

**A4**

1.

Bilder für CMB

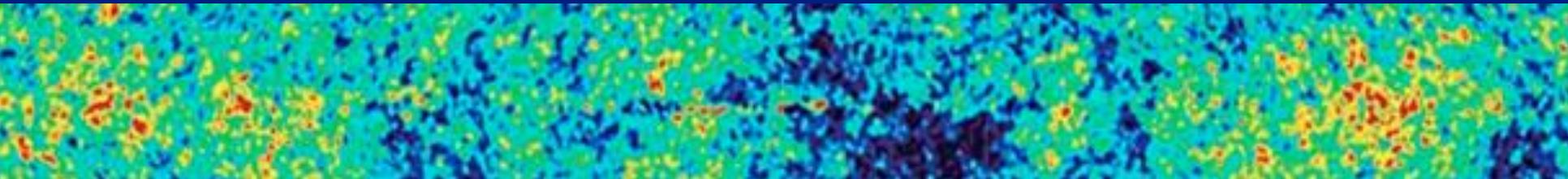
A4:

3 K – Strahlung

Kosmische Hintergrundstrahlung

CMBR = cosmic background radiation

---



# A4: 3 K – Strahlung

---

## Grober Überblick: Entwicklung Universum

- Planck – Ära, Beginn GUT-Ära: Dichte  $\rho > 10^{94} \text{ g/cm}^3$
- mit Zeit  $t = \text{Urknall}$ : Beginn Expansion, Heißenberg'sche Unschärfe:  
Physik: ab Planckzeit  $t = 5.39 \times 10^{-44} \text{ s}$ , Weltallgröße =  $1.6 \times 10^{-35} \text{ m}$  Plancklänge  
Plancktemperatur  $T = 5 \times 10^{32} \text{ K}$
- $T > 10^{28} \text{ K}$ : Abspaltung der Gravitation (Natur der Teilchen dieser Ära unbekannt)
- $T = 10^{27} \text{ K}$ : Inflation,  $t = 10^{-36} \text{ s}$ , Abspaltung starker WW von GUT

Vorstellung: wie Phasenübergang Wasser  $\rightarrow$  Eis,

existieren Phasenübergangsverzögerungen = Verzögerung der Abspaltung  
im Kristallisationsprozeß: Einfrieren von zufälligen Vorzugsrichtungen =  
spontane Symmetriebrechung

verzögerte Abspaltung  $\rightarrow$  Freisetzung von Energie  $\rightarrow$  Phase extrem schneller

Expansion:  $t = 10^{-35} \text{ s} \Rightarrow t = 10^{-36} \text{ s}$  , Ausdehnung um Faktor  $10^{30}$

# 3 K – Strahlung

---

- $T = 10^{25} \text{K}$ ,  $t = 10^{-33} \text{s}$ : Quark- Ära: Quark-Gluonen Plasma
- $T = 10^{16} \text{K}$ ,  $t = 10^{-12} \text{s}$ : Aufspaltung, Existenz aller 4 Einzelkräfte
- $T = 10^{13} \text{K}$ ,  $t = 10^{-6} \text{s}$ : Hadronen-Ära:  
Quarks zu Hadronen, Zerfall schwerer Hadronen bis  $p^+$  & + ihre Antiteilchen, durch ihre ständigen Umwandlungen entstanden große Zahl an Neutrinos
- $T = 10^{12} \text{K}$ ,  $t = 10^{-4} \text{s}$ : Leptonen –Ära: Vernichtung der meisten Protonen + Neutronen durch ihre Antiteilchen, bis auf geringen Überschuss Materie, T reichte noch für Bildung von Leptonen-Paaren: Elektronen und Positronen
- $T = 10^{10} \text{K}$ ,  $t = 1 \text{s}$ : Ende der Leptonen-Ära:  
Vernichtung  $e^-$  &  $e^+$  bis gleicher Überschuss  $p^+$
- $T = 10^9 \text{K}$   $t = 10 \text{s}$ : Nukleosynthese, Kernfusion  $H \rightarrow {}^2\text{H}, {}^3\text{H}, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}, \text{Li}$
- $T = 10^6 \text{K}$  Ende Kernfusion: lange nix, nur Expansion  
Strahlung und Materie im thermischen Gleichgewicht

## 3 K – Strahlung

---

- $t = 380.000$  Jahre nach dem Urknall:
  - infolge der Expansion des Universums sank Temperatur & Dichte des gekoppelten Strahlungs-Materie-Gemisches mit der Zeit - bis bei  $T = 3000$  K: Protonen + Elektronen  $\rightarrow$  Wasserstoff (Rekombination)
  - Fehlen freier Elektronen und Protonen führte dazu, dass die Strahlung (nicht mehr mittels Thomson-Streuung an Photonen) mit der Materie wechselwirken konnte
    - $\Rightarrow$  das Universum wurde 'durchsichtig'
- weitergehende Expansion des Universums verursachte durch Dehnung der Raumzeit  $\Rightarrow$  Dehnung der Wellenlänge der Photonen  $\Rightarrow$  Rotverschiebung
- diese Photonen heute = kosmische Hintergrundstrahlung im Mikrowellenbereich in jeder Richtung des Himmels auf normalen Skalen in etwa gleichförmig nicht durch Überlagerung einzelner Quellen wie Galaxien

## 3 K – Strahlung

---

- Strahlung hat als Folge des thermischen Gleichgewichts vor der Rekombination  
= fast perfekte Intensitätsspektrum eines schwarzen Körpers

mit  $T(\text{heute}) = (2,725 \pm 0,002) \text{ K} = T_{\text{bg}}$

- Rotverschiebung der Hintergrundstrahlung:  $z = 1089 \pm 0,1\%$        $z = \frac{\lambda_{\text{beobachtet}} - \lambda_0}{\lambda_0}$

- jeder Kubikzentimeter des Vakuums des Weltraums enthält  $\approx 410$  Photonen  
der Hintergrundstrahlung

# 3 K – Strahlung

---

**Vorhersage:** erste theoretische Überlegungen - bereits 1922 **Friedmann** & 1927 **Lemaître** als Folge des Urknalls

in **1940ern:** **George Gamow, Ralph Alpher** und **Robert Herman**  
Berechnung der Schwarzkörpertemp. : ca. 5K

**Entdeckung:** zufällig 1964 durch **Arno Penzias** und **Robert Woodrow Wilson:**  
beim Test einer neuen empfindlichen Antenne - für Experimente mit künstlichen Erdsatelliten: 20Fußhorn -Antenne bei  $\nu = 2.39\text{GHz}$  in Holmdel (1978 Physiknobelpreis)

Hinweise auf die Hintergrundstrahlung:

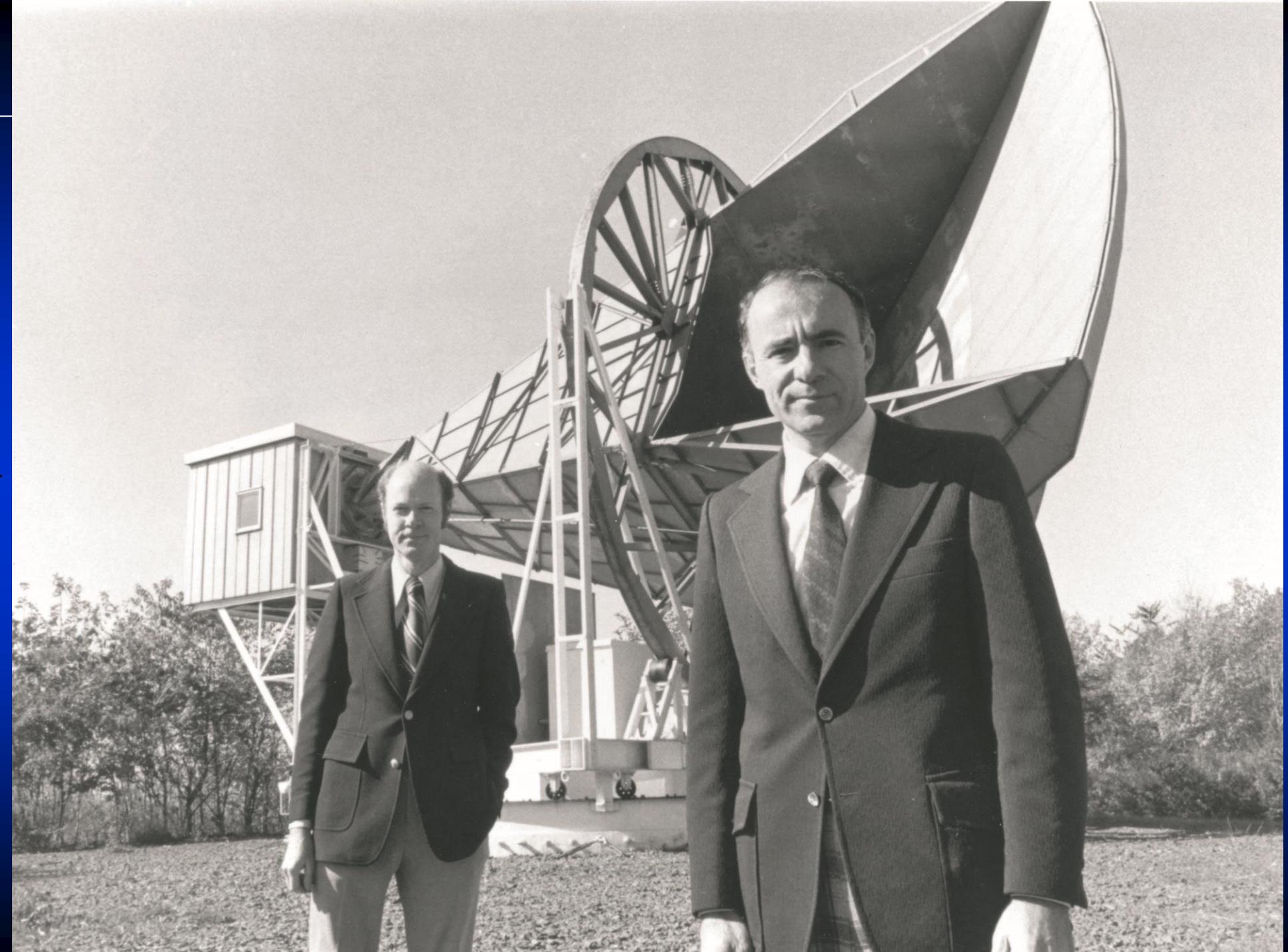
fand schon **Andrew McKellar** 1940/1941 am Mount Wilson Observatorium:

⇒ Bestimmung  $T_{\text{rot}}$  von interstellarem CN

⇒ Eingang ins Lehrbuch **Herzberg (1950)** *Spectra of diatomic molecules*

⇒ die Tragweite der Entdeckung erkannten aber beide nicht.

