

Astroteilchenphysik - I

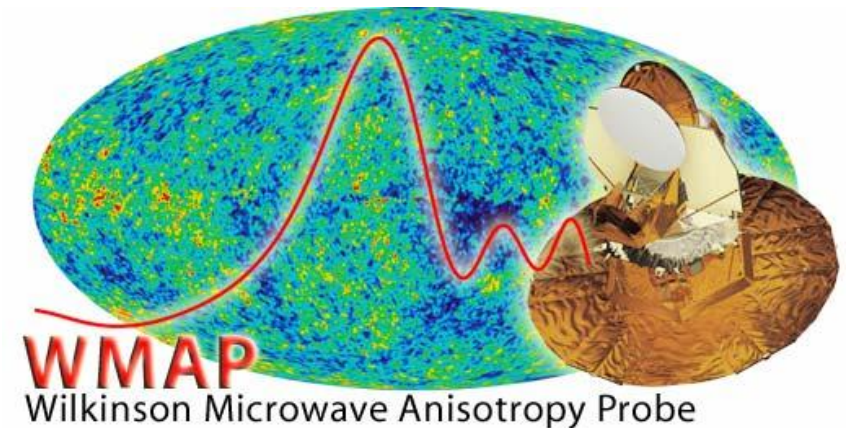
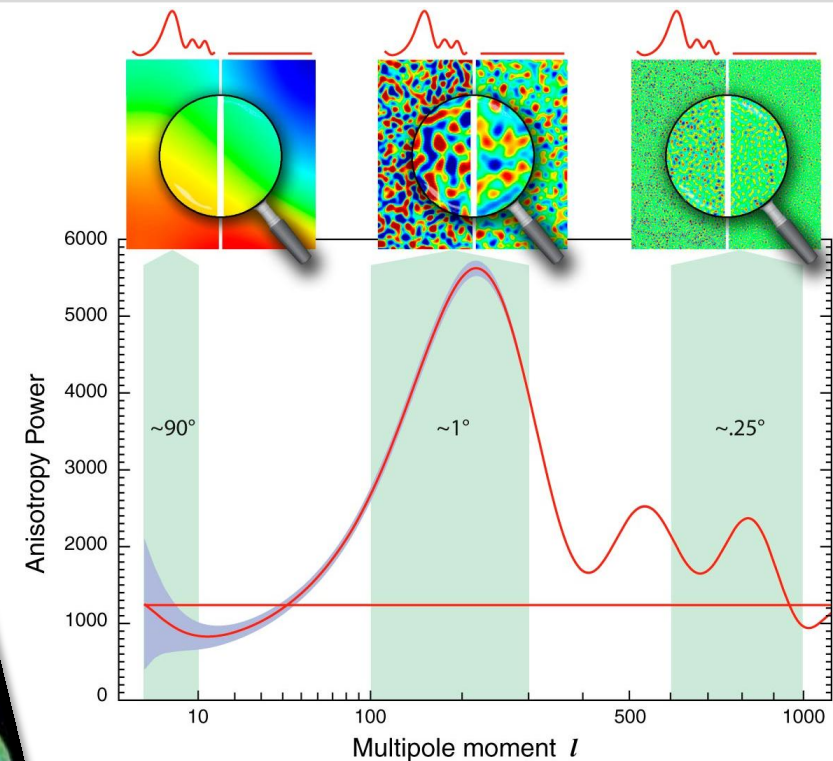
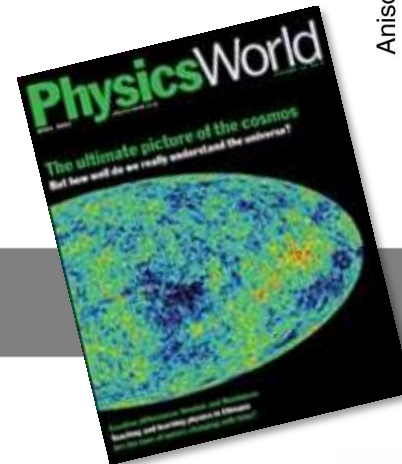
WS 2012/2013

Vorlesung # 06, 29.11.2012

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

kosmische Hintergrundstrahlung:

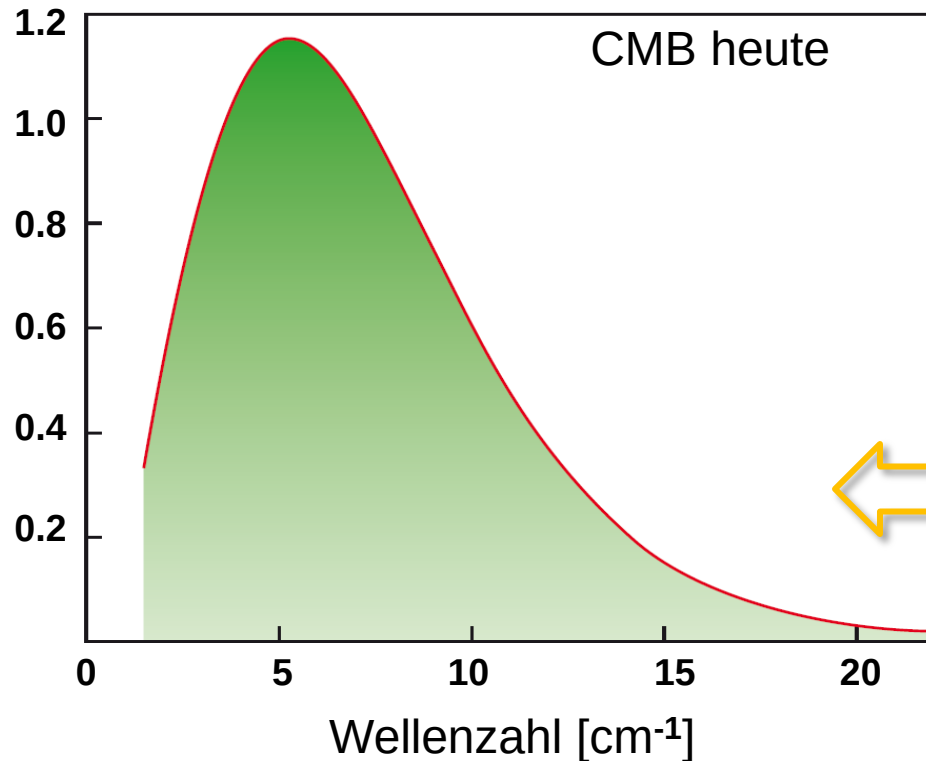
- WMAP: Messmethode & Resultate
- Multipolanalyse & Multipolspektrum
- primäre Anisotropien:
Sachs-Wolfe Effekt
- sekundäre Anisotropien:
integrierter Sachs-Wolfe Effekt



CMB - Grundlagen



- Erzeugung: Materie/Antimaterie-Annihilation (B-Asymmetrie $\sim 10^{-9}$)

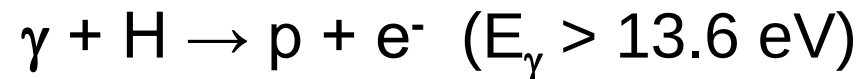


- Sacharov: C/CP Verletzung, B-Asymmetrie, kein thermisches Gleichgewicht

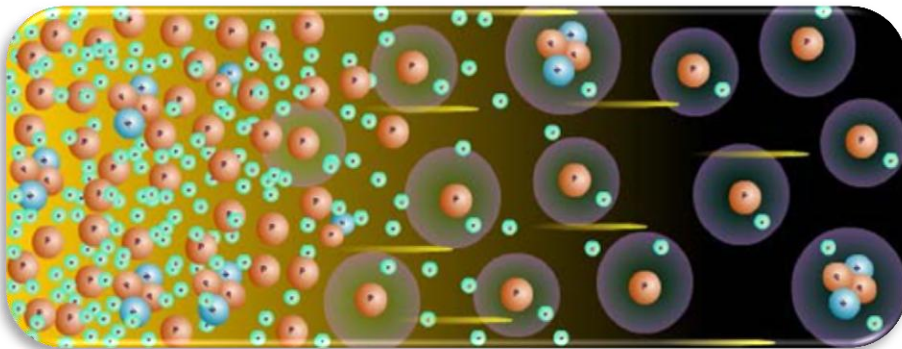
$$\rho_\gamma c^2 = 0.261 \frac{\text{MeV}}{m^3}$$

$$\Omega_\gamma = 5.05 \times 10^{-5}$$

strahlungsdominiertes
Universum $t < 10^4$ a



- Rekombination des Plasmas zu neutralen Atomen (CMB seither wechselwirkungsfrei) bei Rotverschiebung $z \sim 1100$



COBE – Temperaturskalen



Isotropie

$T = 2.725 \text{ K}$

Dipol

$\Delta T = 3.353 \text{ mK}$

Fluktuationen

$\Delta T = 18 \text{ } \mu\text{K}$

- **homogenes & isotropes Universum**
kosmologischer Ursprung der CMB
- Ursache der Isotropie? (Horizontproblem)

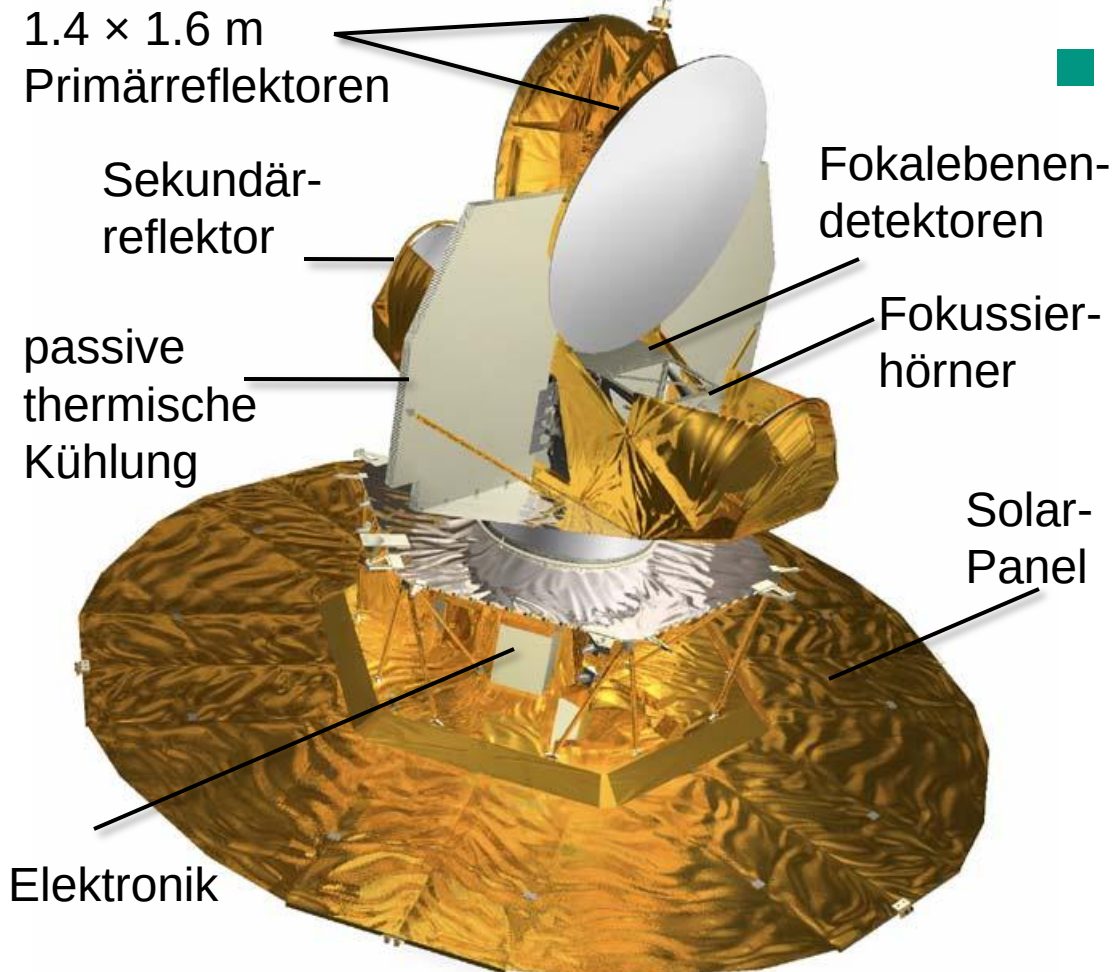
- **Dopplereffekt** durch Bewegung mit $v = 370 \text{ km/s}$ relativ zum CMB-System
- CMB kein relativistisch ausgezeichnetes Bezugssystem

- **primordiale Dichtefluktuationen** als Saatkerne der späteren Strukturbildung
- Stärke $\sim 10^{-5}$ entspricht Vorhersage der Inflationstheorie (aber heute $\langle \Delta \rho / \rho \rangle \sim 1$!)

