primäre Anisotropien (2)

- ④ Silk-Damping:  
Dämpfung der kleinskaligen Fluktuationen  $\lesssim 5'$  aufgrund der Mittelung über Maxima und Minima in der Temperatur, die unterhalb der mittleren freien Weglänge der Photonen auftreten.

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

# Beeinflussende Effekte: Sekundäre Anisotropien (1)

## Sekundäre Anisotropien: Effekte bei der Propagation

- 1 Isotrope Thomson-Streuung der CMB-Photonen an freien Elektronen (Reionisation bei  $z > 6$ ) erzeugt eine Komponente mit mittlerer Temperatur der CMB:  $\Delta T \sim e^{-\tau(z)}$
- 2 *integrierter Sachs-Wolfe-Effekt:*  
Beim Durchlaufen durch zeitlich variable Gravitationsfelder können CMB-Photonen ihre Wellenlänge ändern:  $\Delta T = 2 \frac{\Delta \varphi}{c^2}$

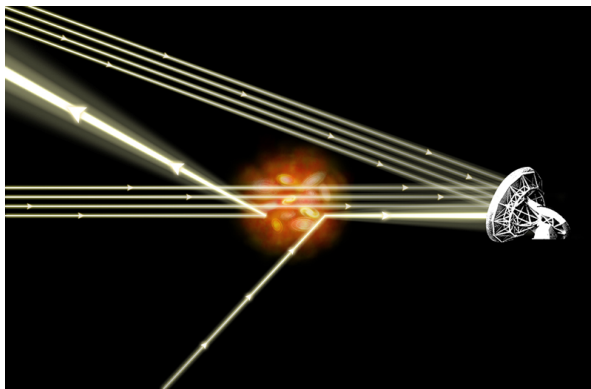


ISW Quelle: <http://cosmictimes.gsfc.nasa.gov/>

- 3 Gravitative Richtungsänderung (ähnlich Gravitationslinsen-Effekt)

## Beeinflussende Effekte: Sekundäre Anisotropien (2)

- 4 *Sunyaev-Zeldovich-Effekt:*  
Heiße Gaswolken können den CMB-Photonen durch Inversen Compton-Effekt Energie zuführen.



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

# Gliederung

- 1 Vorhersage und Entdeckung
- 2 Spektrum der CMB
- 3 Anisotropie
- 4 Messungen mit WMAP**



# Von damals bis heute

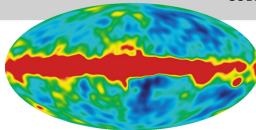
1965

Penzias and  
Wilson

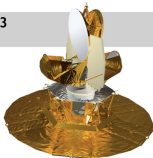
1992



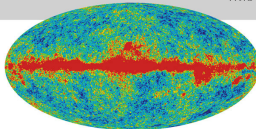
COBE



2003



WMAP



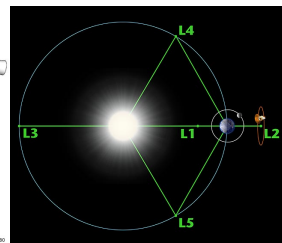
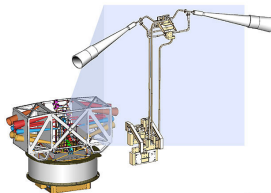
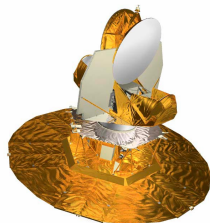
Auflösung  $7^\circ$   
Erste Messung der  
Anisotropie

Auflösung  $0.3^\circ$

WMAP Quelle: <http://wmap.gsfc.nasa.gov>

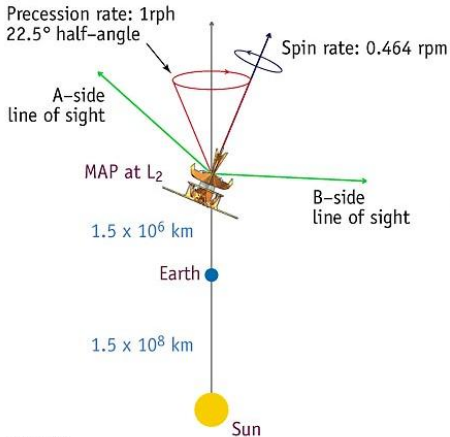
# Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