auch in der UdSSR, 1964: **A. Doroshkevich** und **Igor Dmitrijewitsch Nowikow:**  
Vorschlag zur Beobachtung der Reliktstrahlung



# 3 K – Strahlung

---

**Vorhersage:** erste theoretische Überlegungen - bereits 1922 **Friedmann** & 1927 **Lemaître** als Folge des Urknalls

in **1940ern:** **George Gamow, Ralph Alpher** und **Robert Herman**  
Berechnung der Schwarzkörpertemp. : ca. 5K – Werte heute sehr nahe

**Entdeckung:** zufällig 1964 durch **Arno Penzias** und **Robert Woodrow Wilson:**  
beim Test einer neuen empfindlichen Antenne - für Experimente mit künstlichen Erdsatelliten: 20Fußhorn -Antenne bei  $\nu = 2.39\text{GHz}$  in Holmdel (1978 Physiknobelpreis)

Hinweise auf die Hintergrundstrahlung:

fand schon **Andrew McKellar** 1940/1941 am Mount Wilson Observatorium:

⇒ Bestimmung  $T_{\text{rot}}$  von interstellarem CN

⇒ Eingang ins Lehrbuch **Herzberg (1950)** *Spectra of diatomic molecules*

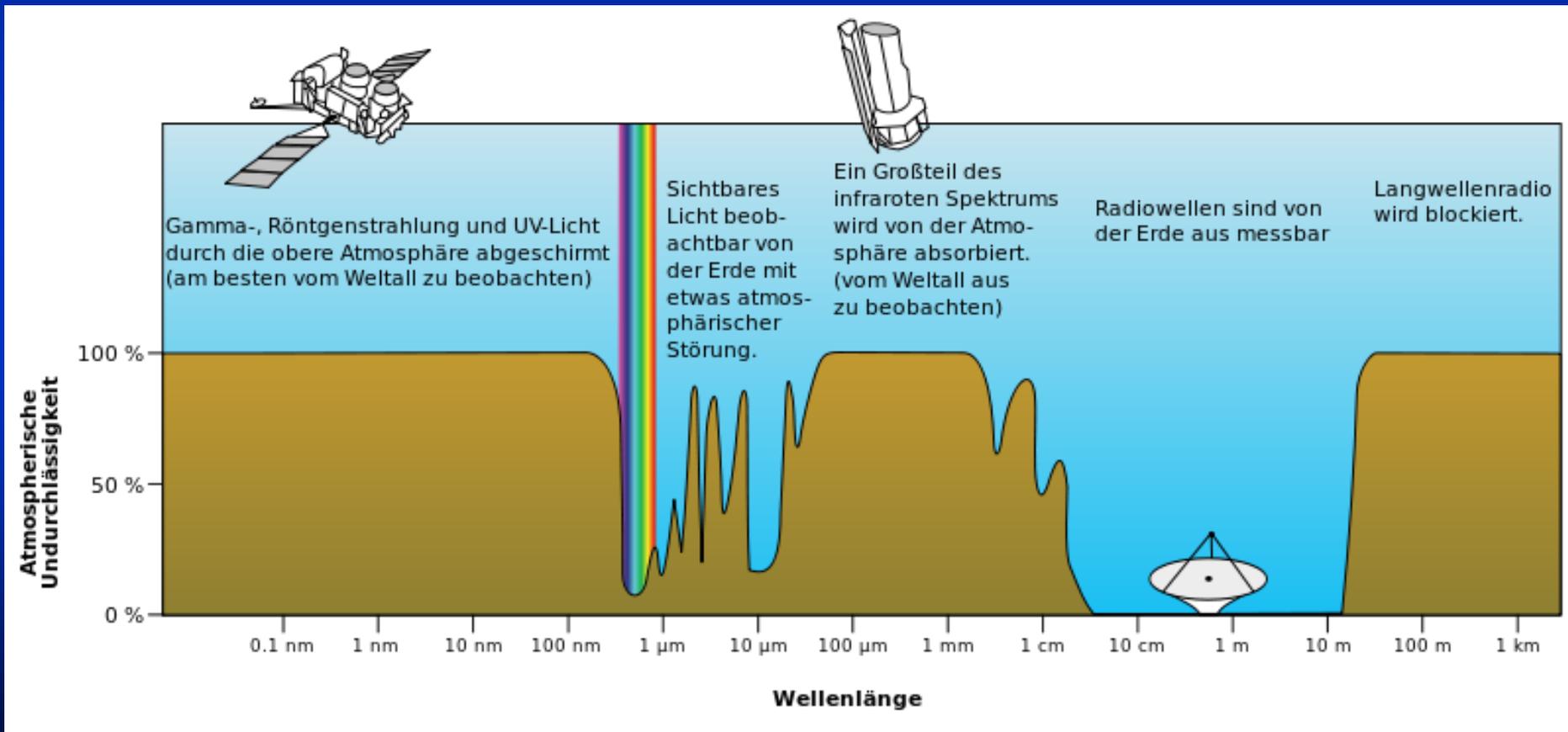
⇒ die Tragweite der Entdeckung erkannten aber beide nicht

auch in der UdSSR, 1964: **A. Doroshkevich** und **Igor Dmitrijewitsch Nowikow:**  
Vorschlag zur Beobachtung der Reliktstrahlung

# 3 K – Strahlung

Messung:

Problem:  $T = 3\text{K} \Rightarrow \text{Strahlungsmax @ } \lambda = 160\mu\text{m} \Rightarrow >8\text{km Altitude}$



# 3 K – Strahlung

Messung:

Problem:  $T = 3\text{K} \Rightarrow \text{Strahlungsmax @ } \lambda = 160\mu\text{m} \Rightarrow >8\text{km Altitude}$

- Hochpräzise Messungen:

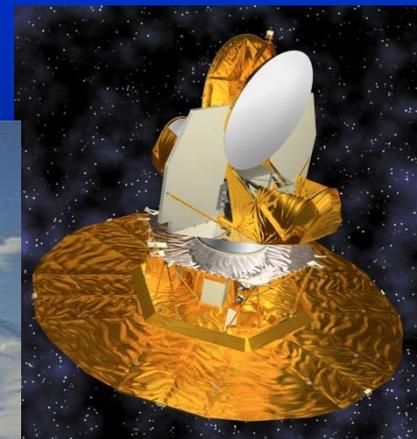
	beam size
COBE Satellit = Cosmic Background Explorer, 1989-1992 .....	7°-10°
Bollon: BOOMERANG, 1999 .....	0.3°
WMAP Satellit = Microwave Anisotropy Probe, 2001-2010 .....	0.2°
Planck Satellit, 2009-2013 .....	5'-33'



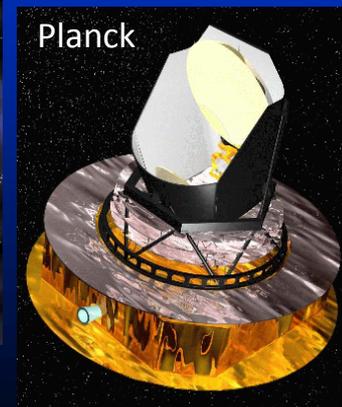
COBE



BOOMERANG



WMAP

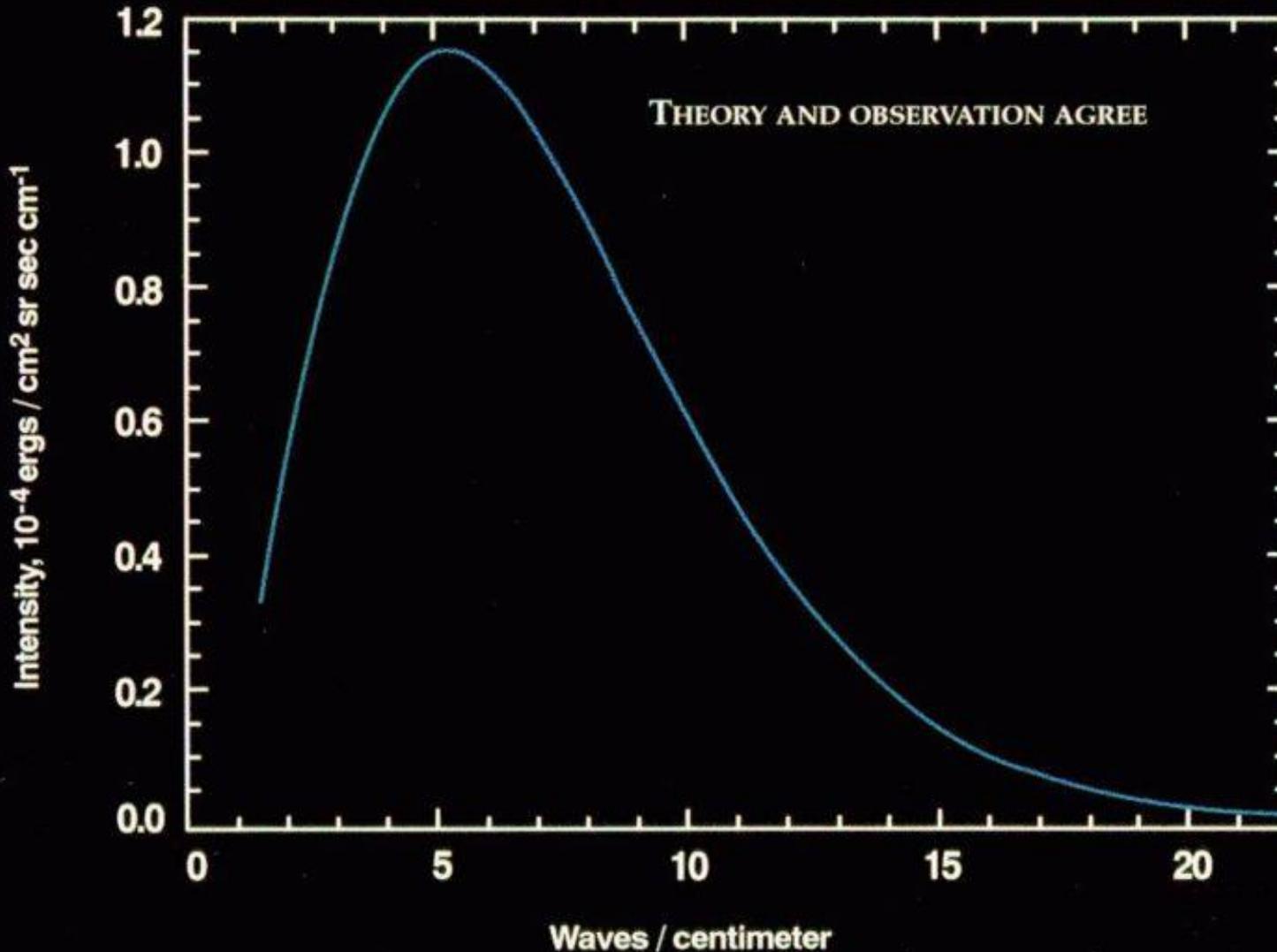


Planck

# 3 K – Strahlung

COBE spectrum  
Cosmic Microwave  
Background (CMB)

COSMIC MICROWAVE BACKGROUND SPECTRUM FROM COBE



## 34 Messpunkte

(equally spaced  
along this curve)

The FIRAS data match the curve so exactly, with error uncertainties less than the width of the blackbody curve, that it is impossible to distinguish the data from the theoretical curve.