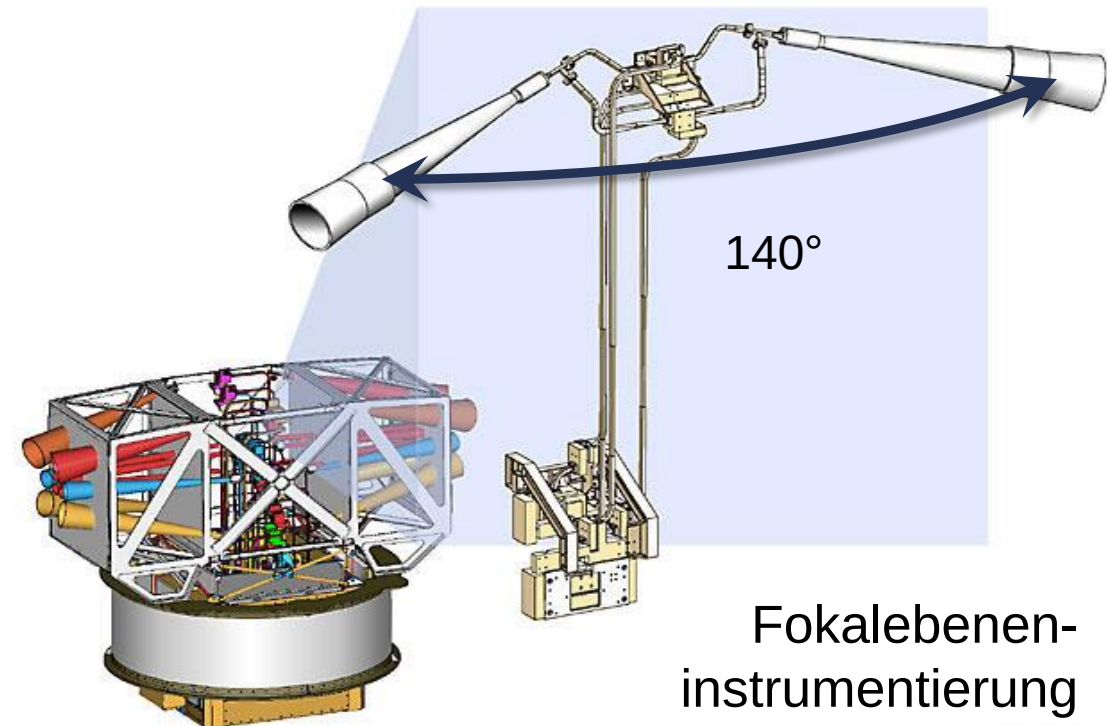
Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

■ **WMAP**: CMB-Raumsonde der NASA (2001-2010) am L2 Lagrangeunkt

Ziel: Untersuchung von CMB Temperatur-fluktuationen auf **kleinen Winkelskalen**



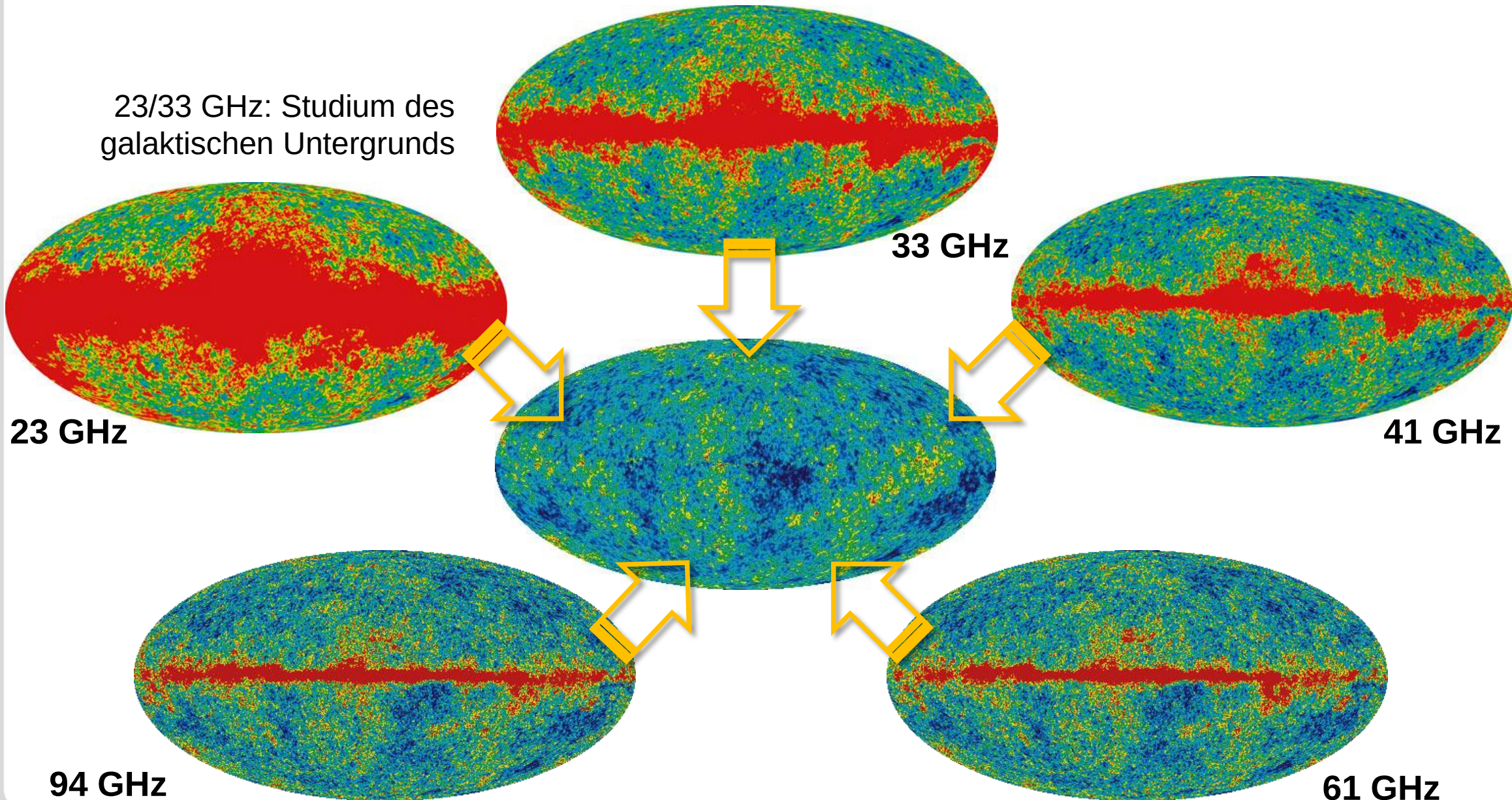
■ **Methode**: 2 × 5 differentielle Radiometer
bei $\nu = 23/33/41/61/94$ GHz



WMAP– Resultate in 5 Frequenzbändern

■ Kombination der Ergebnisse für untergrundkorrigierte CMB-Temperaturkarte

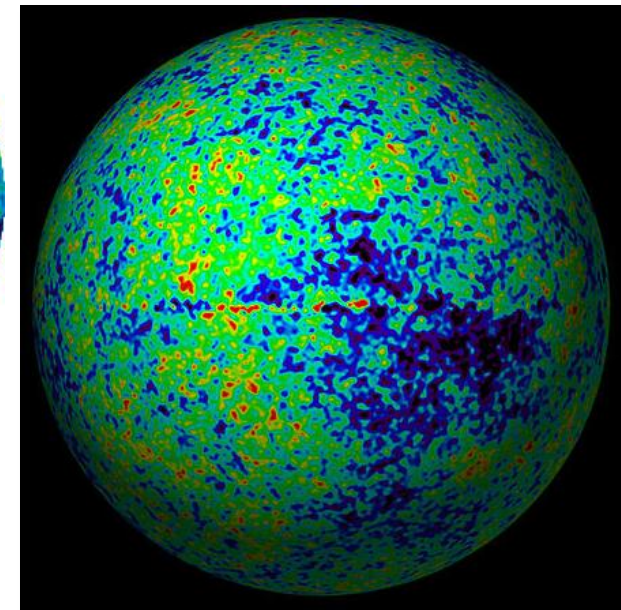
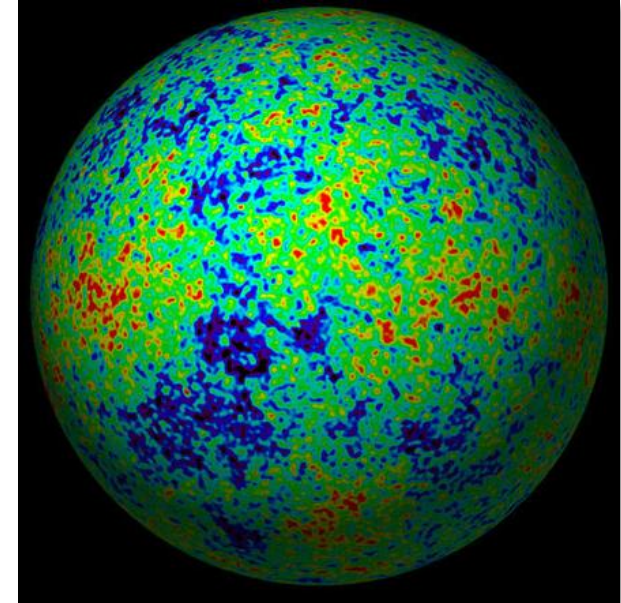
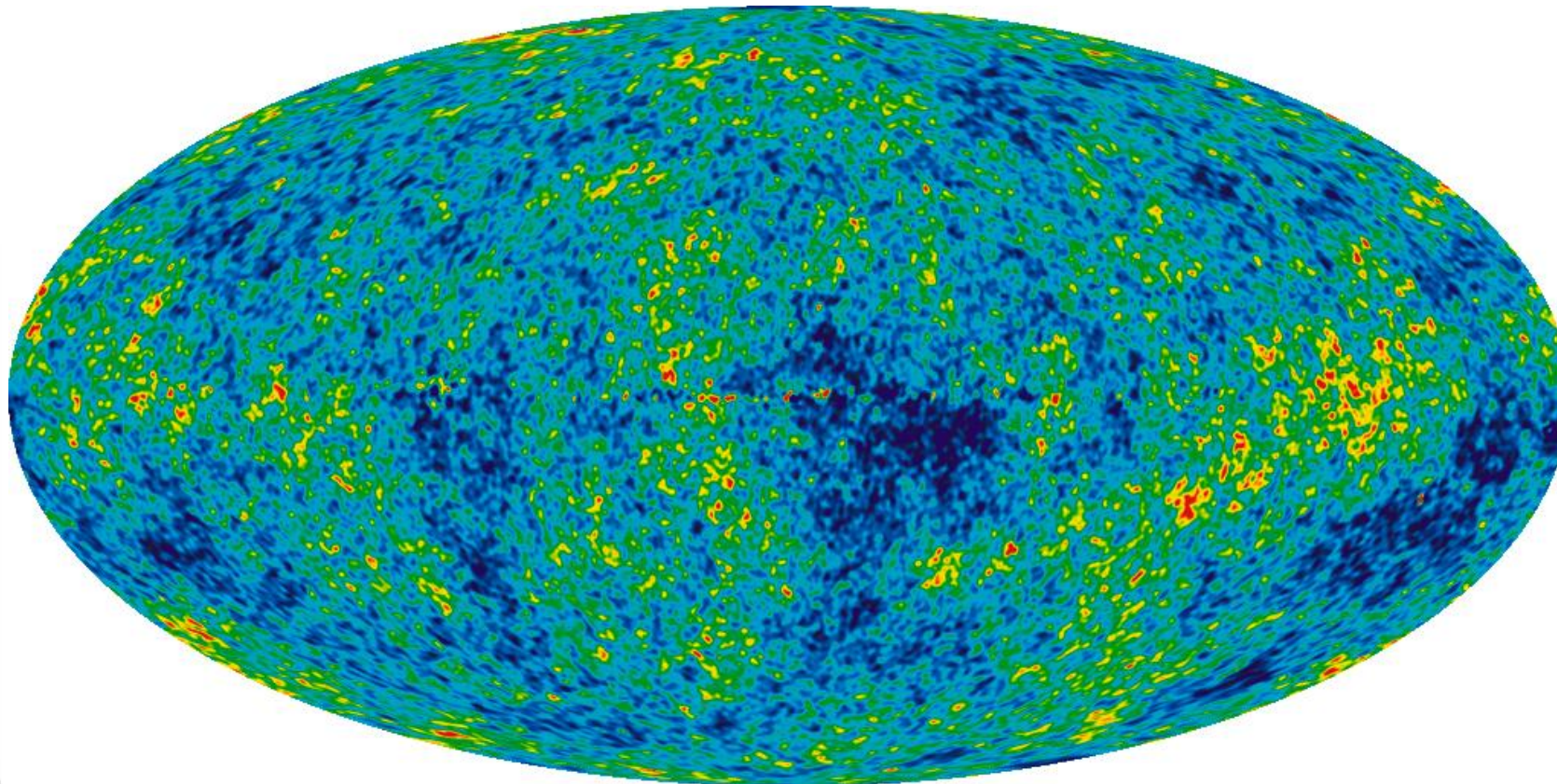
23/33 GHz: Studium des
galaktischen Untergrunds



