

Temperaturschwankungen in der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung

Hendrik van Hees

Goethe Universität Frankfurt

June 29, 2012



Temperaturschwankungen der Hintergrundstrahlung

- zuerst beobachtet 1992 durch COBE-Satellit: $\delta T/T \sim 10^{-5}$
- beobachtete Fluktuationen = primordiale Fluktuationen + Rotverschiebung aus Potential
- **Sachs-Wolfe-Effekt**

$$\left(\frac{\delta T}{T}\right)_0 = \left(\frac{\delta T}{T}\right)_e - \Phi_e$$

- andererseits mehr Photonen im Inneren des Potentials („**heißer**“):

$$\left(\frac{\delta T}{T}\right)_e \propto \Phi_e$$

- für Photonen: $aT = \text{const}$

$$\frac{\delta T}{T} = -\frac{\delta a}{a}$$

- für Zustandsgleichung $p = \alpha \epsilon$ gilt $a(t) \propto t^{2/[3(1+\alpha)]}$

$$\frac{\delta a}{a} = \frac{2}{3(1+\alpha)} \frac{\delta t}{t} \simeq -\Phi$$

$$\left(\frac{\delta T}{T}\right) = -\frac{\delta a}{a} = -\frac{2}{3(1+\alpha)} \frac{\delta t}{t} = \frac{2}{3(1+\alpha)} \Phi_e$$

- materiedominierter Kosmos: $\alpha = 0$

$$\frac{\delta T}{T} = -\frac{1+3\alpha}{3+3\alpha} \Phi_e \stackrel{mat.}{=} -\frac{1}{3} \Phi_e$$

- teilweise Cancellation

- Photonen aus Potential von dichten Regionen rotverschoben („kühler“)
- andererseits **Aufheizung durch Kompression**
- Nettoeffekt: Photonen aus dichteren Regionen **kühler**
- $\delta T/T \sim 10^{-5}$ entspricht **Dichtefluktuationen bei der „Rekombination“**

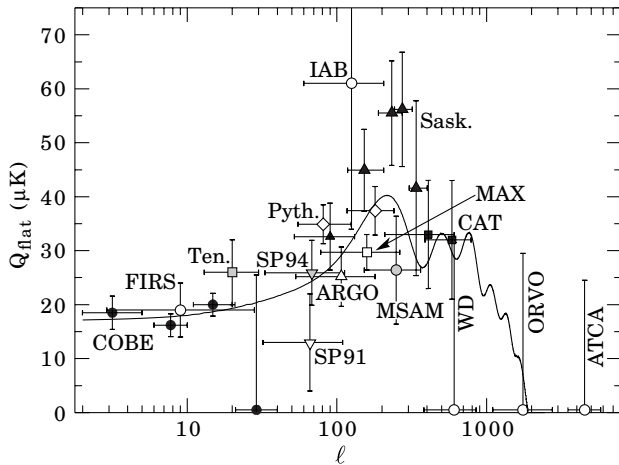
- Definition: Temperaturmessung in Richtung \vec{n}

$$C(\theta) = \left\langle \frac{\delta T}{T}(\vec{n}) \frac{\delta T}{T}(\vec{n}') \right\rangle$$

- wird normalerweise durch **Multipolkoeffizienten** dargestellt

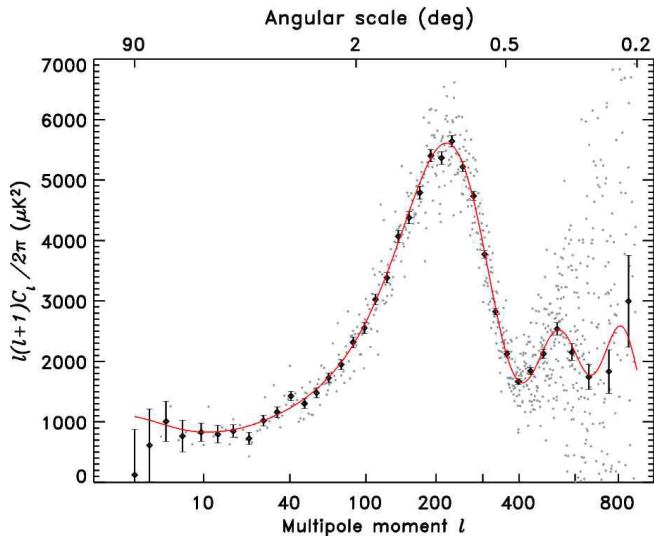
$$C(\theta) = \frac{1}{4\pi} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1) \tilde{C}_l P_l(\cos \theta)$$

- NB: großes l entspricht kleineren Winkelauflösungen
- zeigt Peaks \Leftrightarrow Schallwellen der Materie bei Rekombination
- genaue Lage: **Rückschlüsse auf Substrat** (Ω_M)



[G. Smoot, The CMB anisotropy experiments, [arXiv:astro-ph/9705135v1](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9705135v1)]

WMAP: Hochpräzisionsmessung



[D. N. Spergel et al, *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 175 (2003), [arXiv:astro-ph/0302209v3](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0302209v3)]

Modernes Bild vom Universum

- best fit: flaches Modell mit **kalter dunkler Materie und Λ**
- $\Omega_M = 0.27 \pm 0.04$ ($\Omega_B = 0.044 \pm 0.004$)
- Alter des Universums: $t_0 = (13.7 \pm 0.2)$ Gyr
- Rotverschiebung bei Rekombination $z_{\text{rek}} = 1089 \pm 1$