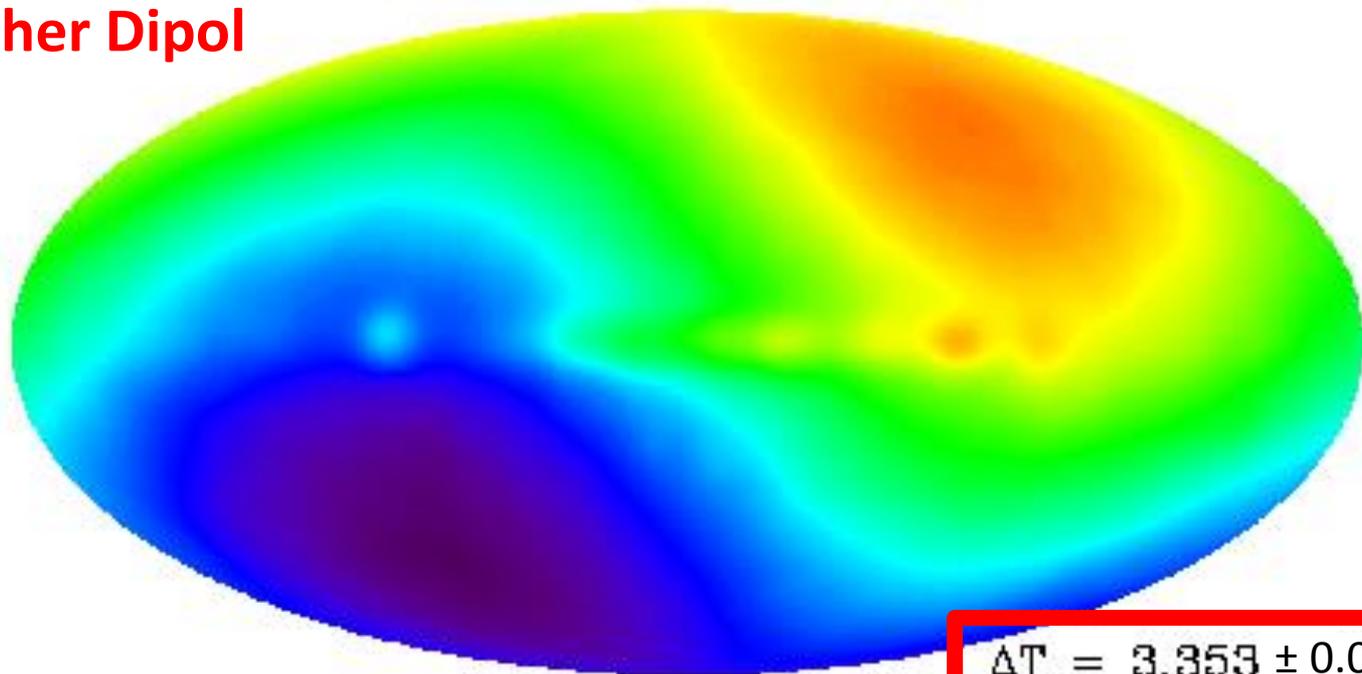
# 3 K – Strahlung

## Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

- stärkste Abhängigkeit von der Beobachtungsrichtung ca. 0,1%
  - Dipolanisotropie der Temperaturverteilung

- (1) Bewegung Sonnensystem mit 364 km/s gegenüber Bezugssystem, in dem CMB isotrop, in Richtung  $l = 11h\ 15.6m$ ,  $b = -7.5^\circ$
- (2) Lokale Gruppe bewegt sich mit 630 km/s in Richtung Centaurus große Ansammlung von Galaxien = Großer Attraktor

## Kosmischer Dipol



$$\Delta T = 3.353 \pm 0.016 \text{ mK (!)}$$

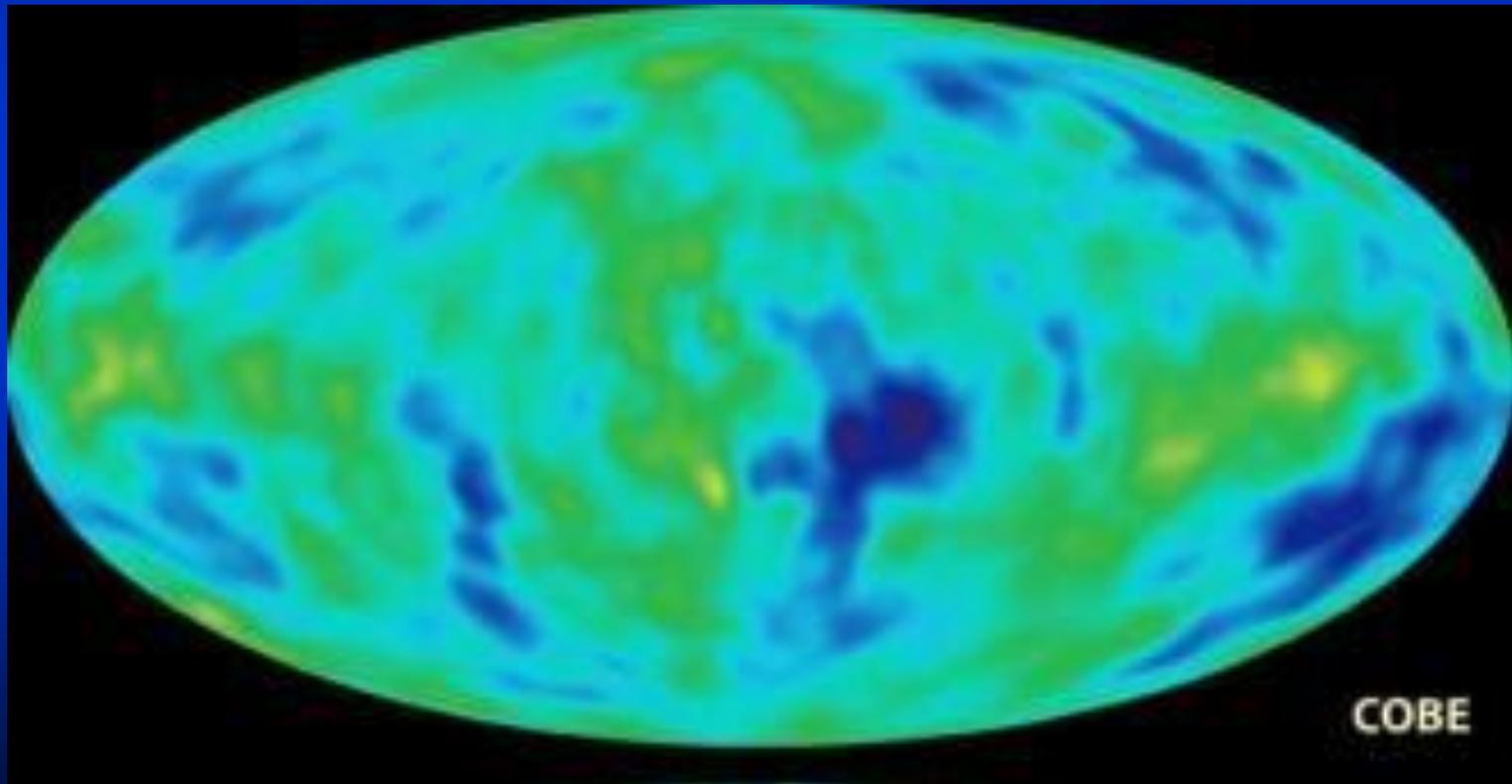
## 3 K – Strahlung

---

### Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

COBE: Entdeckung von noch kleineren T-Schwankungen =  $\Delta T/T = 10^{-5}K$ :