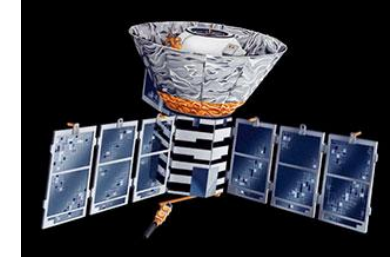
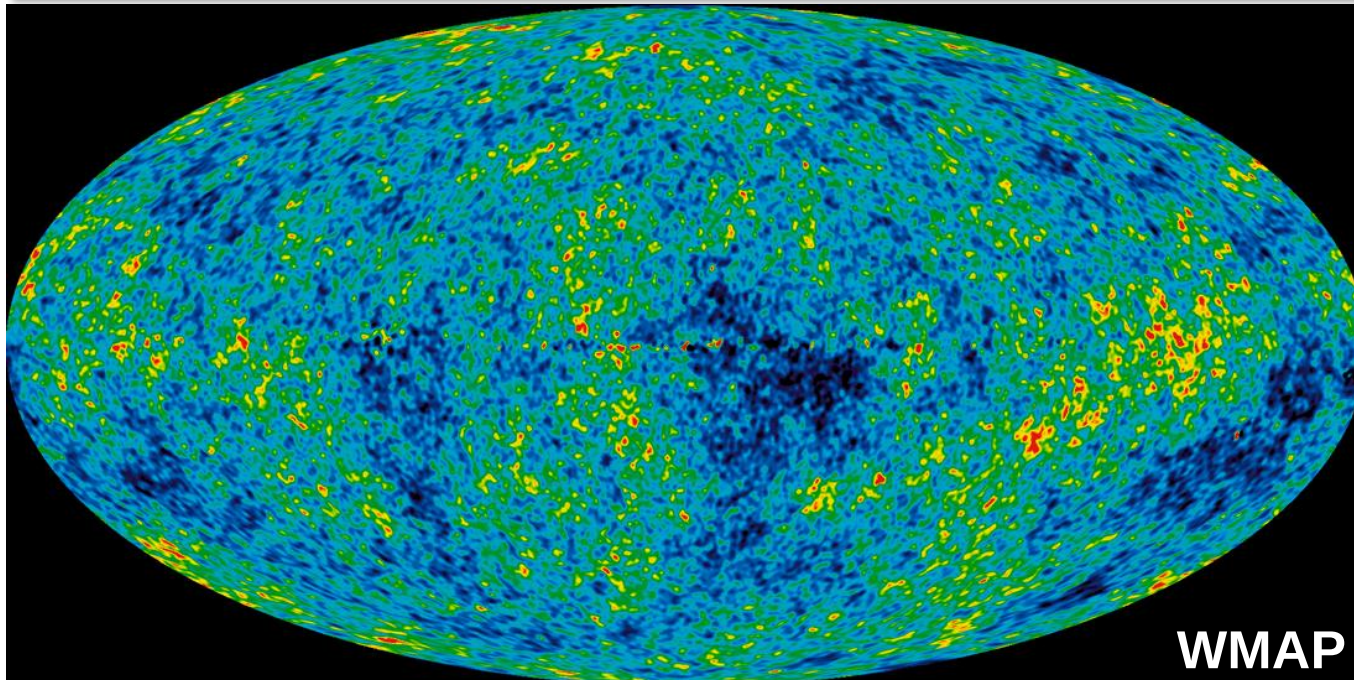
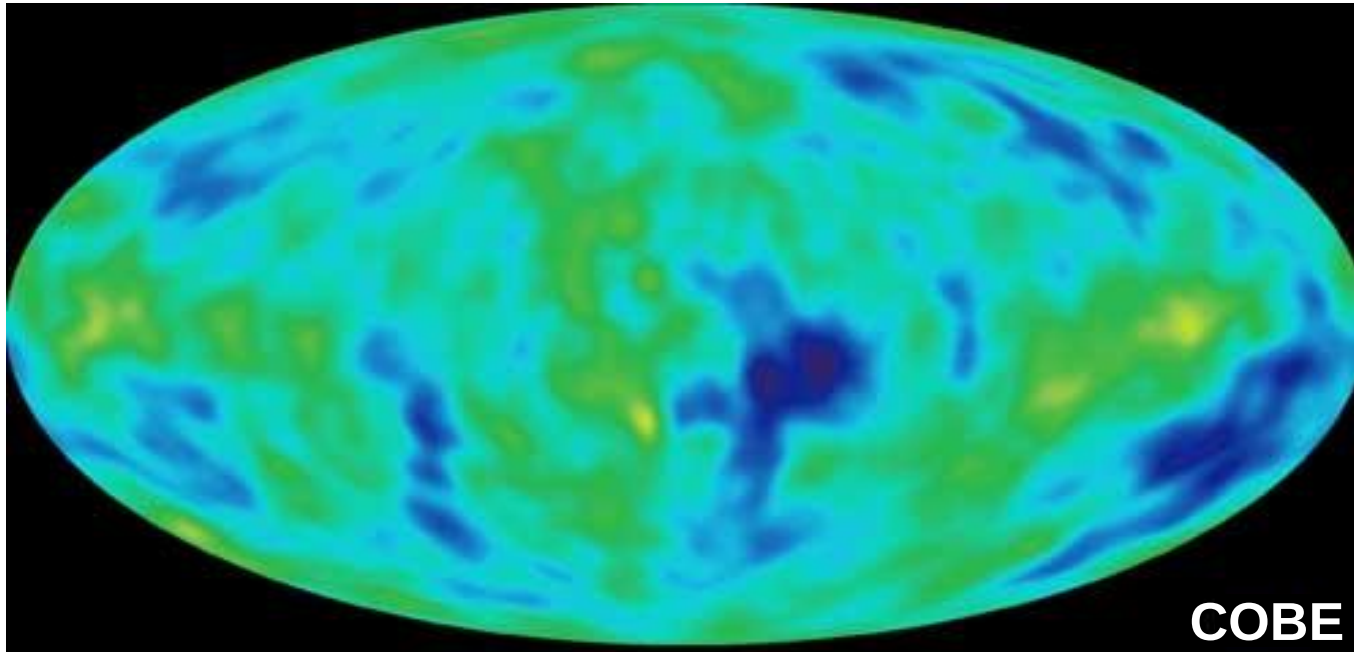
WMAP – Temperaturfluktuationen

■ CMB Temperaturverteilung

nach Abzug galaktischer Störsignale
WMAP 7 Jahre (2003-2010)



Vergleich von COBE und WMAP

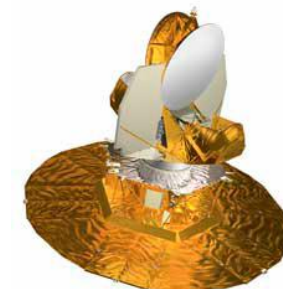


COBE: Winkelauflösungen

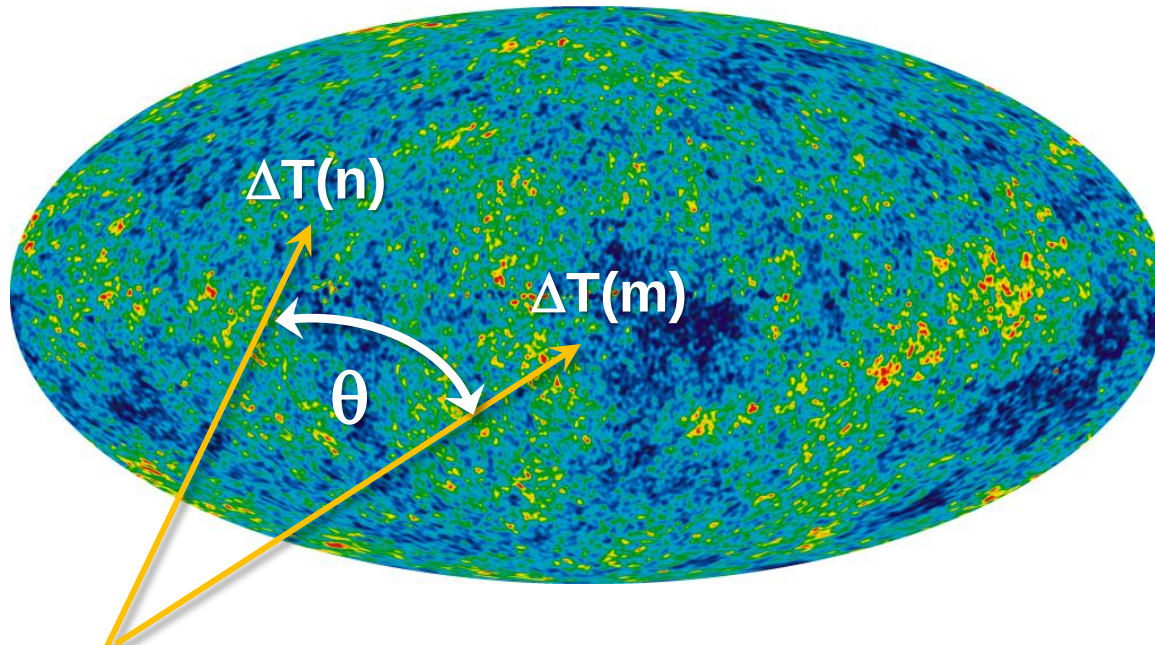
ν [GHz]	31.5	53	90
FWHM [°]	~ 7		

WMAP: Winkelauflösungen

ν [GHz]	22	30	40	60	90
FWHM [°]	0.93	0.68	0.53	0.35	<0.23



- **statistische** Analyse der Temperaturfluktuationen ΔT um mittleres T_0



- Entwicklung nach **Kugelflächenfunktionen** mit Koeffizienten $a_{\ell m}$:

$$T(\vec{n}) = T_0 \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{m=+\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}$$

für Gauß'sche Fluktuationen gilt:

$$C(\theta) = \left\langle \left(\frac{\Delta T(\vec{n})}{T_0} \right) \left(\frac{\Delta T(\vec{m})}{T_0} \right) \right\rangle$$

$$C(\theta) = \frac{1}{4\pi} \sum_{\ell} (2\ell + 1) C_{\ell} P_{\ell}(\cos \theta)$$

Korrelationsfunktion $C(\theta)$

Entwicklung nach
Legendre-Polynomen

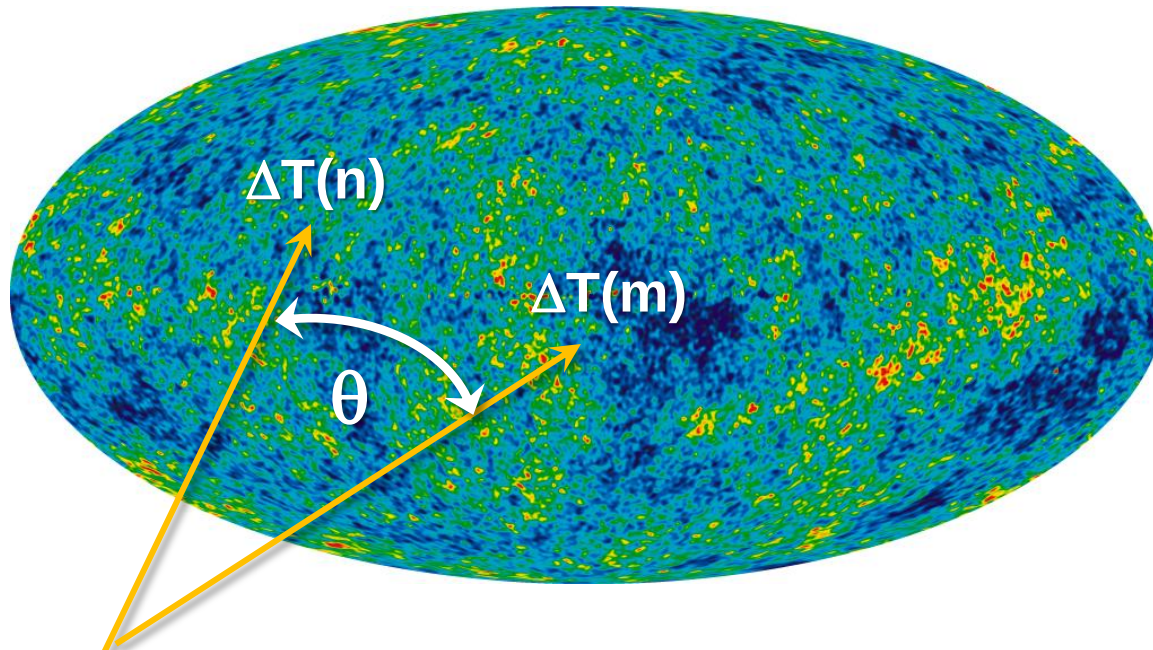
Koeffizienten C_{ℓ}

$$C_{\ell} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell m}|^2$$

↓
‘kosmische Varianz’

Multipolentwicklung – niedrige Multipole

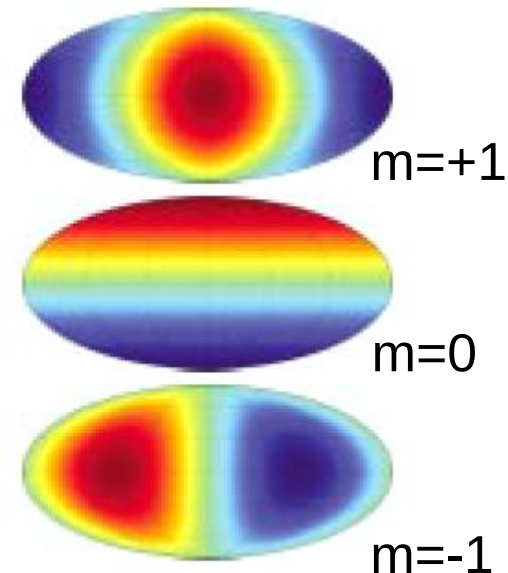
- Darstellung der einzelnen Multipole $\ell = 1, 2, \dots$ $m = -\ell, \dots, 0, \dots, +\ell$



$$(\Delta T)^2 = \ell \cdot (\ell + 1) C_\ell / 2\pi$$

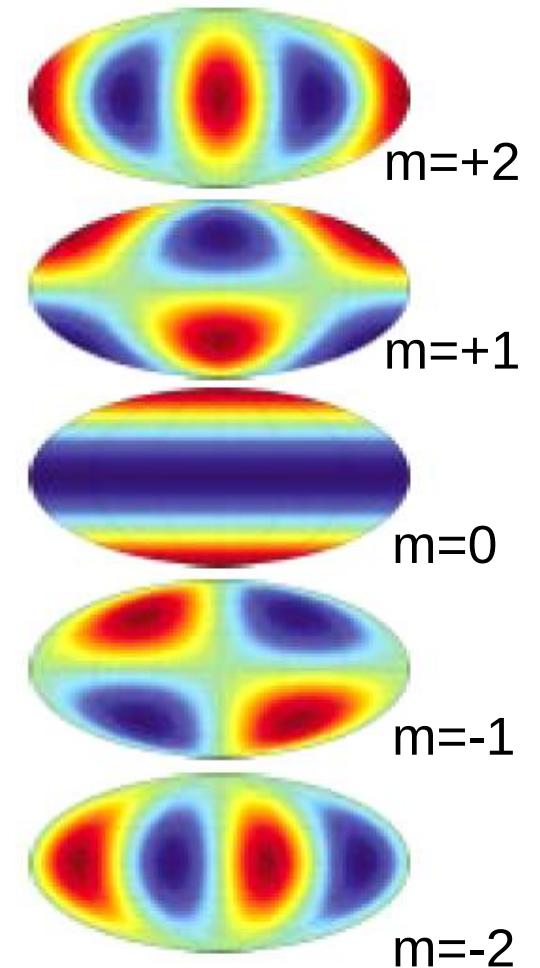
Temperaturfluktuationen als
Funktion der Multipolordnung