- Seit 2003 Scan des gesamten Himmels mit  $3.5^\circ \times 3.5^\circ$  Gesichtsfeld
- Winkelauflösung:  $0.93^\circ$  bis  $0.25^\circ$
- fünf Frequenzbändern: 22 GHz bis 90 GHz
- Sensitivität:  $35 \mu\text{K}$
- Orbit um den instabilen Lagrange-Punkt 2 (minimale Einflüsse durch Sonne und Erde)
- Gemessen werden Temperaturdifferenzen zwischen 2 verschiedenen Punkten



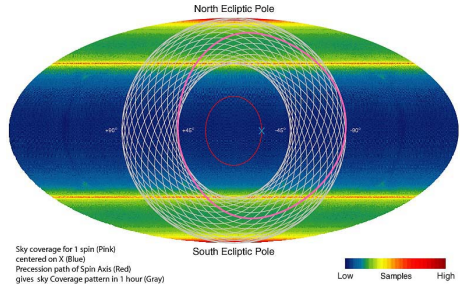
WMAP Quelle: <http://wmap.gsfc.nasa.gov>

# Scan Methode



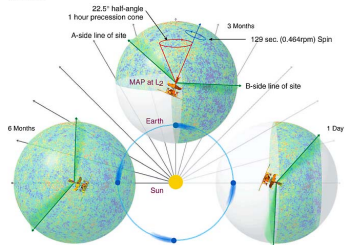
MAP990031

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

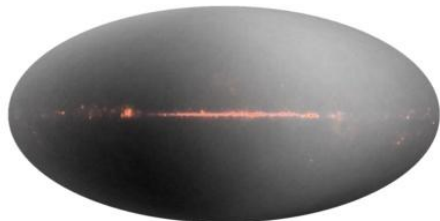
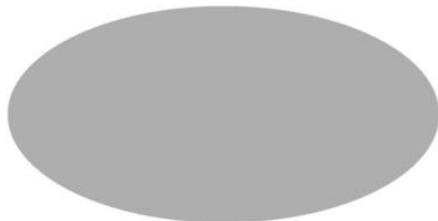


Sky coverage for 1 spin (Pink)  
centered on X (Blue)  
Precession path of Spin Axis (Red)  
gives sky Coverage pattern in 1 hour (Gray)

MAP990095



# Datenreduktion: Dipol Muster



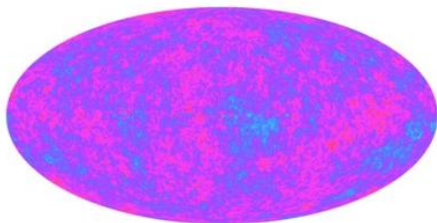
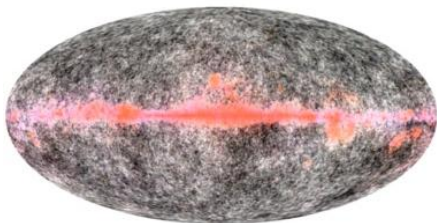
Dipol Muster Quelle: <http://www.astro.ucla.edu/~wright/CMB-DT.html>

↳ CMB bei  $T_{\text{CMB}} \simeq 2.725 \text{ K}$

↳ Abzüglich mittlerer  $T_{\text{CMB}}$

- Rechts: Dipol Muster erkennbar
- Zurückzuführen auf die Pekuliargeschwindigkeit des Sonnensystems bzgl. des Universums (Dopplereffekt)
- $\Delta T = v/c$  ist diese berechenbar:  
 $v \approx 368 \pm 2 \text{ km/s}$  ( $l_g = 264^\circ, b_g = 48^\circ$ )

# Datenreduktion: Galaktischer Hintergrund



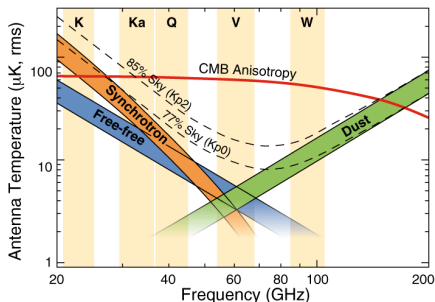
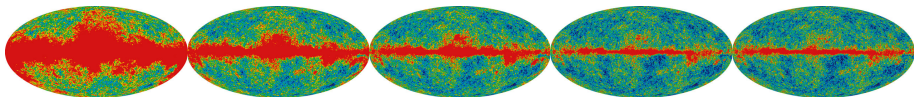
Galaktischer Hintergrund *Quelle: <http://www.astro.ucla.edu/~wright/CMB-DT.html>*

↳ Abzüglich Dipolfeld

↳ Abzüglich galaktischen Hintergrund

- Links hohe Emission in der galaktischen Ebene
- Zwei Verfahren um den galaktischen Hintergrund zu berechnen, **aber** nicht sehr einfach und fehlerbehaftet.