$$\Delta T = 30.5 \pm 5.5 \mu K \quad !!!$$



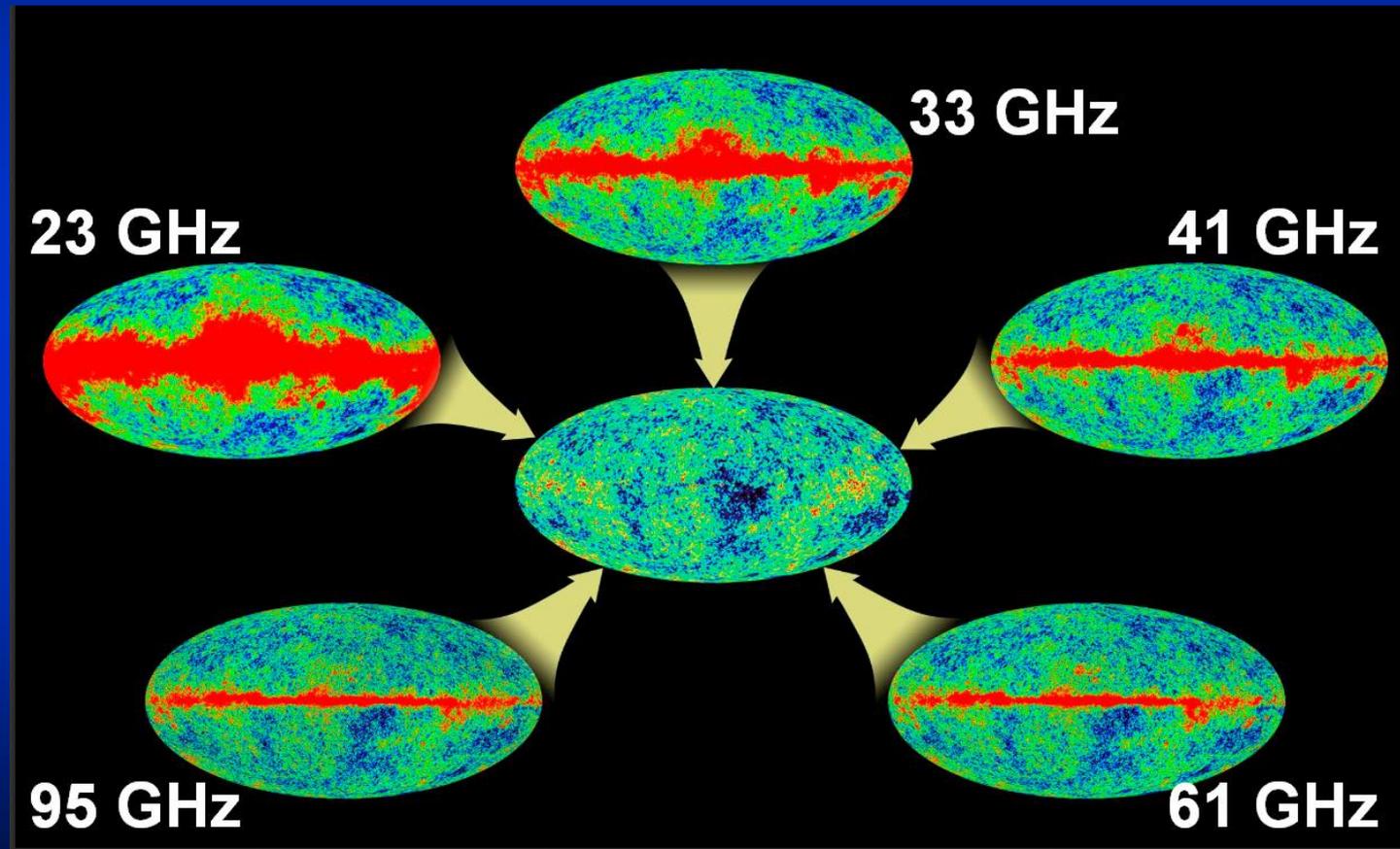
# 3 K – Strahlung

## Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

Raumsonde WMAP :

Vermessung Stärke  
feinster  
Temperatur-  
schwankungen  
in Abhängigkeit von  
ihrer  
Winkelausdehnung  
am Himmel

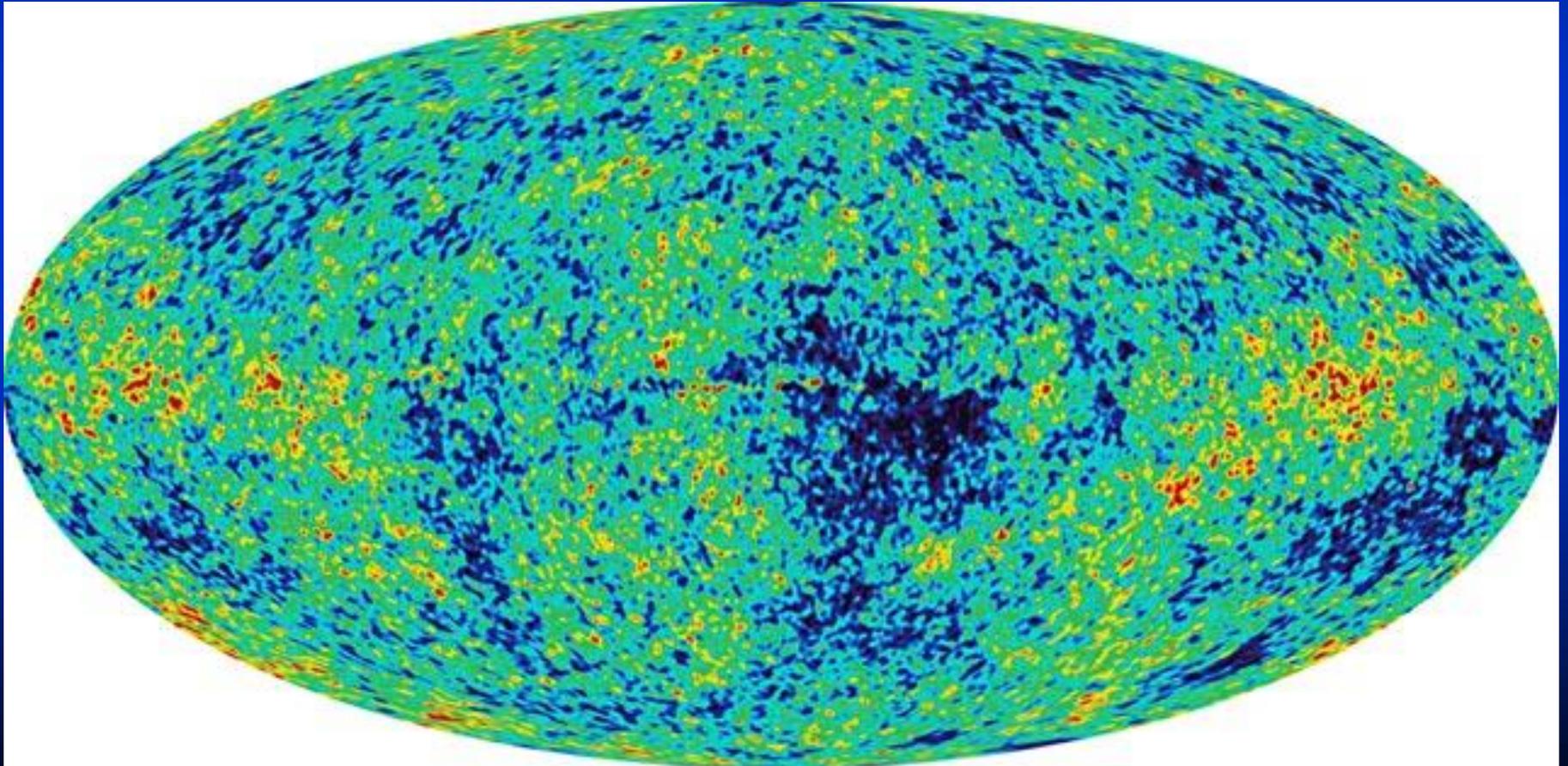
Ziel: Vermessung  
etlicher  
kosmologischer  
Parameter



## 3 K – Strahlung

---

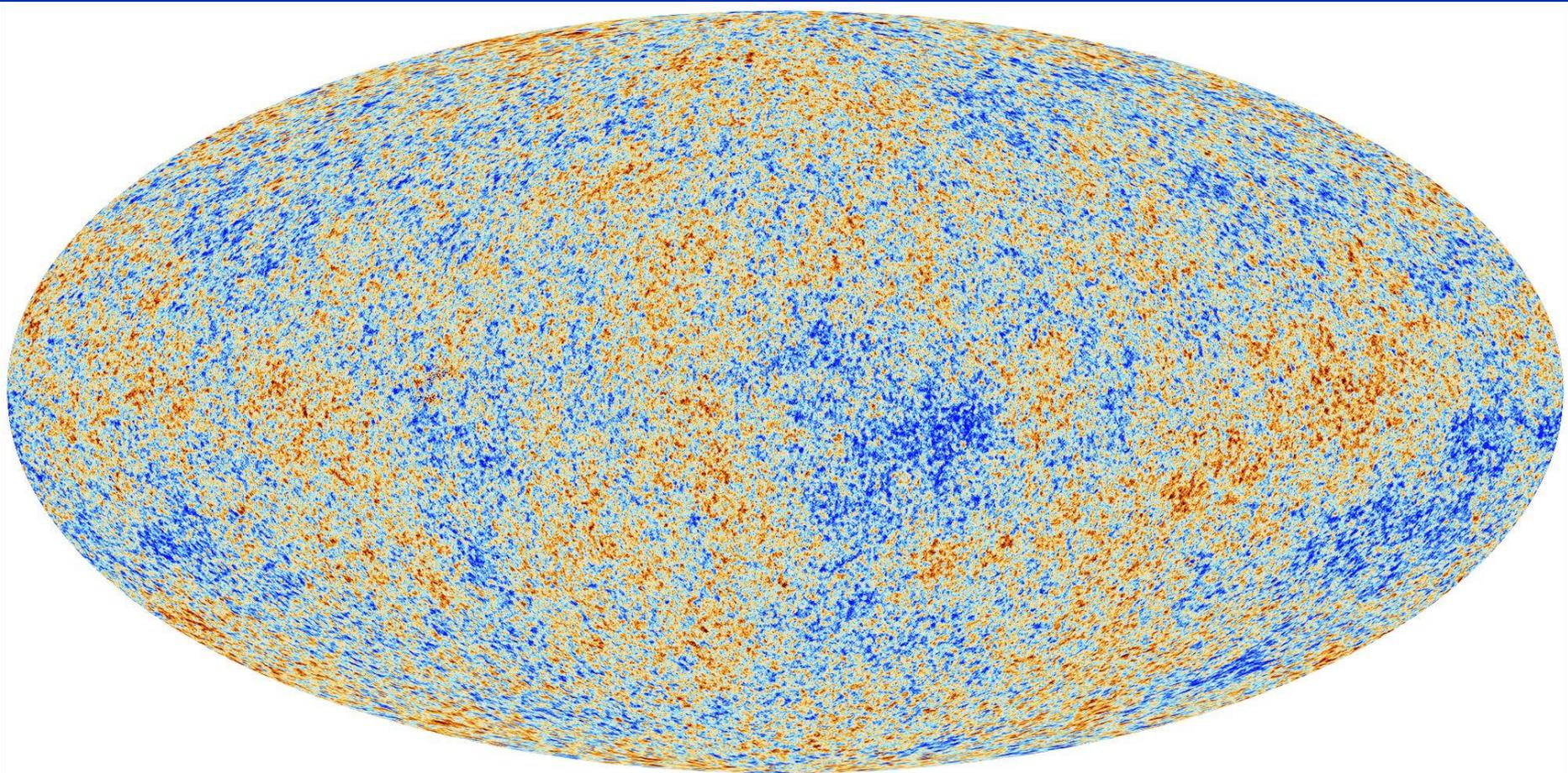
- WMAP - Fluktuationen der 3K-Strahlung
  - = frühkindliche Universum
  - = Kondensationkeime für Galaxienbildung