Dipol $\ell = 1$



3 Meßwerte

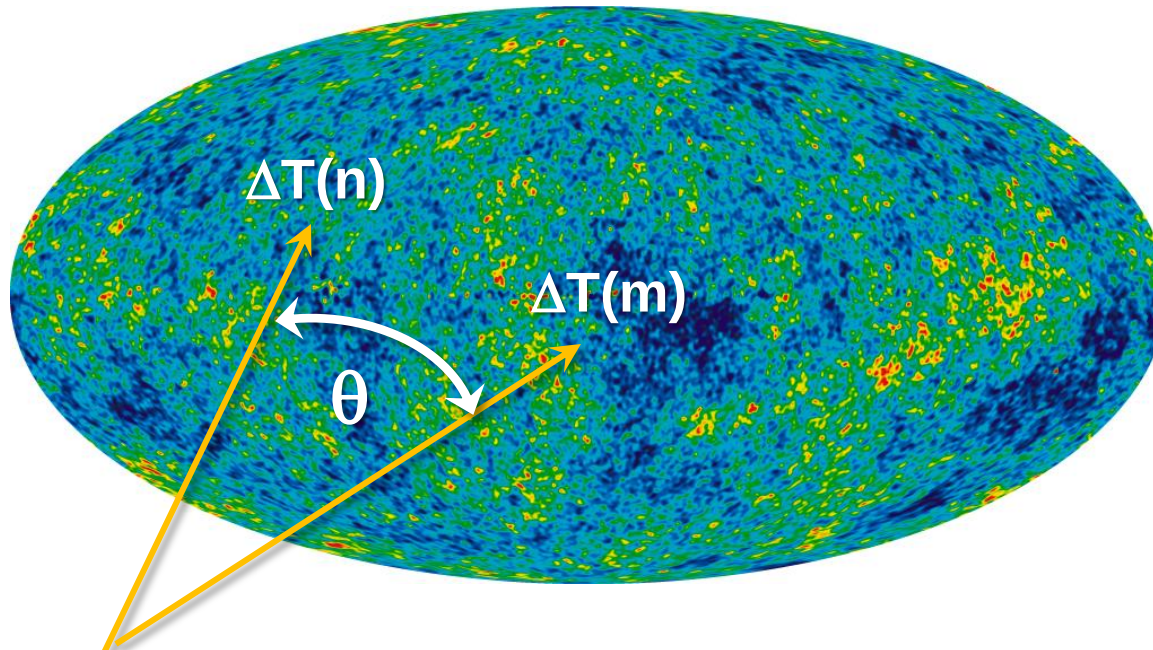
Quadrupol $\ell = 2$



5 Meßwerte

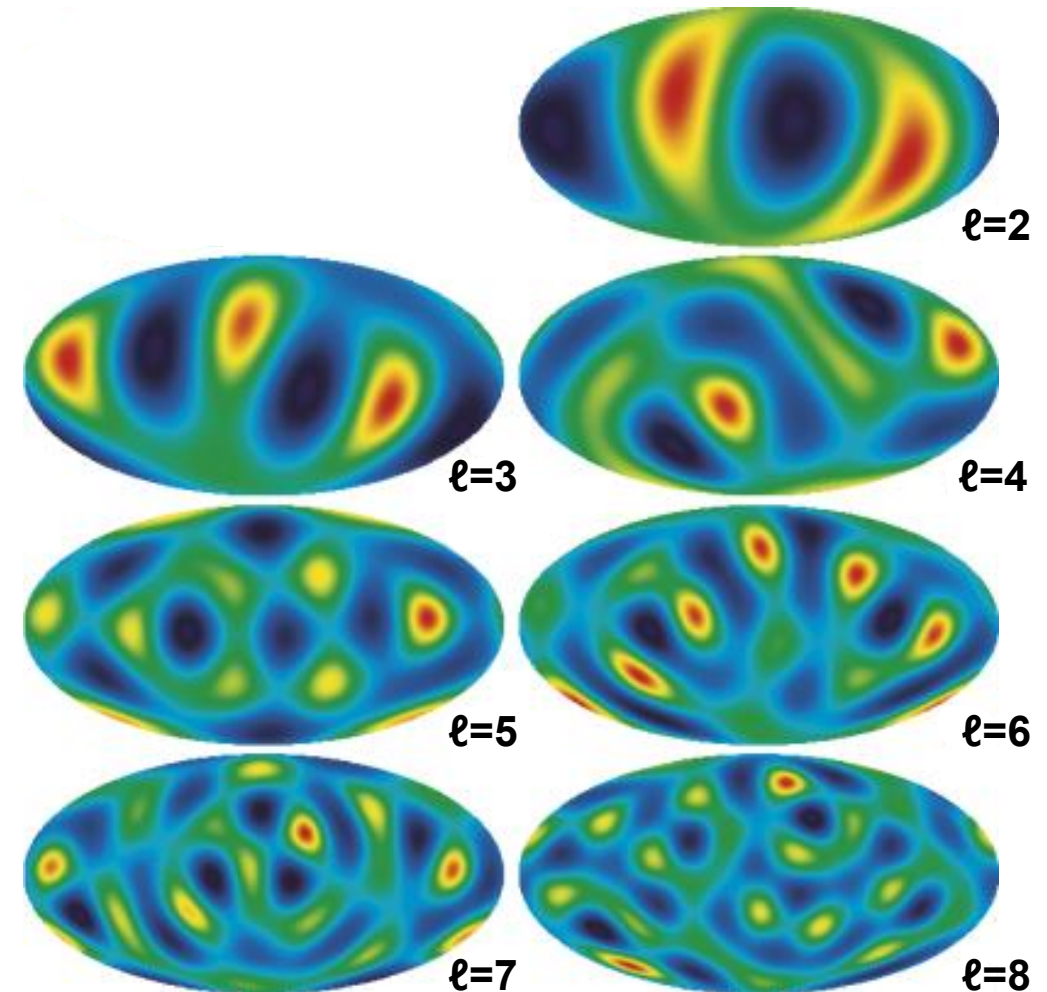
Multipolentwicklung – Resultate

■ Resultate für die einzelnen Multipole ℓ

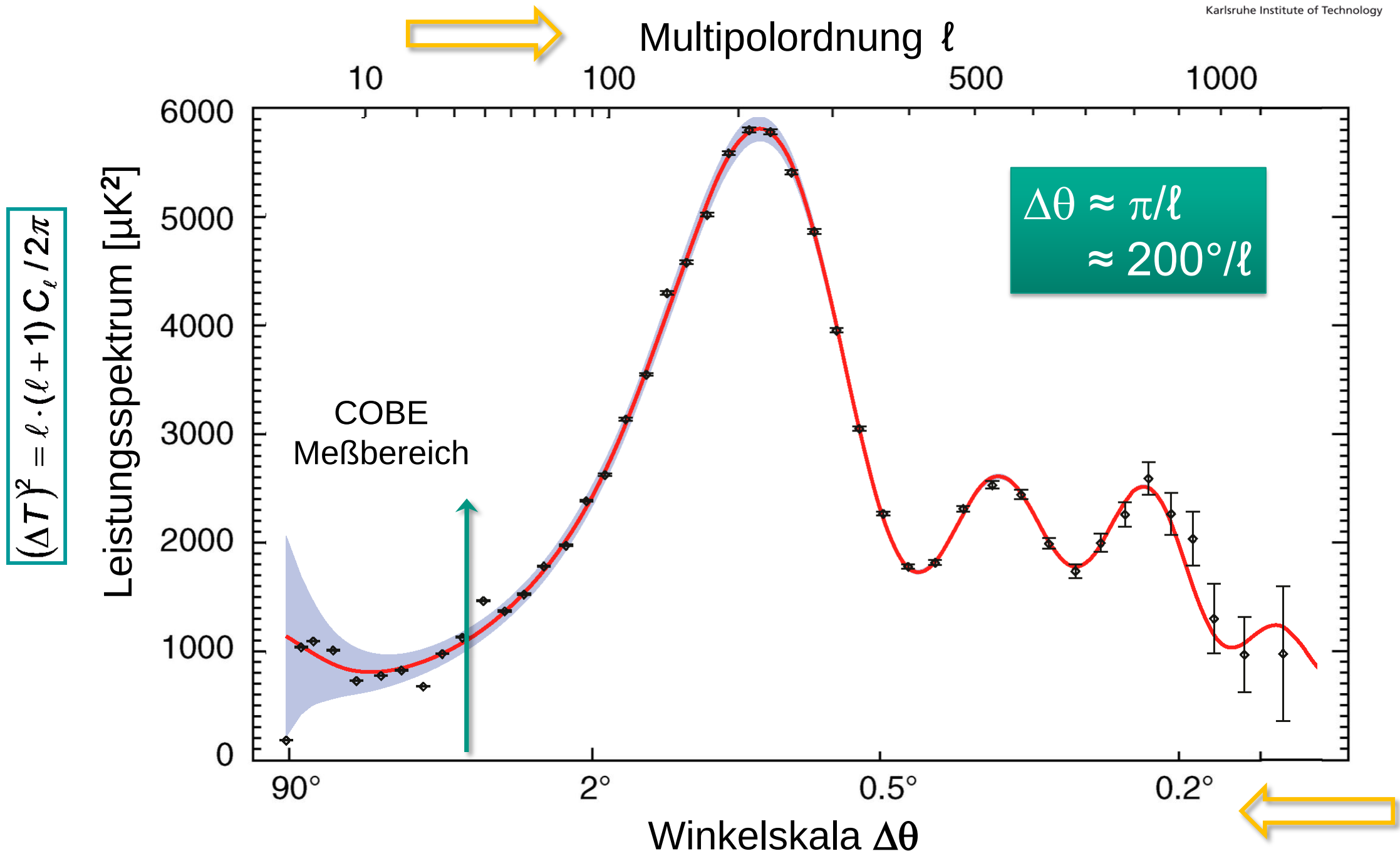


$$(\Delta T)^2 = \ell \cdot (\ell + 1) C_\ell / 2\pi$$

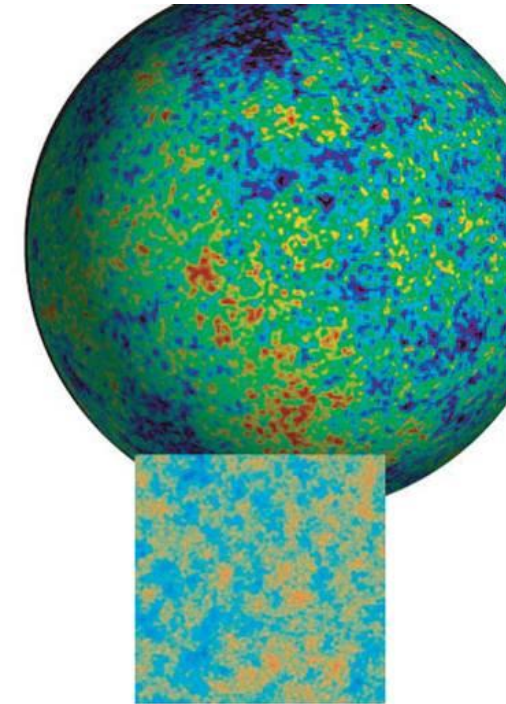
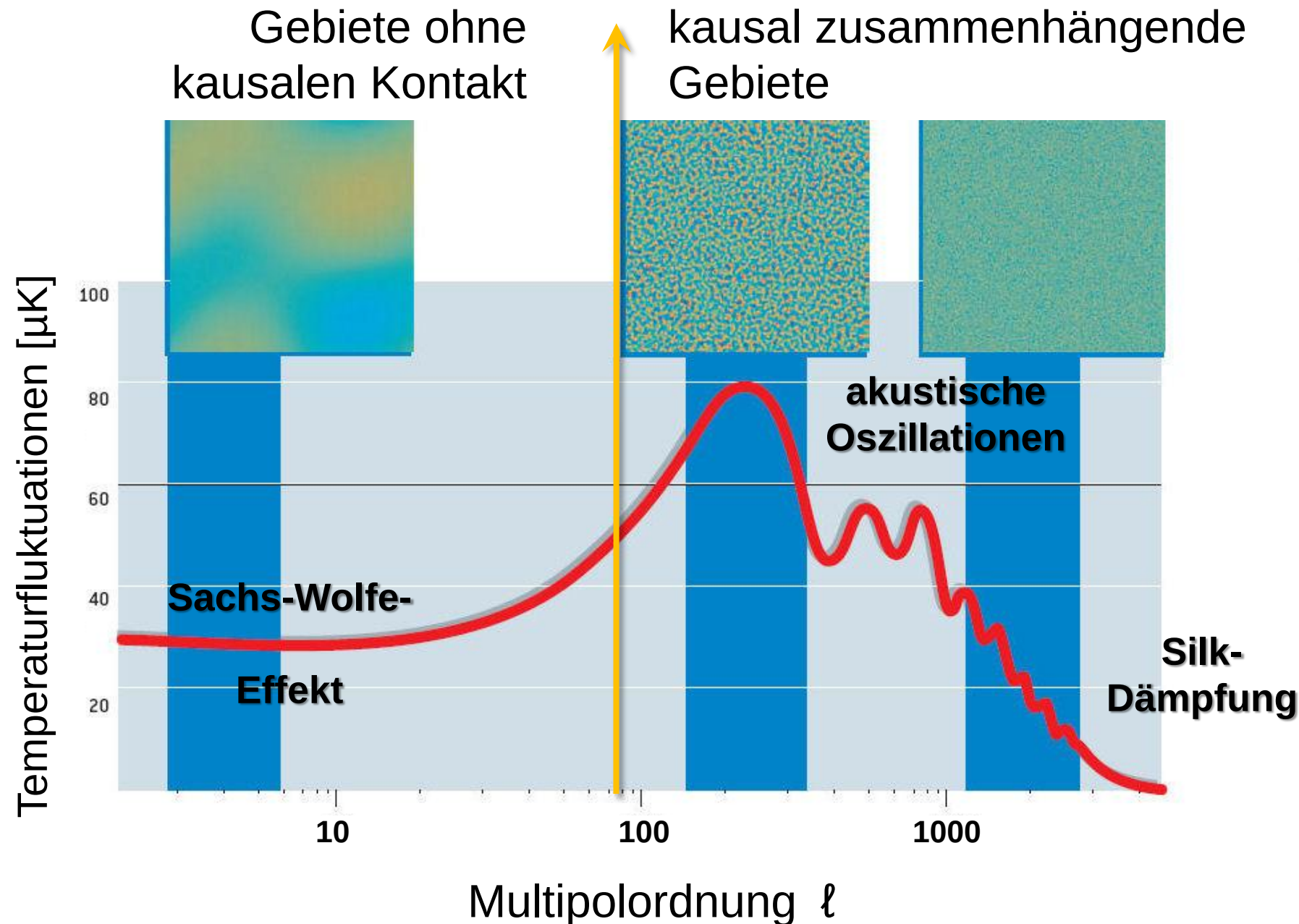
Temperaturfluktuationen als
Funktion der Multipolordnung