# Warum die fünf Frequenzbänderbänder

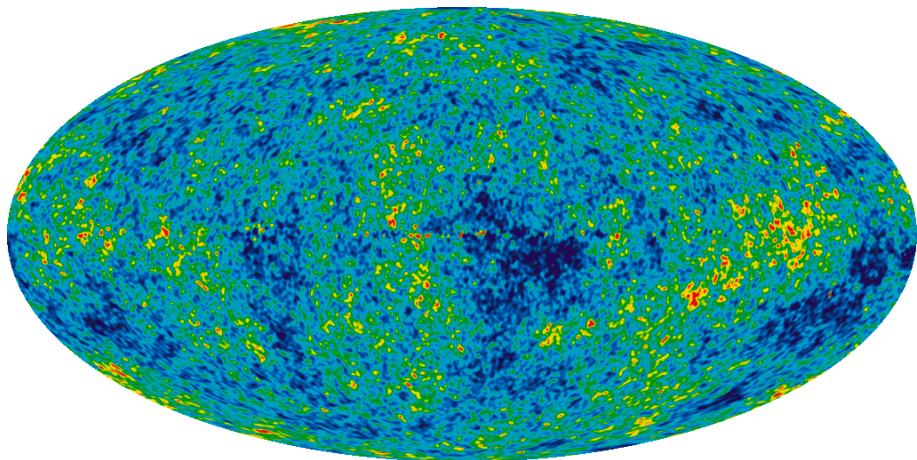


## 1. Verfahren:

- 3 Komponenten: **Synchrotron** ( $I_\nu \propto \nu^{-0.8}$ ), **Thermische Strahlung** ( $I_\nu \propto \nu^{3.5}$ ) und **Bremsstrahlung**
- Durch Messung in 5 Bändern, einzelne Spektren identifizierbar

2. Verfahren: Verwendung externer Daten von All-Sky-Surveys der entsprechenden Komponenten

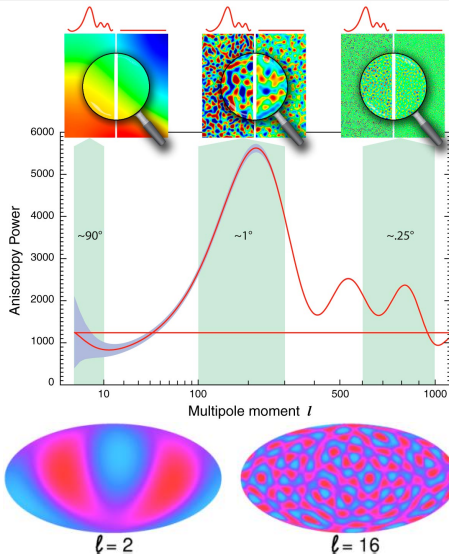
# Die CMB (W)MAP



$$-200\mu\text{K} < \Delta T < 200\mu\text{K}$$

CMB Quelle: <http://wmap.gsfc.nasa.gov>

# Leistungsspektrum der CMB

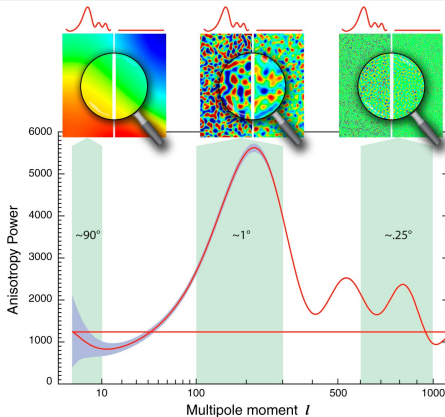


Modifikation notwendig, wegen Projektion auf Kugeloberfläche

- $P(k)$  nicht mehr Fourier-Transformierte von  $\xi(r)$
- Modifikation mit Kugelflächenfunktionen  $Y_{\ell,m}(\vartheta,\varphi)$
- $\ell$  (Multipol Moment) beschreibt die Fluktuationsgröße  $\ell \sim 180^\circ/\theta$
- $m$ : Realisierungsmöglichkeiten
- CMB Überlagerung vieler Multipol Momente