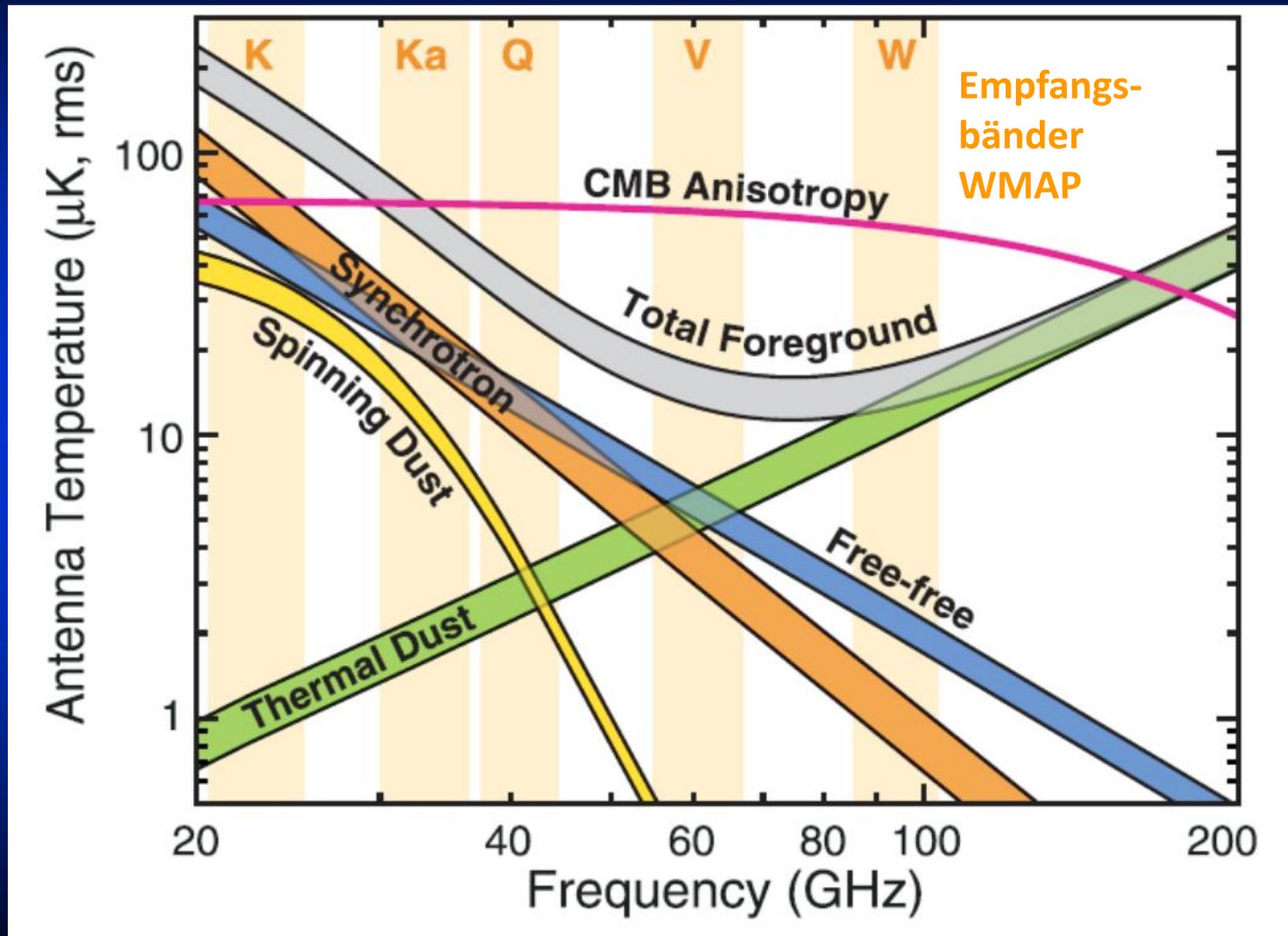
# 3 K – Strahlung

---

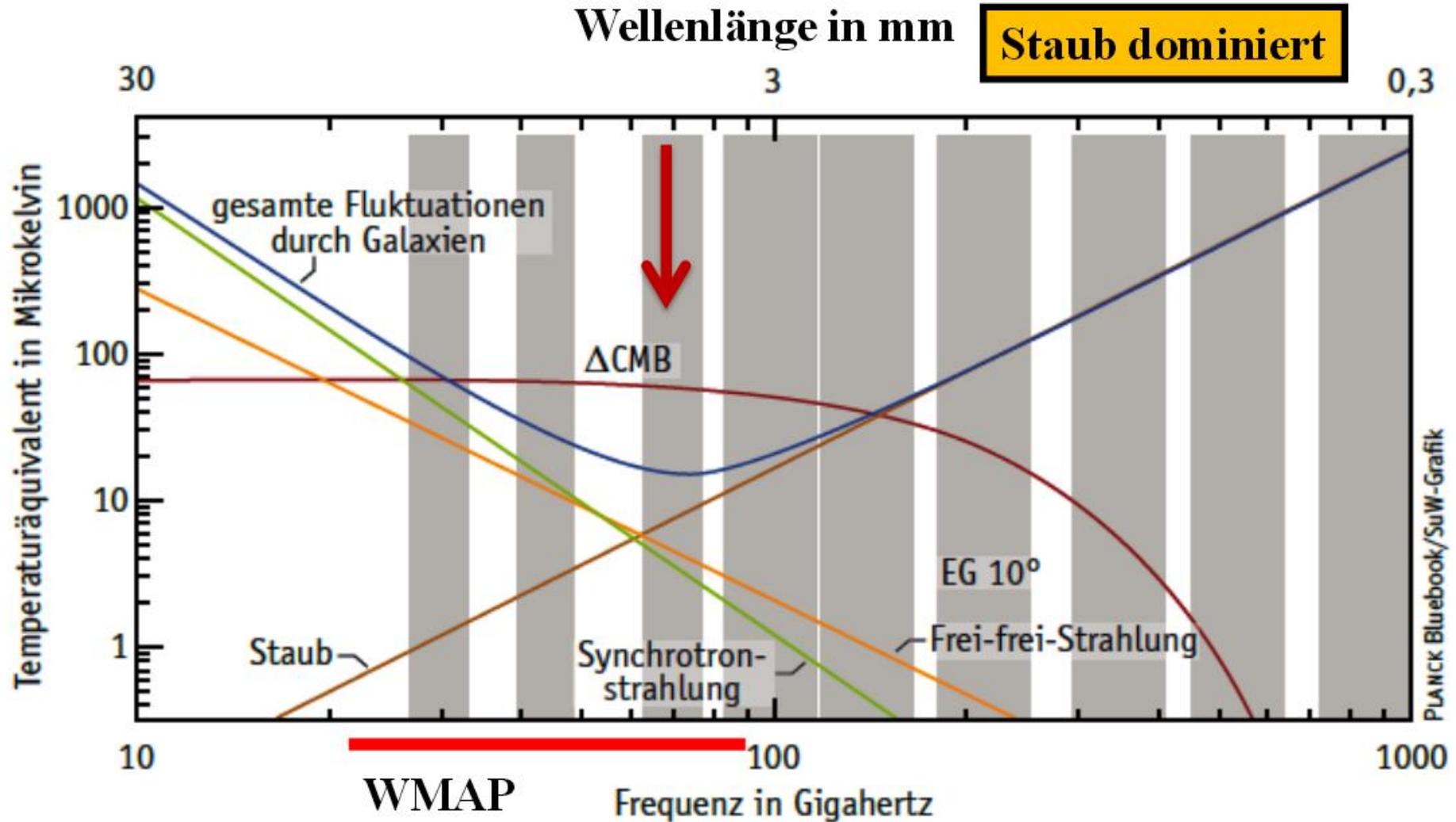
- Planck - Fluktuationen der 3K-Strahlung
- = frühkindliche Universum
- = Kondensationkeime für Galaxienbildung



# 3 K – Strahlung



## Planck-Bänder



# 3 K – Strahlung

---

## Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

### Warum interessant ?

⇒ Antwort auf früheste Strukturbildung in All ⇒ Verteilung Materie ⇒ Kollaps  
⇒ Galaxienbildung ⇒ Wabenstruktur

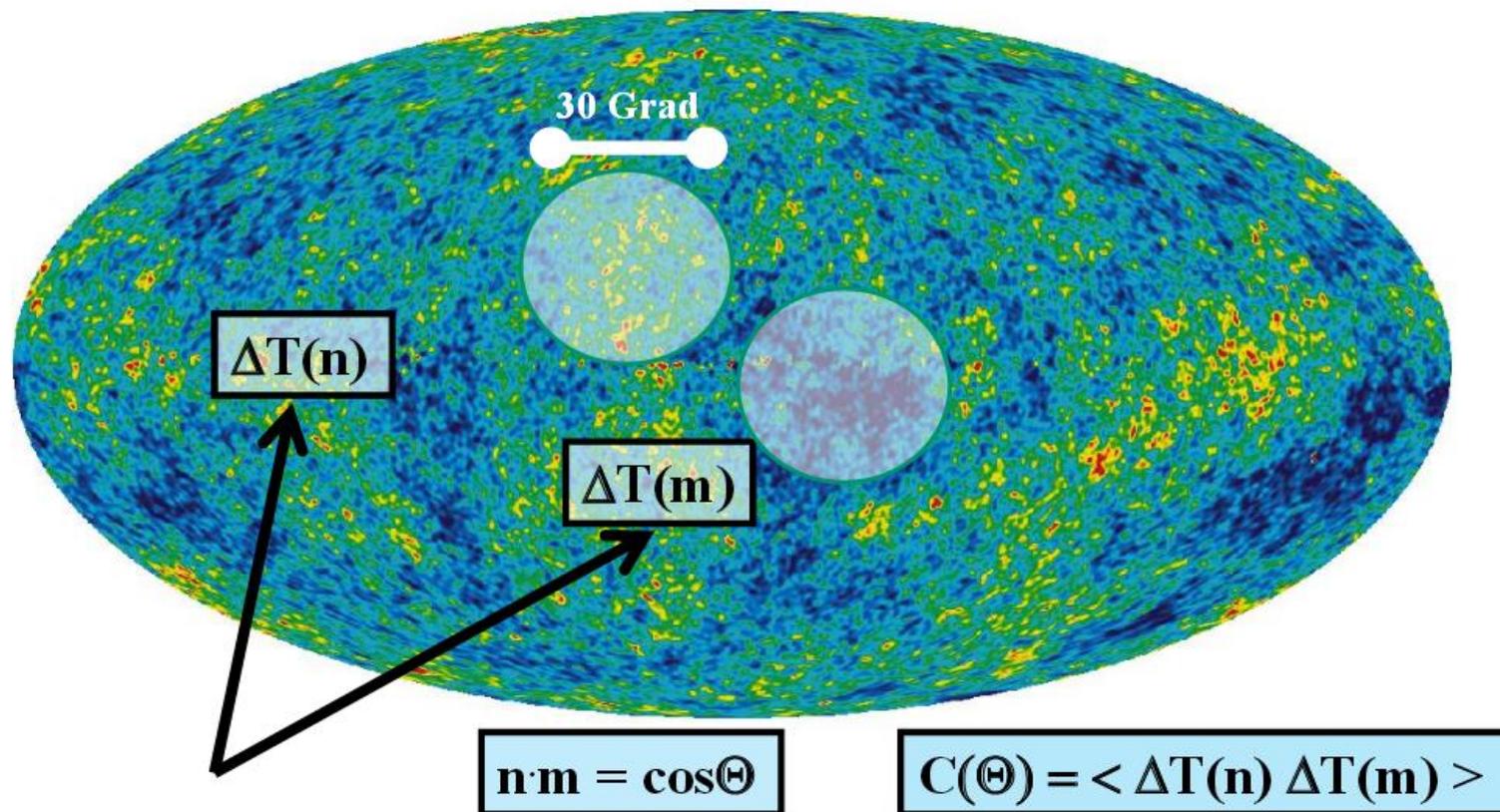
⇒ mit Hilfe der relativistischen Kosmologie: genaue Modellvorhersagen  
für eine zu erwartende T-Verteilung & Winkelleistungsspektrum