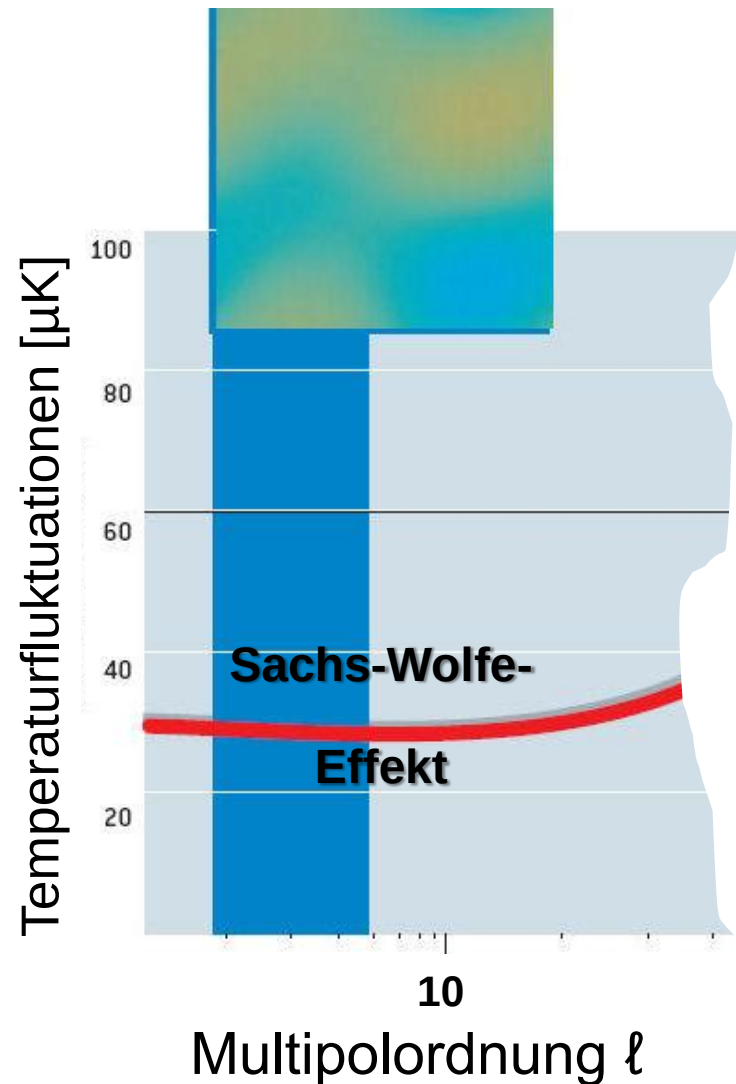
WMAP: Multipolverteilung (7 Jahre)



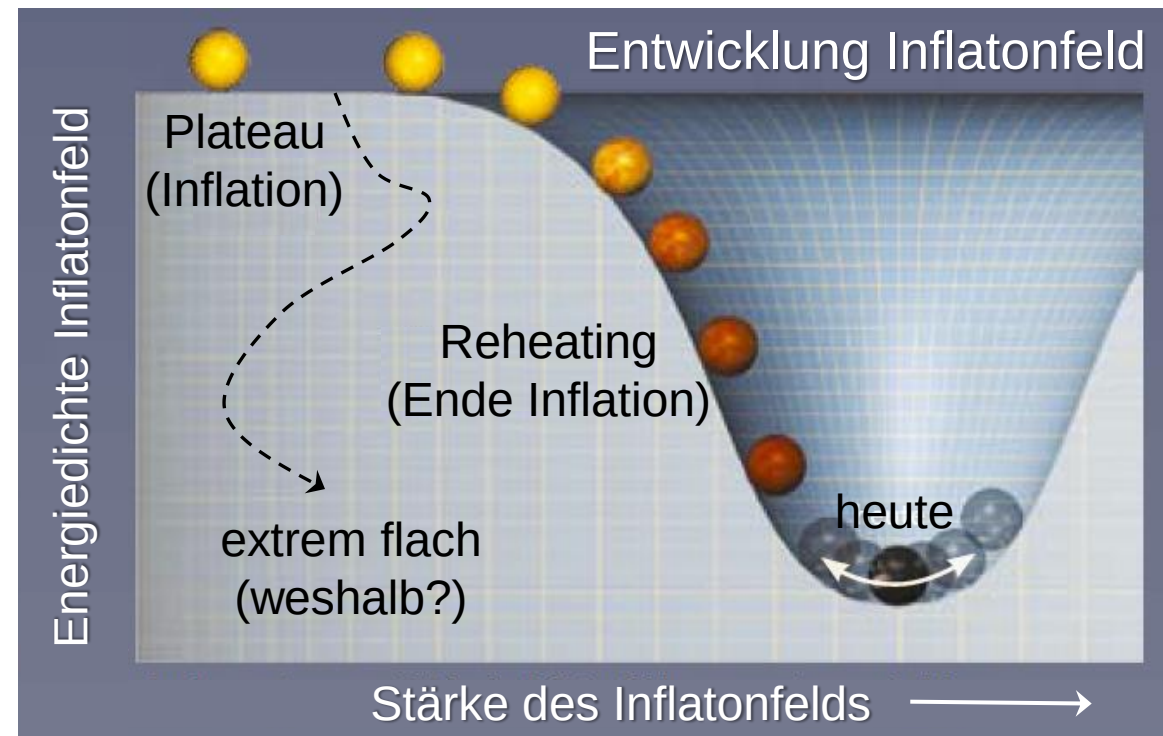
Multipolverteilung – physikalische Ursachen



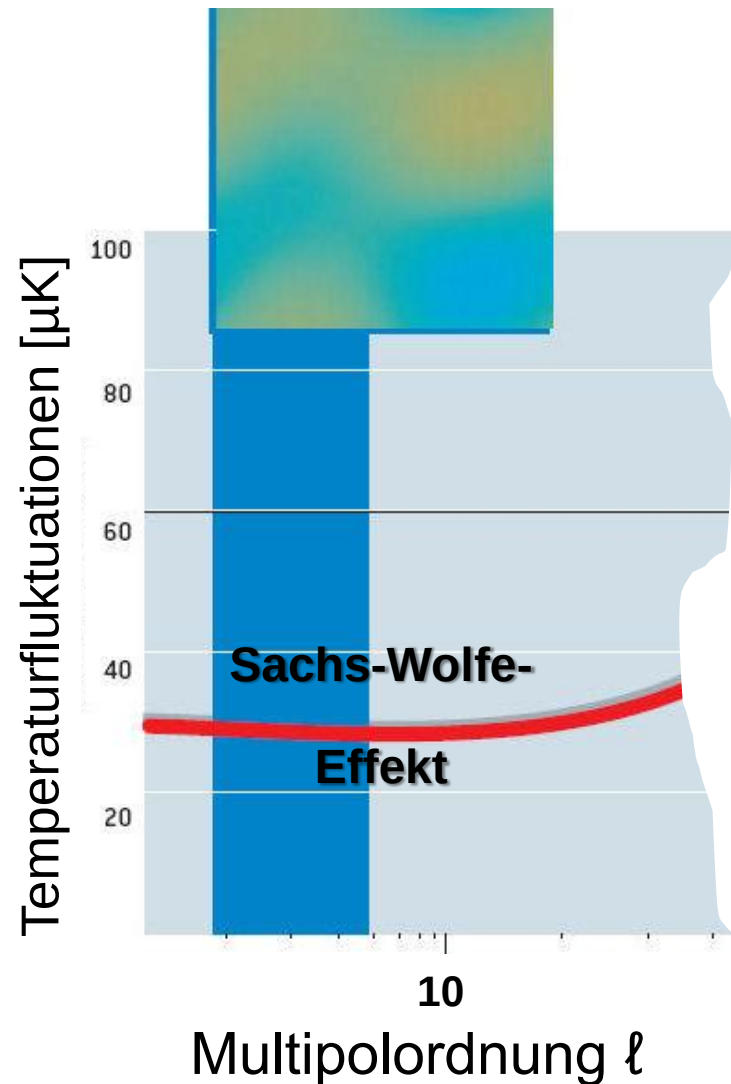
- **Sachs-Wolfe-Effekt** : was ist Ursache der Skaleninvarianz groß-räumiger Fluktuationen? Mögliche Ursache: Inflation



- **Inflation**: exponentielles Anwachsen des Skalenparameters $a(t)$ im Zeitraum von $t = 10^{-36}$ s bis $t = 10^{-32}$ s um **Faktor $\gg 10^{26}$**
↳ Einführung eines Skalarfeldes: **Inflaton**



- **Sachs-Wolfe-Effekt** : was ist Ursache der Skaleninvarianz großräumiger Fluktuationen? Mögliche Ursache: Inflation

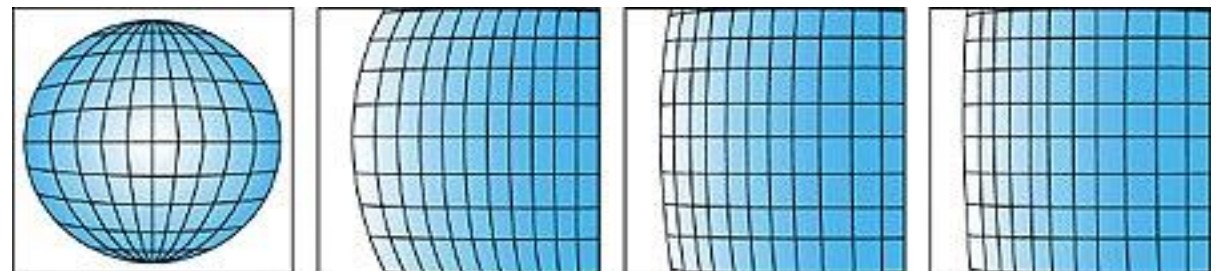


- **Inflation:**

- Ausgleich von Anisotropien, Inhomogenitäten und Krümmung zu $\Omega_{\text{tot}} = 1$ (euklidisch), Verdünnung magnetischer Monopole (GUT)
- erste Dichtefluktuationen durch quantenmech. Fluktuationen des Inflatonfeldes

- **Vorhersage der 'Skaleninvarianz':**

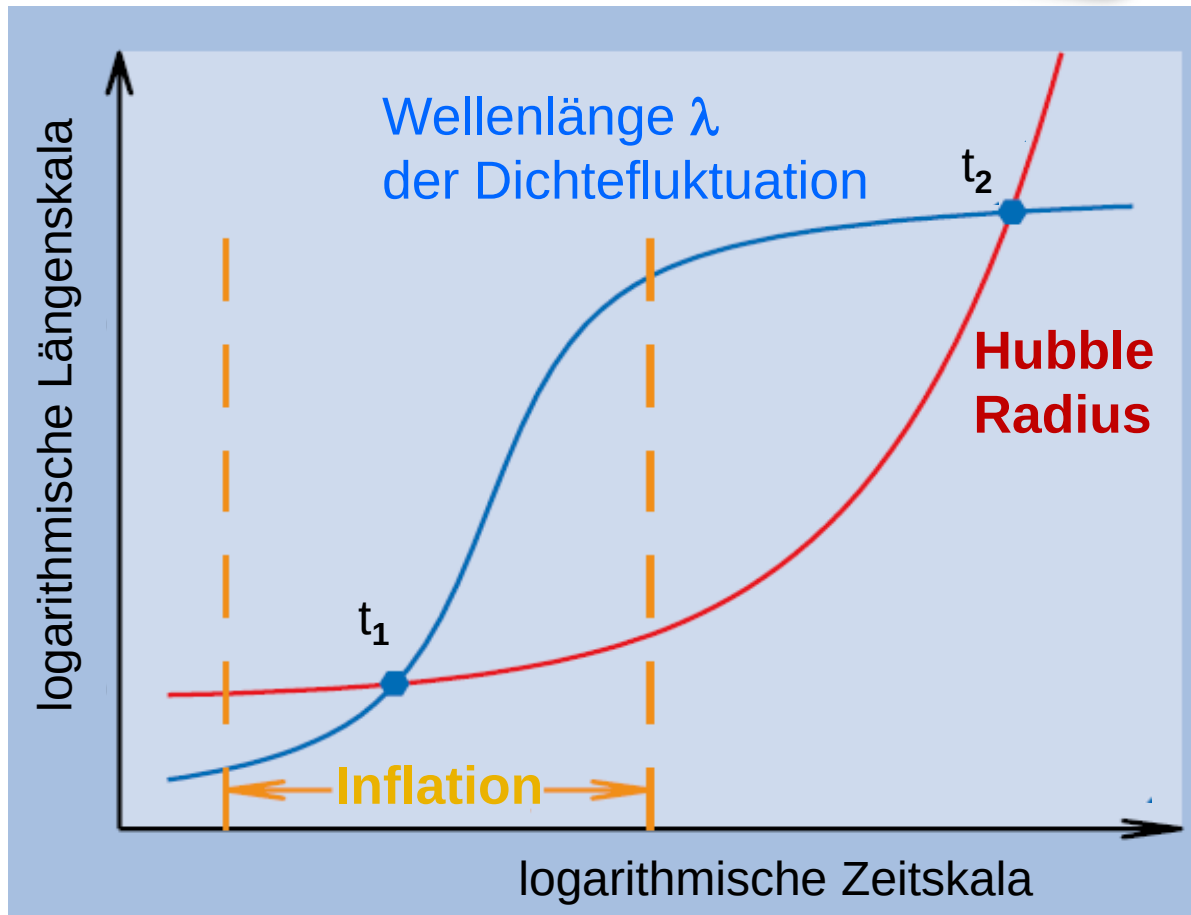
- Auftragung von $\ell(\ell+1)C_\ell$ gegen ℓ ergibt eine Konstante (Harrison-Zel'dovich Spektrum)