# Akustische Peaks



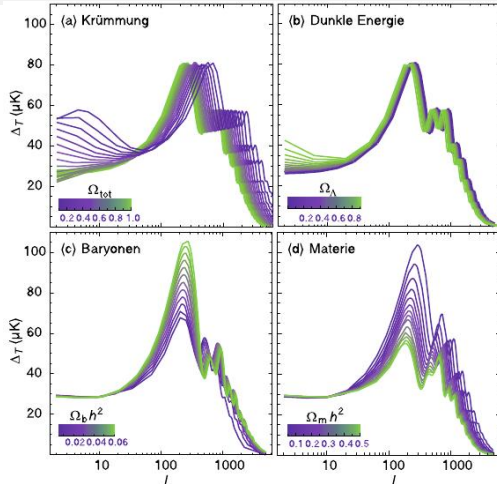
Horizontlänge (flache Modelle):  
 $\ell_H \sim 100$  bzw.  $\theta_H \sim 1.8^\circ$

- $l \gtrsim \ell_H$  Oszillationen der (relativistischen) Baryonen-Photonen Flüssigkeit (Verursacht durch Photonendruck & Gravitationsfeld der DM)

$\Rightarrow c_s \approx c/\sqrt{3}$  in  $\lambda_{\max} \simeq t_{\text{rec}} c_s = r_H(t_{\text{rec}})/\sqrt{3}$   
 Schall-Horizont bei  $\ell_1 \sim 200$  bzw.  $\theta_1 \sim 1^\circ$

- Für  $\ell \gtrsim 2500$  Dämpfung durch Silk-Damping. Für größere Skalen keine Oszillationen möglich; durch Sachs-Wolfe Effekt dominiert.

# Abhängigkeit von den kosmologischen Parametern



Referenz:  $\Omega_m + \Omega_{\Lambda} = 1$ ;  $\Omega_{\Lambda} = 0.65$ ;  $\Omega_b h^2 = 0.02$ ;  $\Omega_m h^2 = 0.147$

Abhängigkeiten Quelle: <http://wmap.gsfc.nasa.gov>

Klick & Play

Leistungsspektrum abhängig von  $\Omega_{\text{tot}}$ ,  $\Omega_b$ ,  $\Omega_m$ ,  $\Omega_{\Lambda}$  und  $H_0$

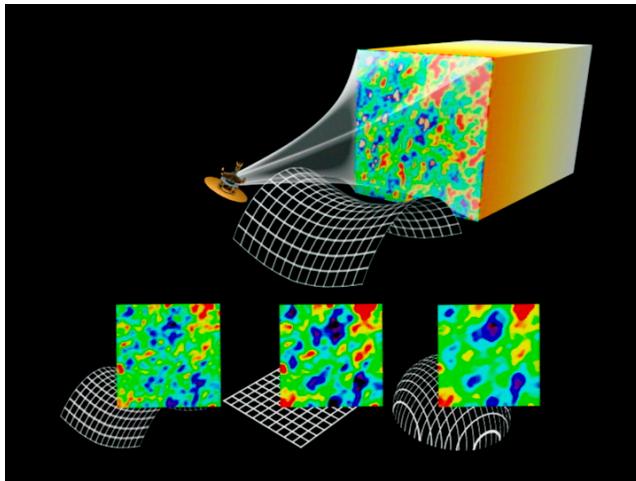
**(a) Krümmung:** Steigt  $\Omega_{\text{tot}}$  so  
 ↳ verschieben sich Akust. Peaks  
 ↳ verringert sich  $\Delta T$  für  $l \lesssim 100$

**(b) Dunkle Energie  $\Omega_{\Lambda}$ :**  
 Mit  $\Omega_{\Lambda}$  steigt auch  $\Delta T$  für  $l \lesssim 100$

**(c) Baryonen:** Steigt  $\Omega_b$  so  
 ↳ vergrößert sich 1. Peak  $l_1$   
 ↳ verringert sich 2. Peak  $l_2$   
 ↳ sinkt die Dämpfung für große  $l$

**(d) Materie:** Steigt  $\Omega_m$  so  
 ↳ verkleinern sich die Peak-Amplituden  
 ↳ verschieben sich die Peaks

# Raumkrümmung



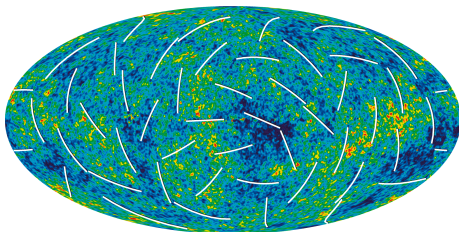
**Krümmung:**  
hauptsächlich be-  
stimmt durch Positi-  
on der Akustischen  
Peaks.