■ QM sichtbar am CMB-Himmel



Nullpunkts-
fluktuationen
des
'Inflatonfeldes'



■ **Inflation:** Fluktuationen des 'Inflatonfeldes' werden exponentiell vergrößert & frieren ein :

$t < t_1$

- Gebiete stehen in **kausalem Zusammenhang**
- Inflation: exponentielles Wachsen von λ einer Dichtefluktuation $\Delta\rho$

$t_1 < t < t_2$

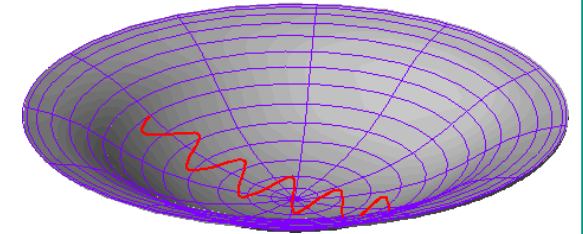
- λ der Dichtefluktuation $\Delta\rho$ ist größer als der Hubbleradius R
Fluktuation ist '**eingefroren**'
- weitere Wechselwirkung ab $t > t_2$

Primäre & sekundäre CMB-Anisotropien

- Ursprung der CMB-Temperaturanisotropien ΔT auf großen Skalen ($\theta > 2^\circ$): zwei Effekte zu unterschiedlichen kosmischen Zeiten

Sachs-Wolfe Effekt

primäre Anisotropien durch Dichtefluktuationen $\Delta\rho$ im frühen Universum zum Zeitpunkt der CMB Entkopplung

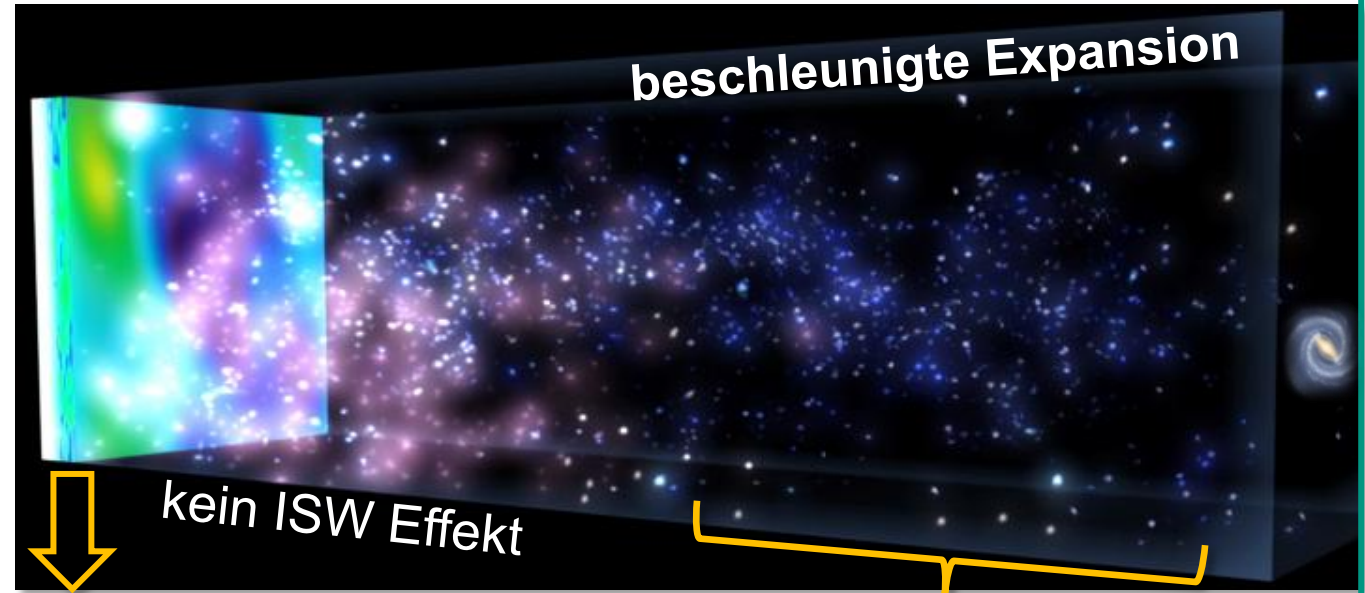


Integrierter Sachs-Wolfe Effekt

sekundäre Anisotropien

Propagation der CMB im späten, Λ -dominierten Universum ($a > 0.5$) mit beschleunigter Expansion

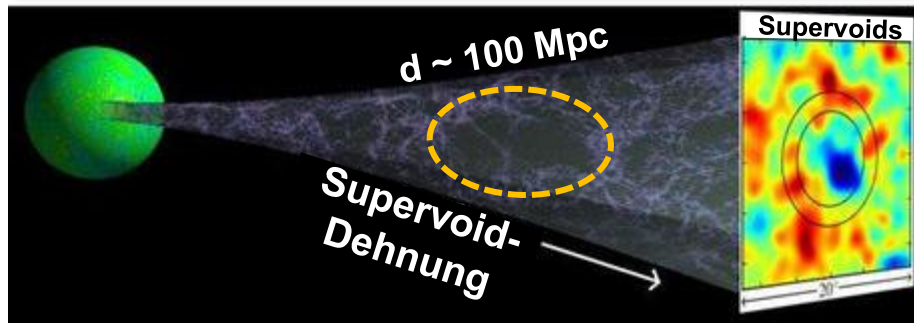
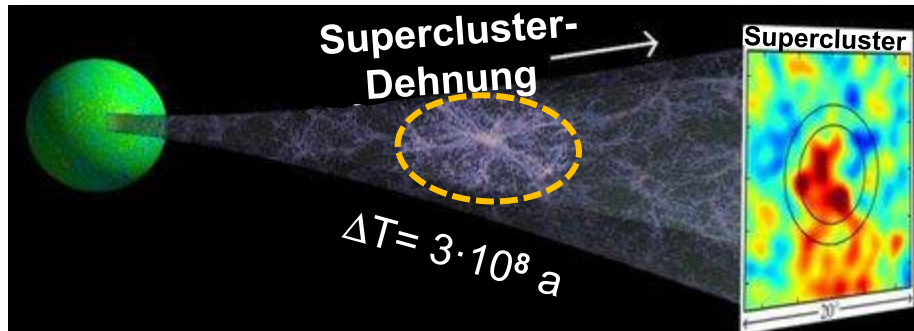
↳ gedehnte Cluster & Voids: zeitabhängige Gravitationspotenziale $\Phi(t)$



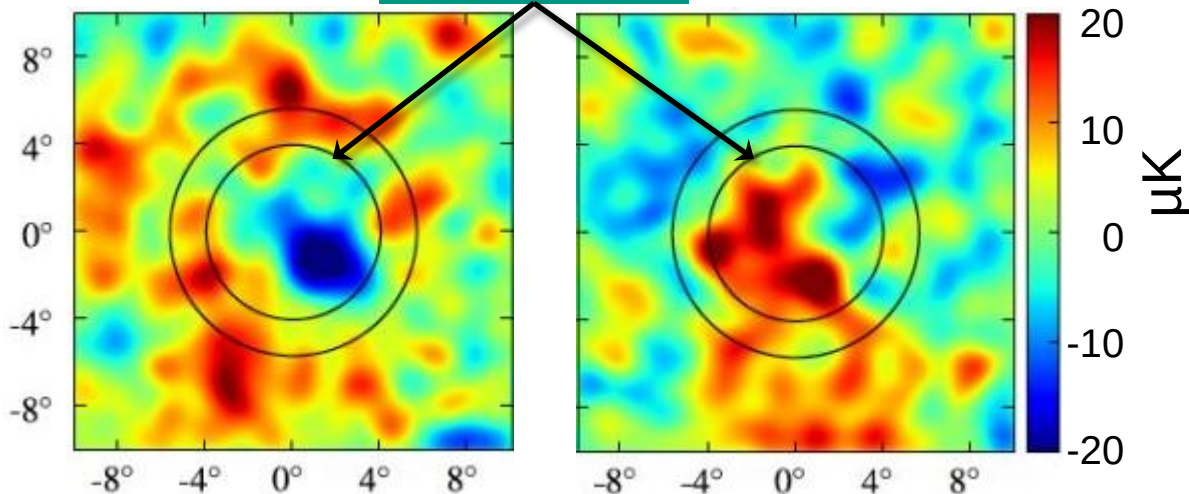
Sachs-Wolfe Effekt

Integrierter Sachs-Wolfe Effekt

ISW als Hinweis auf dunkle Energie

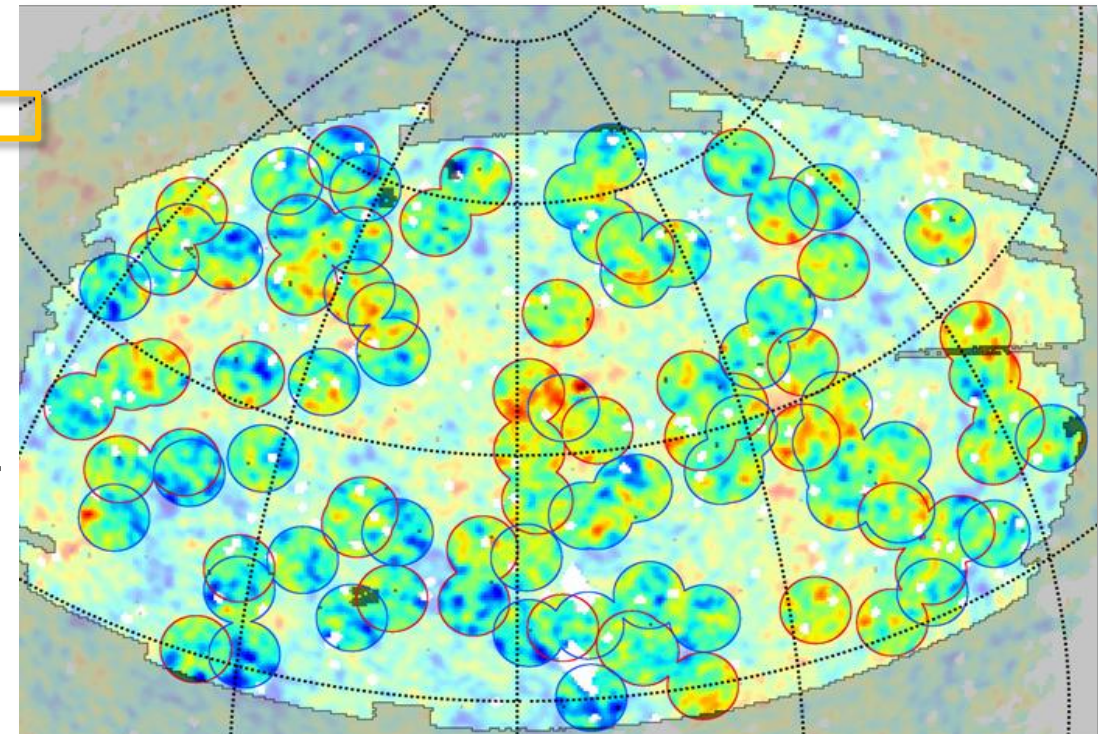


$\Sigma = 50 \text{ Voids}$ $\langle \Delta T \rangle \sim 10 \text{ } \mu\text{K}$ $\Sigma = 50 \text{ Cluster}$

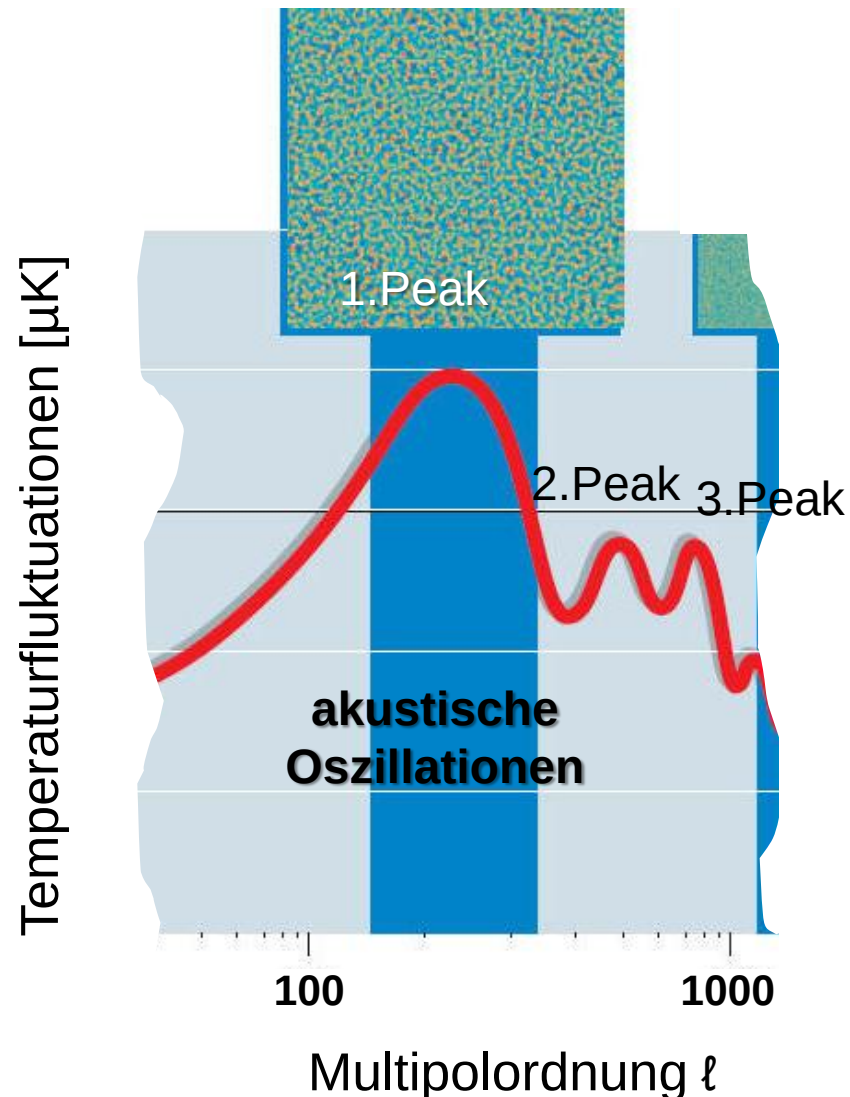


- 2008 - Korrelation von CMB & Galaxien-Daten (WMAP & Sloan Galaxien-Survey)
 - ↪ $\Delta T = (9.6 \pm 2.2) \text{ } \mu\text{K}$ durch den ISW ($\sim 4\sigma$)
 - ↪ kosm. Dehnung von Supercluster/Voids
- ISW: weitere Evidenz für dunkle Energie**

Voids (blaue Kreise), Supercluster (rote Kreise)



- T-Anisotropien auf **kleinen Winkelskalen** $\theta \sim 1^\circ$ ($\ell \sim 200$) sind bei $t = t_{\text{dec}}$ in **kausalem** Zusammenhang (Gravitation $\Leftrightarrow$ Strahlungsdruck)



- Abschätzung der 'kausalen' Winkelskala θ_{dec} (heute, $t_0 = 13.7$ Mrd. Jahre):

Zeit der CMB-Entkopplung: $t_{\text{dec}} = 3 \times 10^5 \text{ J}$

Horizont: $2 c \cdot t_{\text{dec}} = 6 \times 10^5 \text{ LJ}$

kosm. Expansion: $(1 + z_{\text{dec}}) = 1100$

Horizont jetzt: $1100 \times 2 c \cdot t_{\text{dec}}$

Winkelskala jetzt:

$$\theta_{\text{dec}} = \frac{2ct_{\text{dec}}(1+z)}{3 \cdot c(t_0 - t_{\text{dec}})} \approx 1^\circ$$

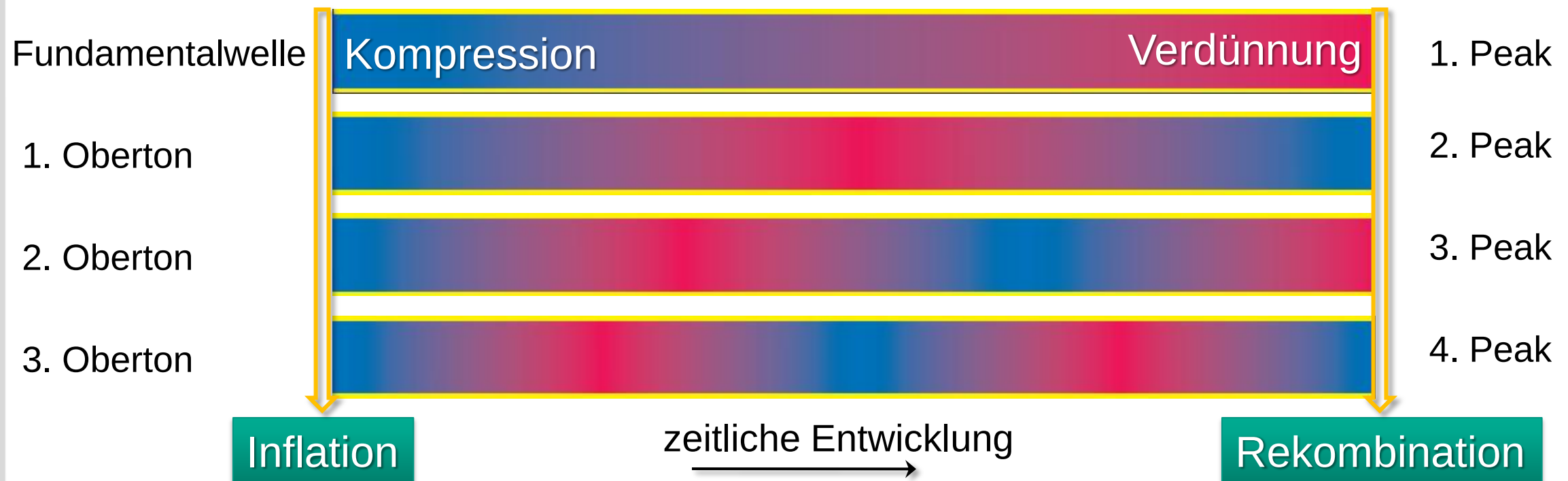
■ akustische Schallwellen im frühen Universum:

$t = t_0$: Dichtefluktuation $\delta\rho$ beginnt zu propagieren im Plasma mit $v_s = c / \sqrt{3}$

$t = t_{\text{rec}}$: Rekombination – Schallwellen werden ‘eingefroren’ mit $v_s = 0$

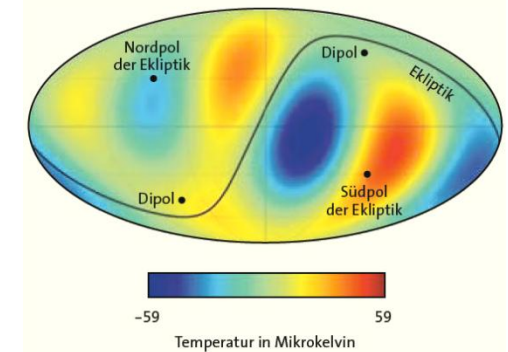
$t_0 < t < t_{\text{rec}}$: Oszillation zwischen **Kompression** $\Leftrightarrow$ **Verdünnung**

↪ **stehende akustische Wellen** mit unterschiedlichen λ_i



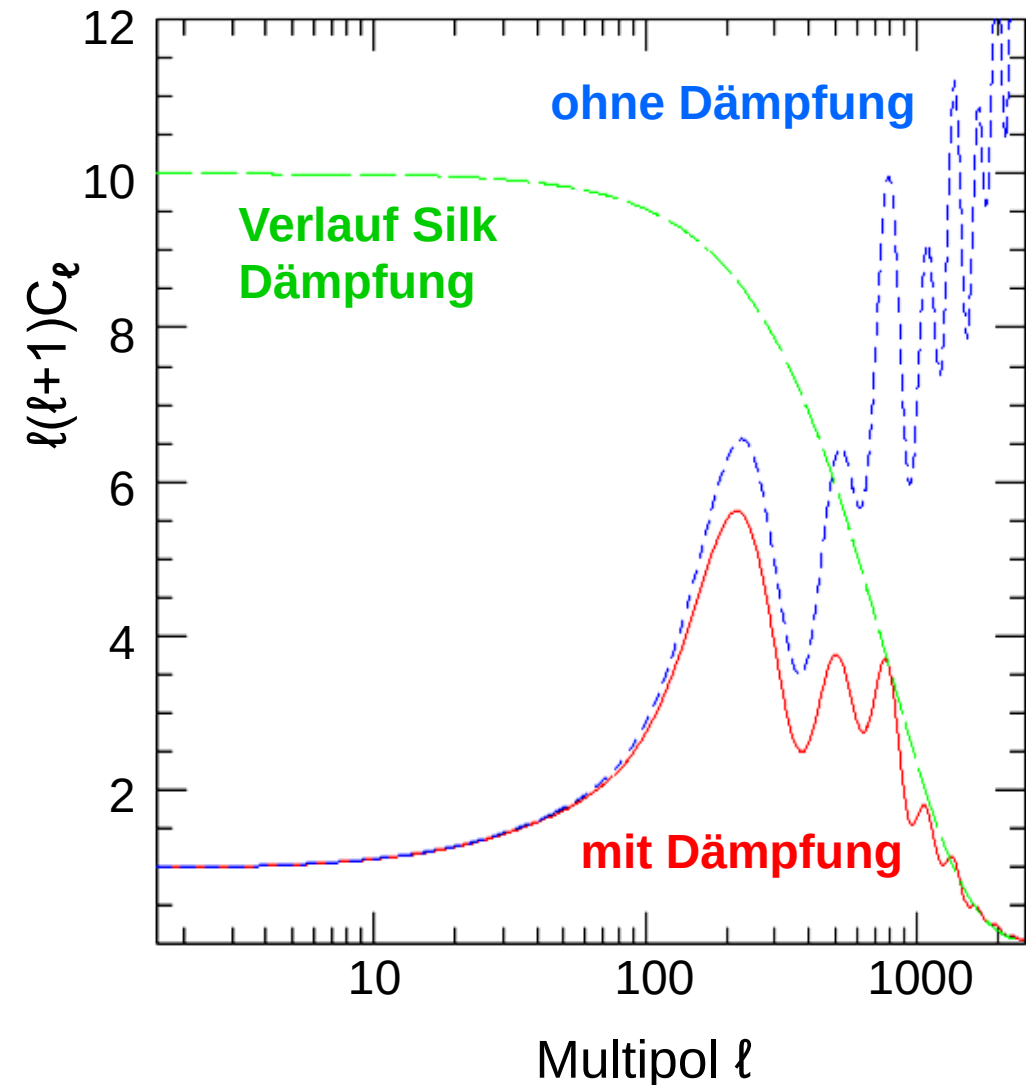
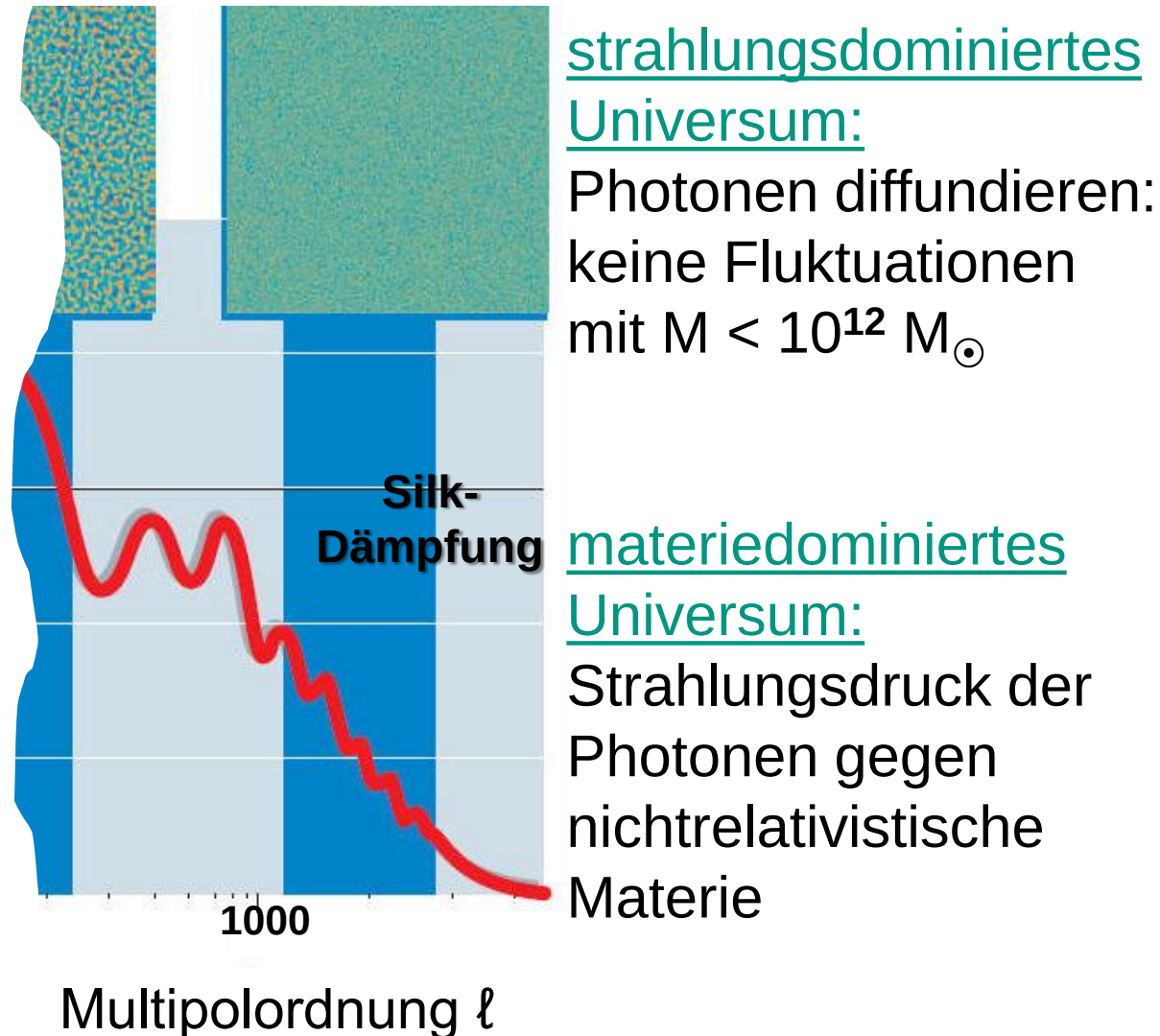
akustische Oszillationen vom MPA

- **akustische Schallwellen** im frühen Universum:
2 neugierige MPA-Postdocs beim Wellenreiten...