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

# Reionisation und Polarisation

## Reionisation:

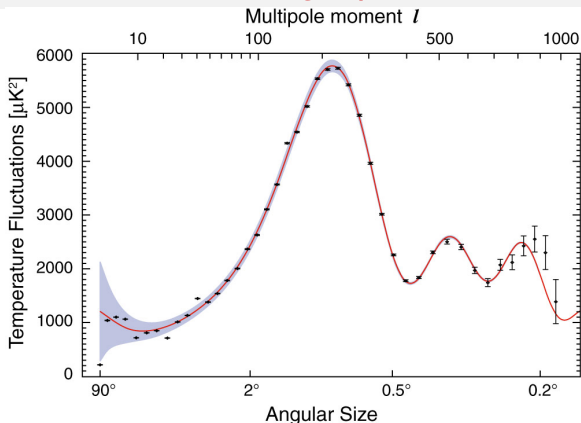
Anhand des *Leistungsspektrums* und der *Polarisation* kann der Zeitpunkt der Reionisation  $z_{\text{ion}} \approx 10.5$  bestimmt werden:



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

- Reduktion und Polarisation der Fluktuationen durch WW der CMB-Photonen mit Elektronen
- ↳ (Isotrop) gestreute Photonen sind  $\perp$  zu  $E(\gamma, \gamma')$  polarisiert. Polarisationsgrad abhängig von  $\tau(z)$
- ↳ Reduktionsfaktor  $e^{-\tau(z)}$   
 $\tau(z)$ : optische Tiefe der Thomson-Streuung
- ↳ Je größer  $z_{\text{ion}}$  desto größer  $\tau$

# Aktuelles Leistungsspektrum von WMAP (2010)



## Parameter (WMAP)

$$h = 0.710 \pm 0.025$$

$$\Omega_c = 0.222 \pm 0.026$$

$$\Omega_b = 0.0449 \pm 0.0028$$

$$\Omega_\Lambda = 0.734 \pm 0.029$$

$$t_0 = 13.75 \pm 0.13 \text{ Gyr}$$

$$z_{\text{ion}} = 10.5 \pm 1.2$$

$$z_{\text{rec}} = 1088_{-2}^{+1}$$

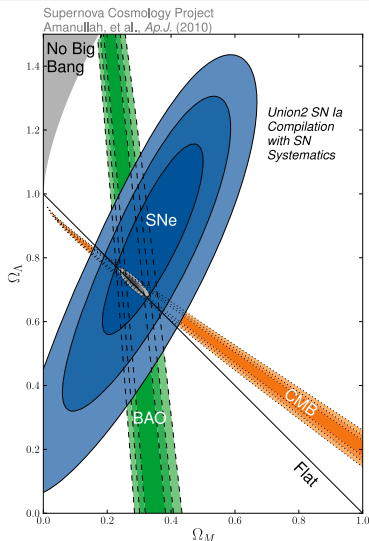
$$n_b = (2.7 \pm 0.1) \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$$

$$\eta = (6.5_{-0.3}^{+0.4}) \cdot 10^{-10}$$

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

**Kosmische Varianz:**  $\Delta C_\ell = C_\ell / \sqrt{2\ell + 1}$ , mit Multipol-Koeffizient  $C_\ell$ .  
 Grund: Zu jedem  $\ell$  gibt es  $2\ell + 1$  Realisierungsmöglichkeiten!

# Zukunft



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

## Planck:

Seit 2008 misst der europäische (ESA) Satellit Planck (L2) die CMB im Frequenzbereich 30 GHz bis 850 GHz mit einer Winkelauflösung von  $0.08^\circ$  und viel größeren Sensitivität.

- Noch bessere Parameterbestimmung, da Spektrum bis  $\ell \approx 2500$
- Entdeckung  $\sim 10^4$  neuer Galaxienhaufen
- Test der Inflationstheorie (Hinweise auf Phasenübergang?)
- Suche nach primordialen Gravitationswellen

# Quellen

- Peter Schneider, *Extragalaktische Astronomie und Kosmologie*, Springer Verlag 2008
- John A. Peacock, *Cosmological Physics*, Cambridge Press, 2003
- Hannu Karttunen/Pekka Kröger, *Fundamental Astronomy*, Springer Verlag 2007
- <http://wmap.gsfc.nasa.gov/>
- <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>
- <http://arxiv.org/abs/1001.4635>
- <http://www.esa.int/SPECIALS/Planck/index.html>