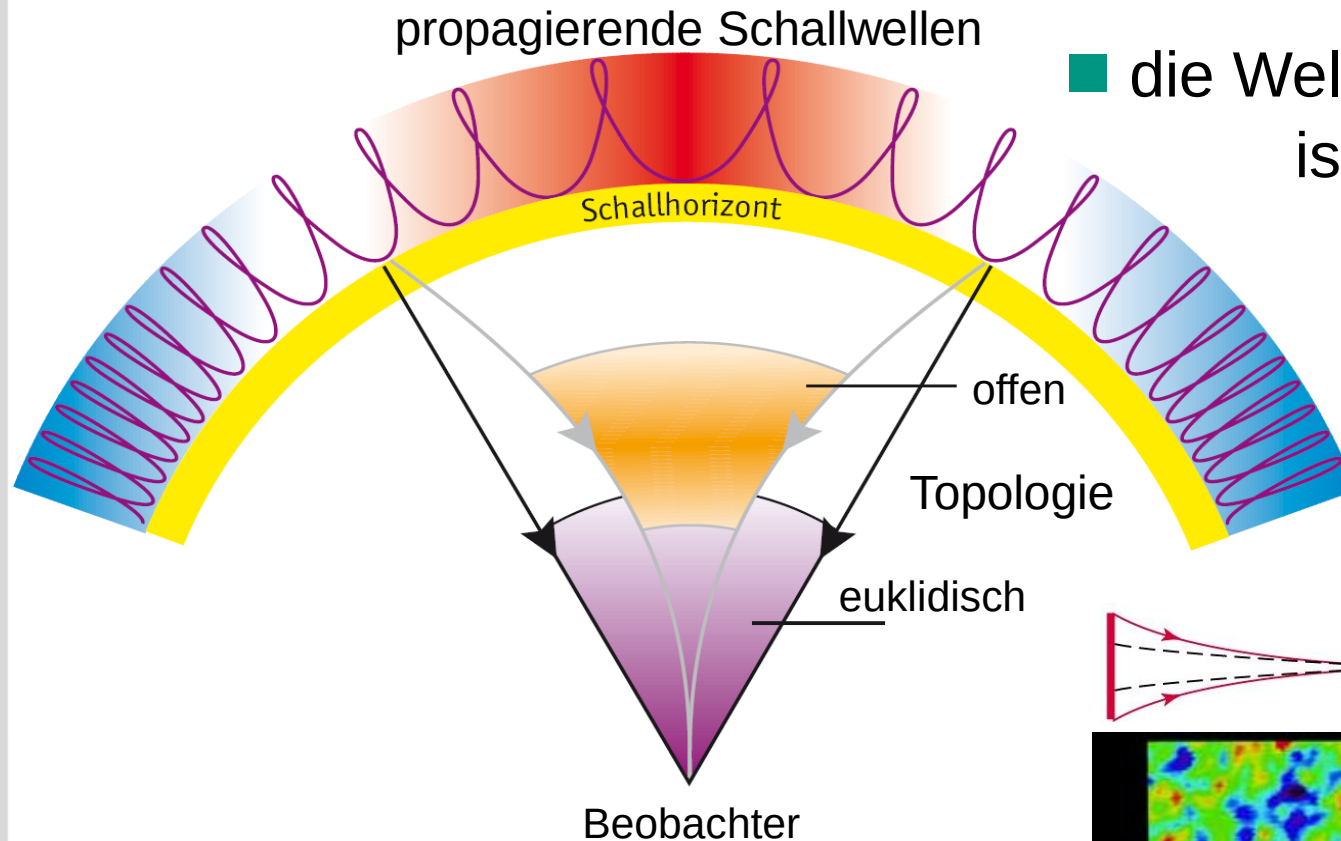


http://www.mpa-garching.mpg.de/mpa/institute/news_archives/news_cosmic_01/news_cosmic_01-en.html

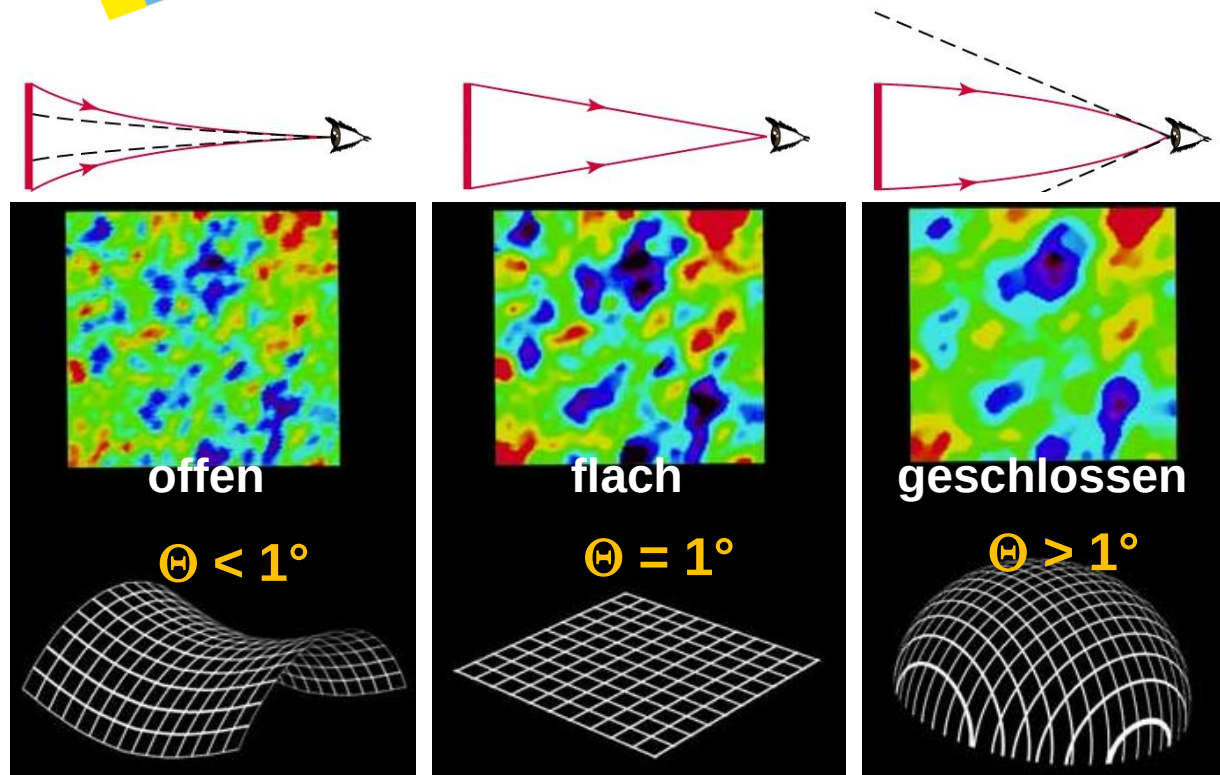
- **Silk Dämpfung:** Diffusion/Strahlungsdruck der Photonen dämpft exponentiell die Weiterentwicklung von Materiefluktuationen auf den kleinsten Skalen



Lage des 1. Maximums & Geometrie



- die Wellenlänge λ_1 der Grundschwungung ist eine **absolute Größe** ($\sim v_s \cdot t_{\text{dec}}$), wird durch die anschließende kosmische Expansion um einen Faktor $(1+z) = 1100$ vergrößert

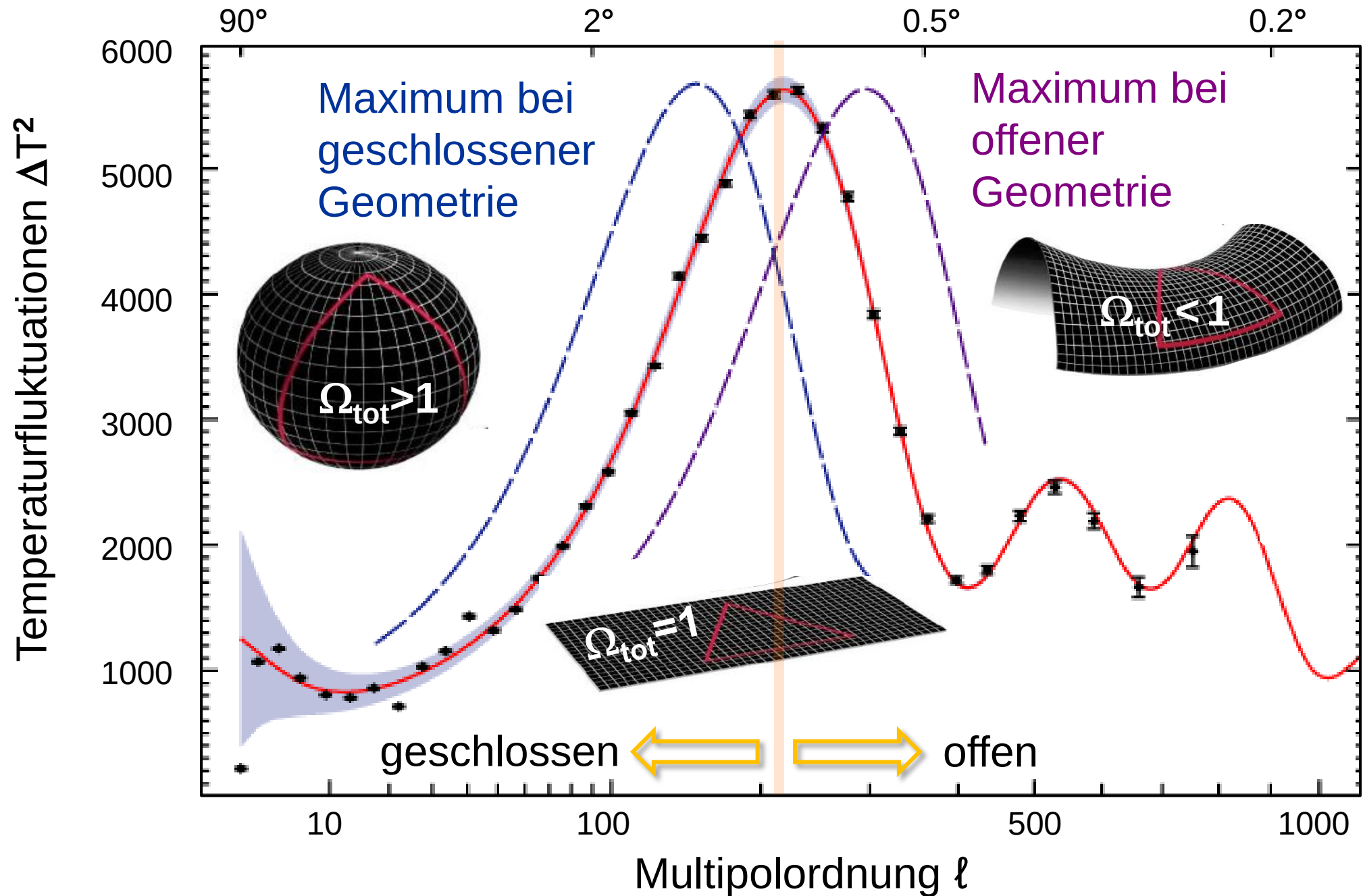


Geometrie des Universums

Lage des 1. akustischen (ℓ_1) Peaks ist abhängig von :

$$\ell_1 \sim 1 / \sqrt{\Omega_{\text{tot}}}$$

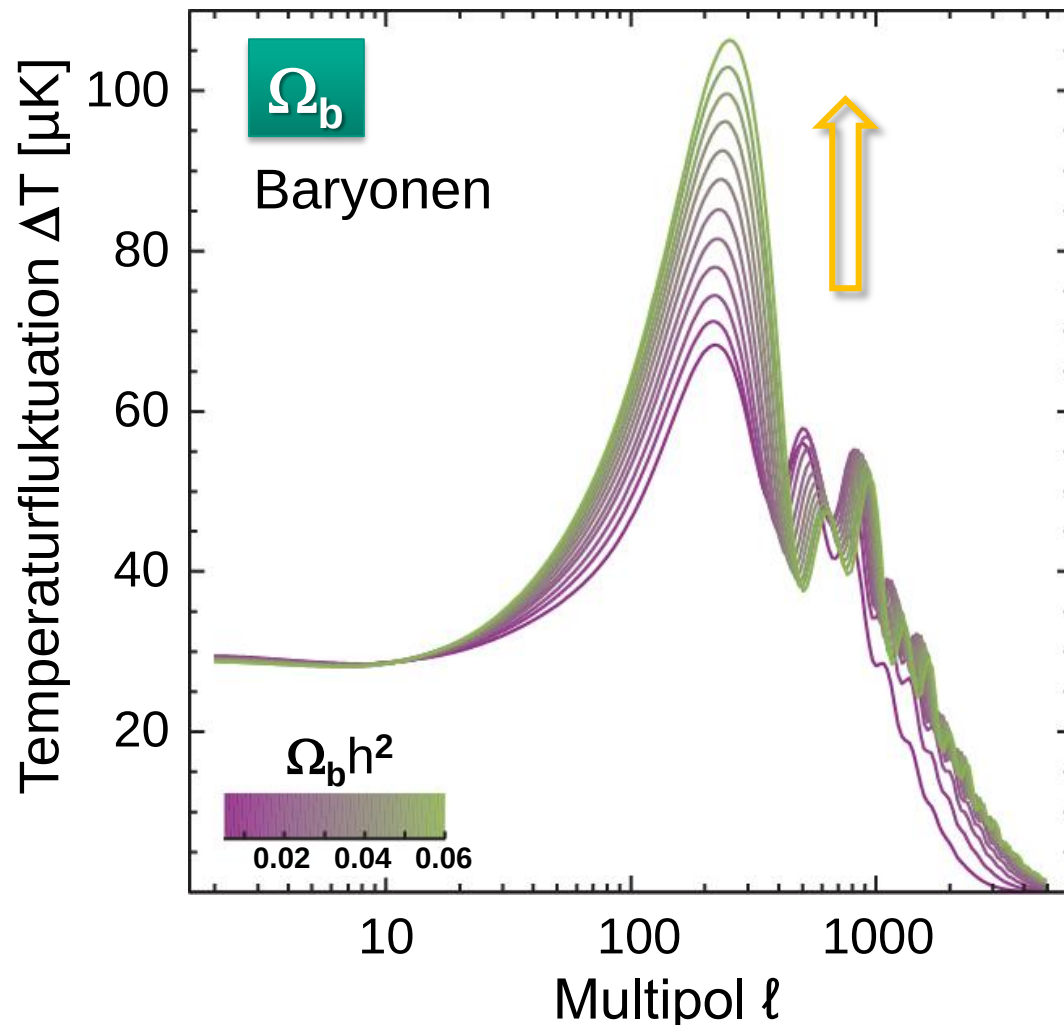
1. Maximum: Schema Lage & Geometrie



■ Baryonen-Photonen-Verhältnis:

wird bestimmt aus **Höhe** des ersten akustischen Peaks:

mehr Baryonen $\Rightarrow$ 'baryon loading' $\Rightarrow$ größere ΔT -Fluktuationen



Gravitationspotenzial:

- **dunkle Materie**: dominanter Beitrag aber wechselwirkungsfrei (keine Oszi.)
- **baryonische Materie**: subdominant, akustische Oszillationen da Plasma

Multipolverteilung & kosmolog. Parameter