⇒ Auswertung statistischer Eigenschaften der Dichteverteilung zum  
Zeitpunkt der Rekombination

⇒ Bestimmung wichtiger kosmologischer Parameter

⇒ Unterscheidung verschiedener Modelle für das Universum

# CMB Temperatur Anisotropien: Temperatur-Korrelationsfunktion



### 3 K – Strahlung

Will man etwas über die Verteilung der Anisotropien erfahren, ist es sinnvoll eine Entwicklung in Multipole (Kugelflächenfunktionen, harmonische Analyse) zu machen:

Harmonische Analyse der Temperaturfluktuationen

$$\frac{\Delta T(\theta, \phi)}{T} = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_m |a_{lm}|^2$$

$$C(\Theta) = \frac{1}{4\pi} \sum_l (2l+1) C_l P_l(\cos \Theta)$$

**Winkel-  
korrelations-  
Funktion**

# 3 K – Strahlung

Will man etwas über die Verteilung der Anisotropien erfahren, ist es sinnvoll eine Entwicklung in Multipole (Kugelflächenfunktionen, harmonische Analyse) zu machen:

## Harmonische Analyse der Temperaturfluktuationen

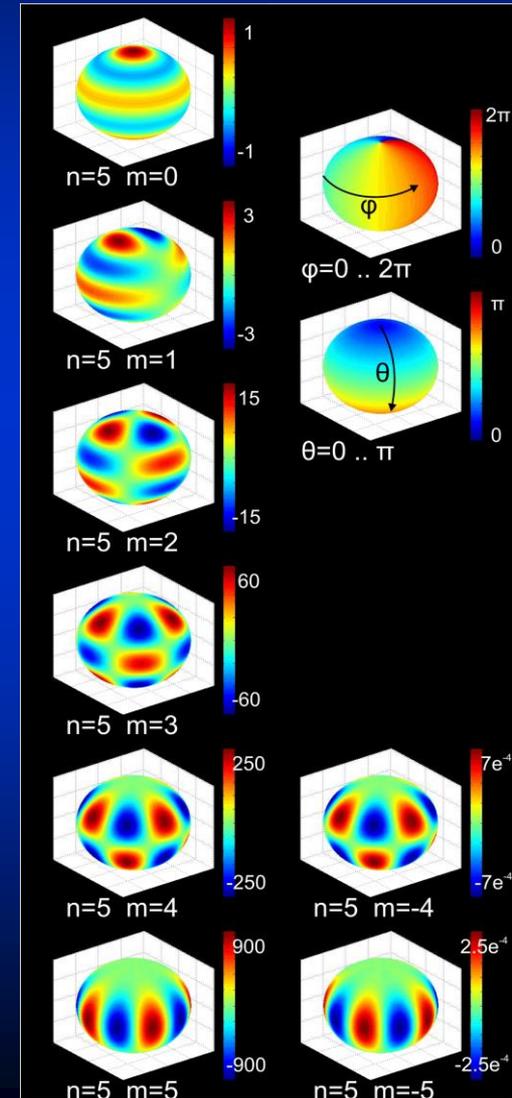
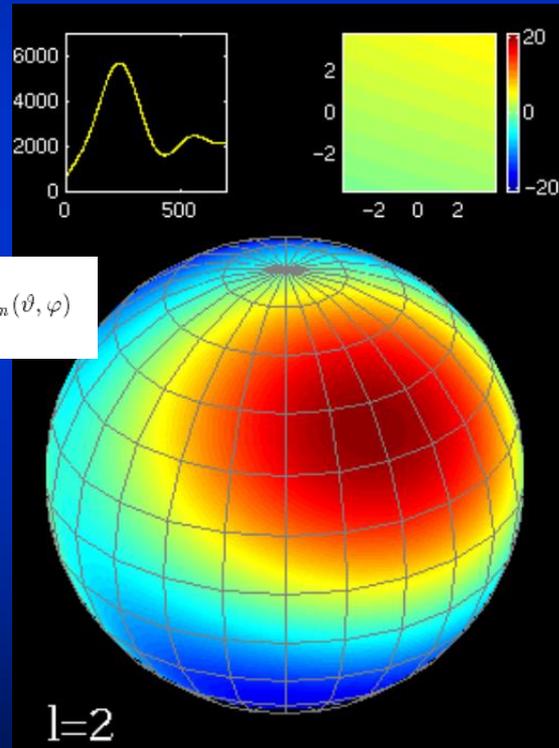
Die Kugelflächenfunktionen  
= vollständiger und orthonormaler  
Satz von Eigenfunktionen des  
Winkelanteils des Laplace-Operators

Sinnvoll: in Kugelkoordinaten

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial \vartheta^2} + \frac{\cos \vartheta}{\sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} + \frac{1}{\sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) Y_{lm}(\vartheta, \varphi) = -l(l+1) Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$$

$Y_{lm}$  = Kugelflächenfunktionen

$l \Rightarrow$  Zahl der „Beulen“ in  $\theta$  (Zeile)  
 $m \Rightarrow$  Zahl der „Beulen“ in  $\phi$  (Spalte)  
Zeilen und Spalten werden jeweils bei Null beginnend durchnummeriert

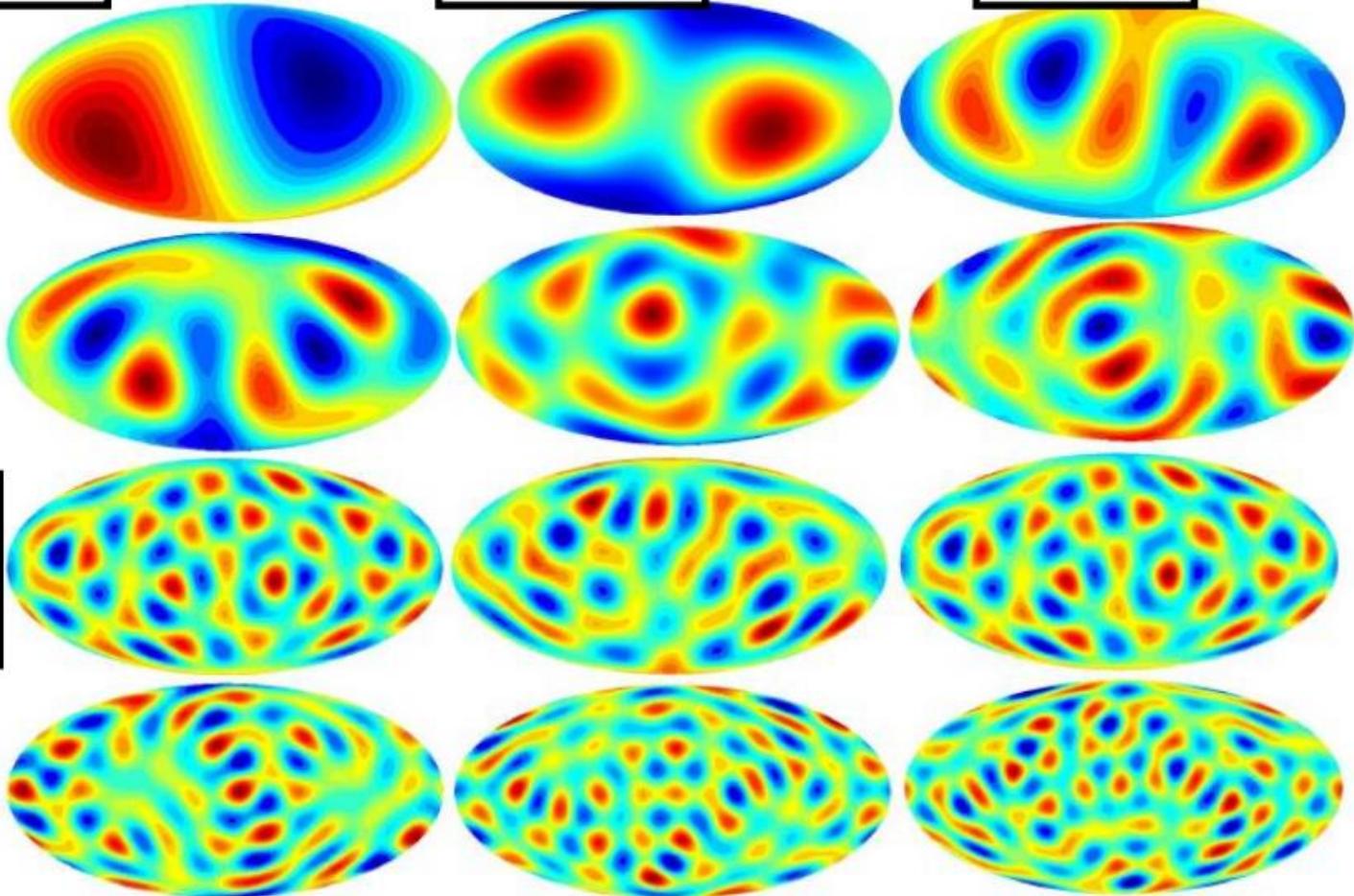


# Multipole – $\ell = 1, 2, 3, \dots, 12$

Dipol

Quadrupol

Sextupol



„Super-Horizon-Patches“

### 3 K – Strahlung

Will man etwas über die Verteilung der Anisotropien erfahren, ist es sinnvoll eine Entwicklung in Multipole (Kugelflächenfunktionen, harmonische Analyse) zu machen:

Harmonische Analyse der Temperaturfluktuationen

$$\frac{\Delta T(\theta, \phi)}{T} = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_m |a_{lm}|^2$$

$$C(\Theta) = \frac{1}{4\pi} \sum_l (2l+1) C_l P_l(\cos \Theta)$$

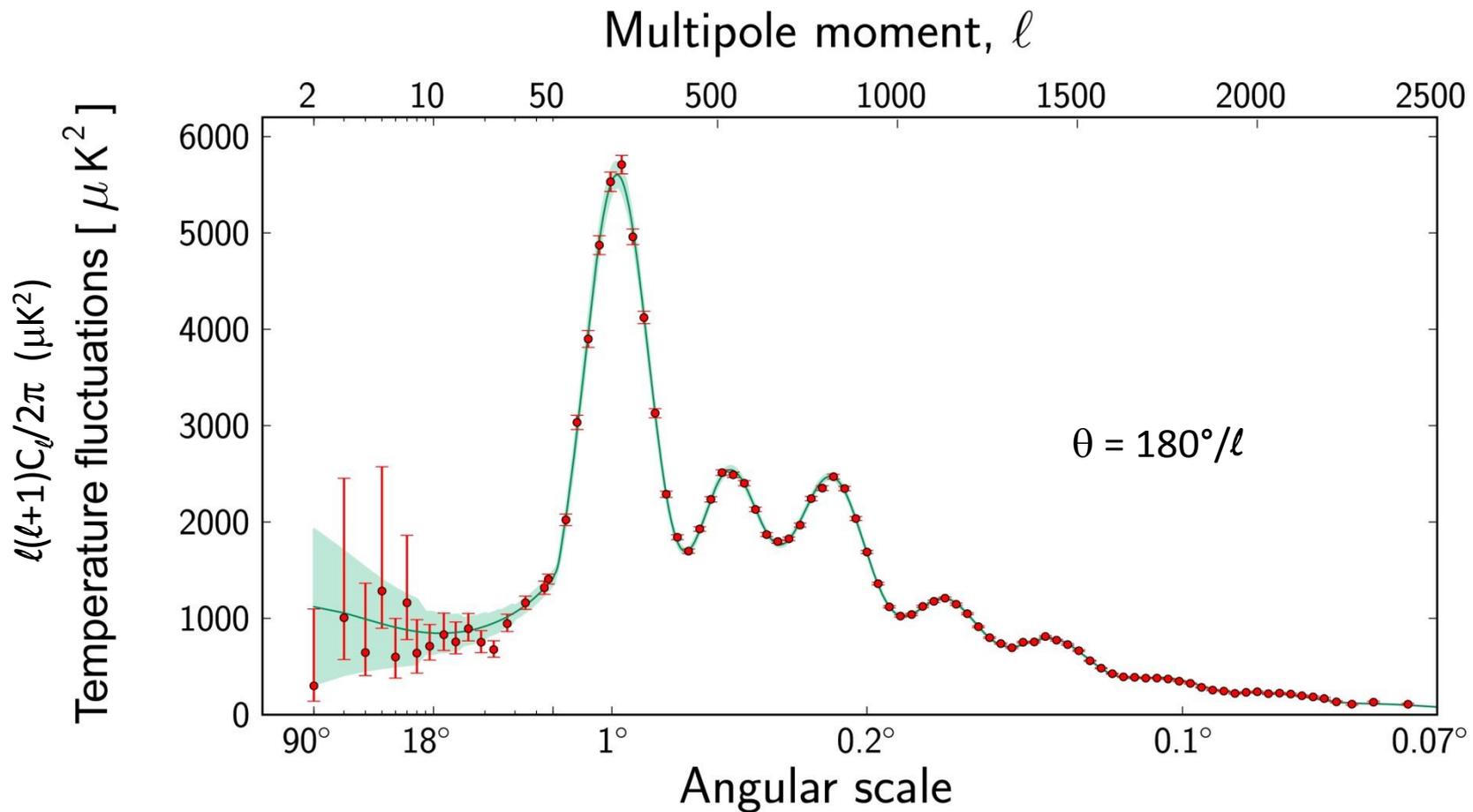
**Winkel-  
korrelations-  
Funktion**

# 3 K – Strahlung

Leistungsspektrum  
der Temperaturschwankungen  
der kosmischen  
Hintergrundstrahlung

## Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

„Summen“ des frühen Universiums: = akustische Oszillationen

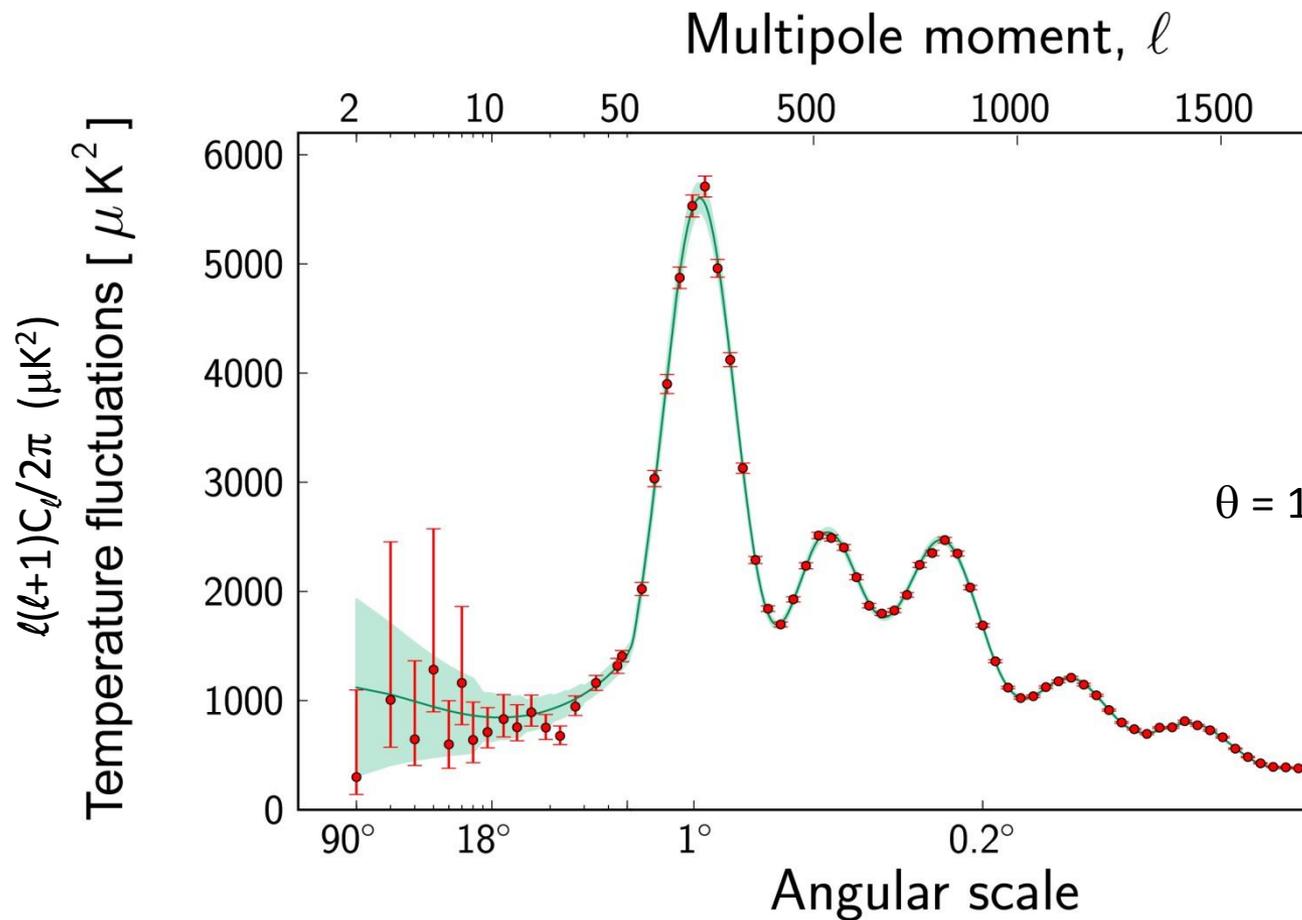


# 3 K – Strahlung

## Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

„Summen“ des frühen Universiums: = akustische Oszillationen

Leistungsspektrum der Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung



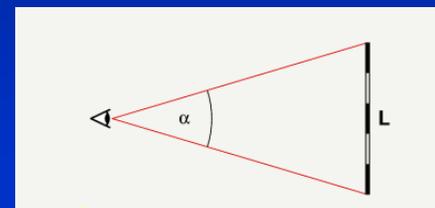
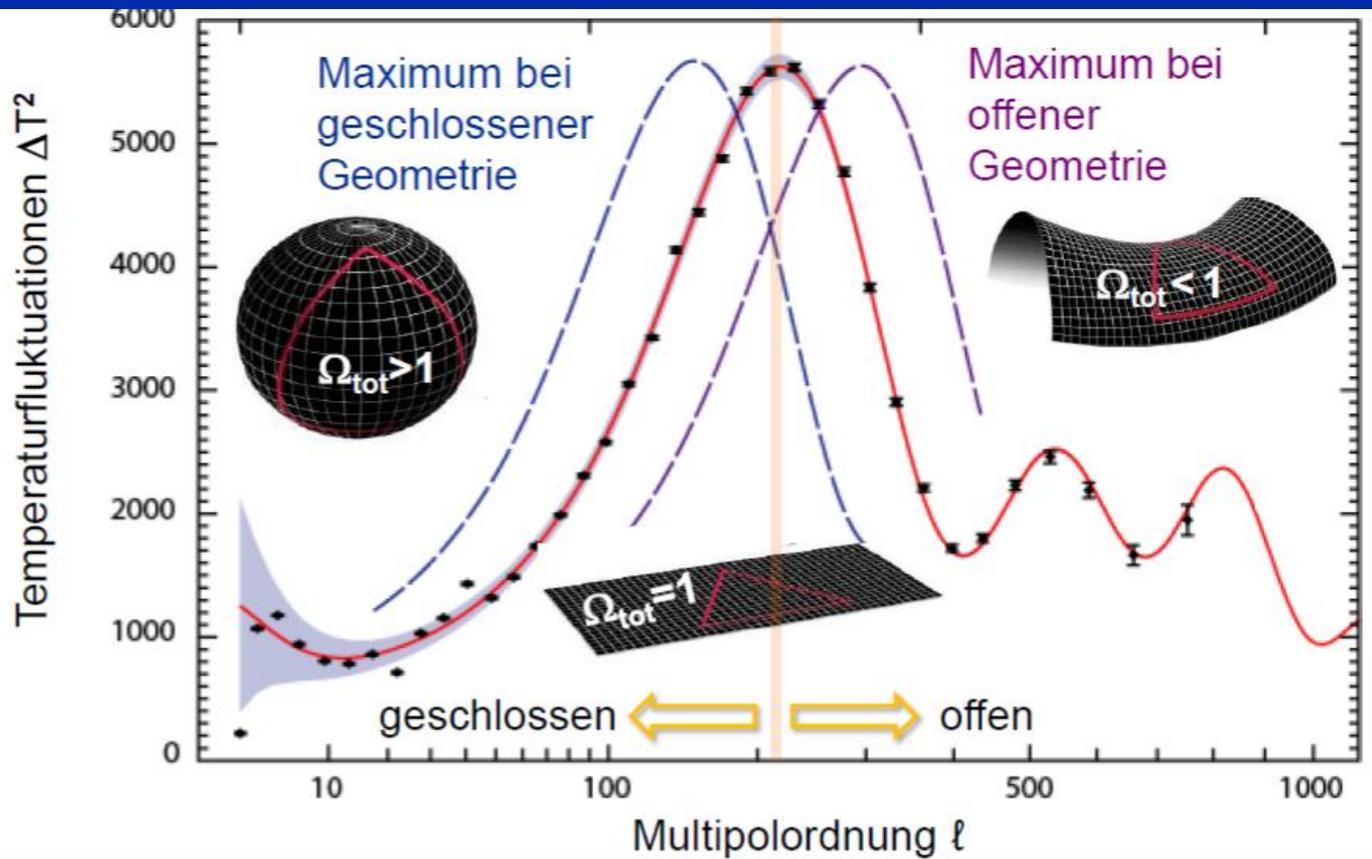
Erklärung:

- Gravi-Kraft komprimiert ursprüngliches Plasma bis Lichtdruck der Photonen die Bewegung umkehrt  
⇒ Dichteschwingungen (ähnlich Luft) = akustische Oszillationen
- Lage des Maximums = Tonhöhe (Grundschiwingung) hängt von Massendichte des Alls ab:  
 $0.9^\circ$  stimmt gut mit Vorhersagen für flachen Raum überein  
⇒ Summe aller Energiedichten (Masse  $E = mc^2$  + andere) hat gerade so einen kritischen Wert, das die Eigenschaft, dass diese den Raum positiv krümmen (konvex) gerade von der Expansion des Raumes mit negativem Krümmungseffekt (konkav) aufgehoben wird

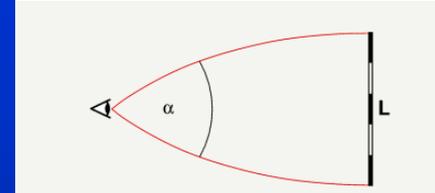
# 3 K – Strahlung

## Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

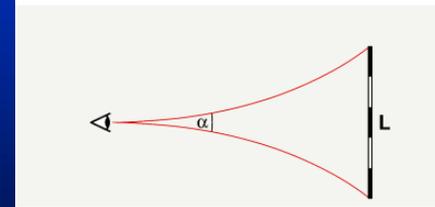
### Geometrie des Weltalls



Flacher Raum

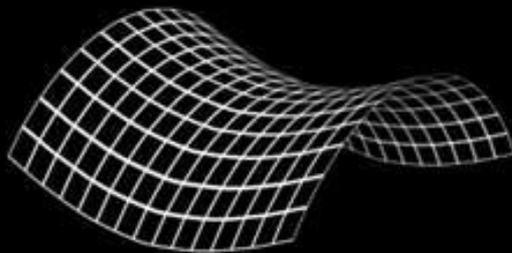
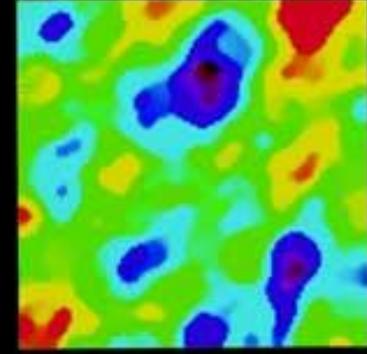
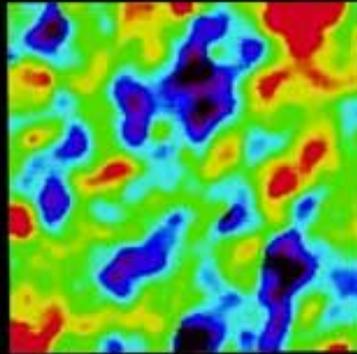
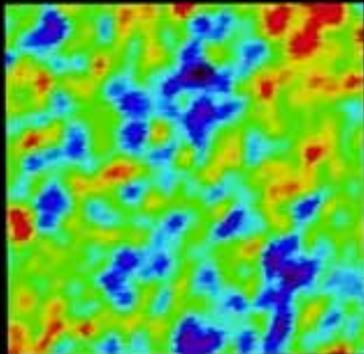


Positiv gekrümmter Raum



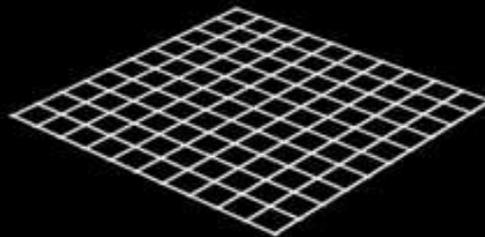
Negativ gekrümmter Raum

## GEOMETRY OF THE UNIVERSE



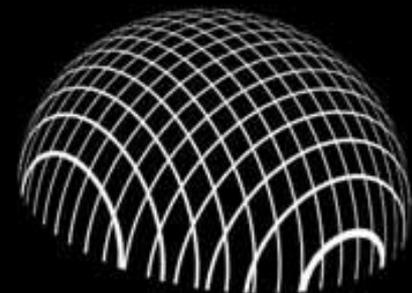
**OPEN**

Fluctuations largest on half-degree scale



**FLAT**

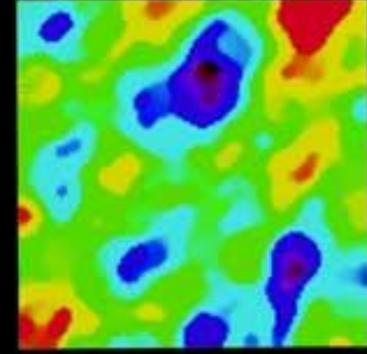
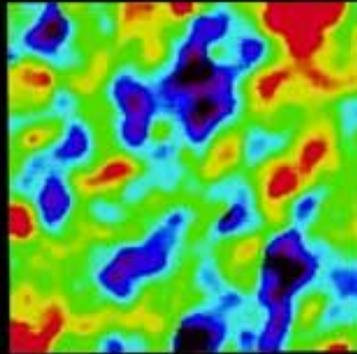
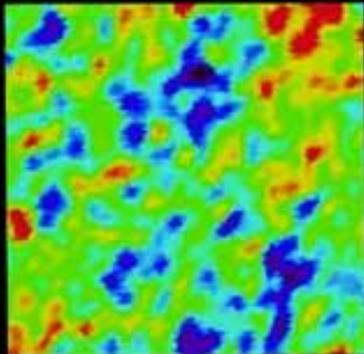
Fluctuations largest on  
1-degree scale



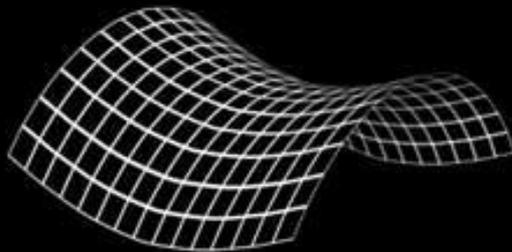
**CLOSED**

Fluctuations largest on  
greater than 1-degree scale

## GEOMETRY OF THE UNIVERSE

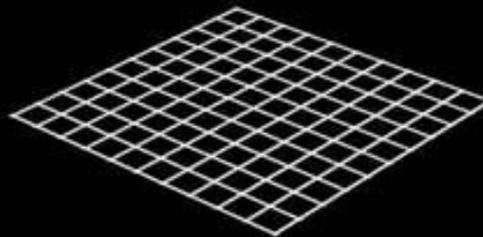


Deutliches Maximum bei  $0.9^\circ$ !



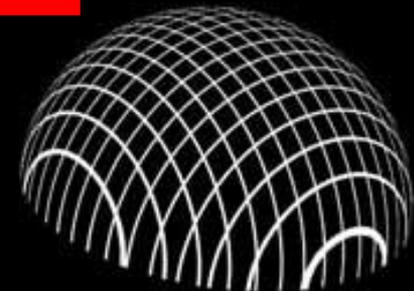
**OPEN**

Fluctuations largest on half-degree scale



**FLAT**

Fluctuations largest on  
1-degree scale



**CLOSED**

Fluctuations largest on  
greater than 1-degree scale

# 3 K – Strahlung

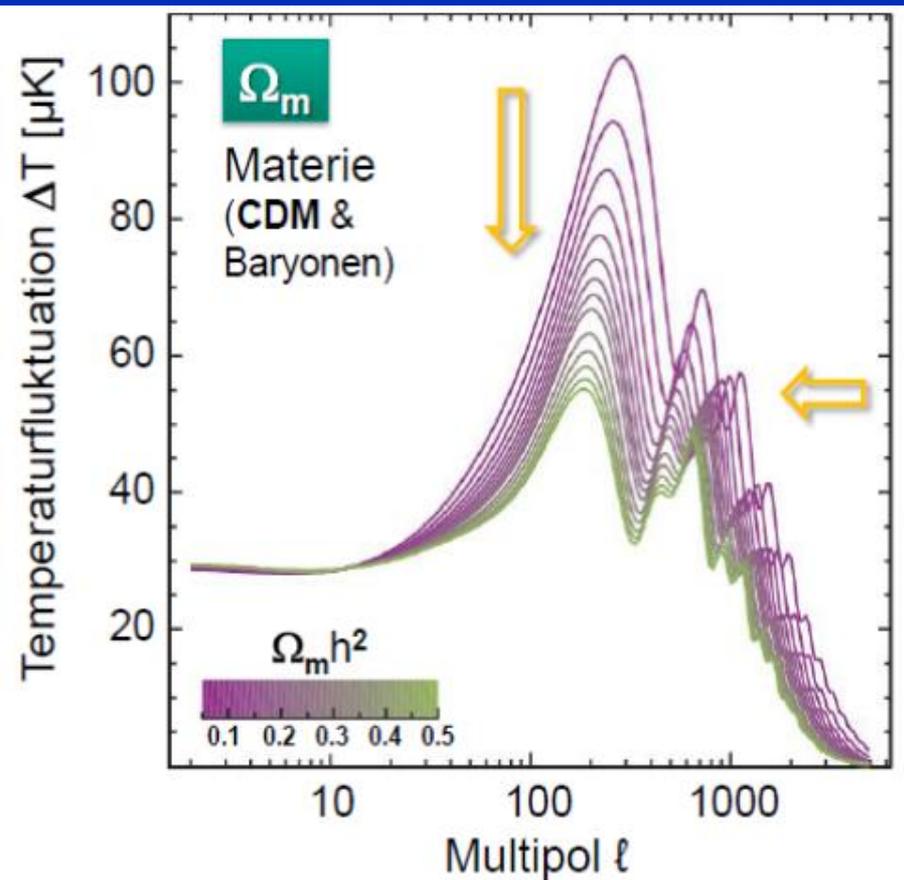
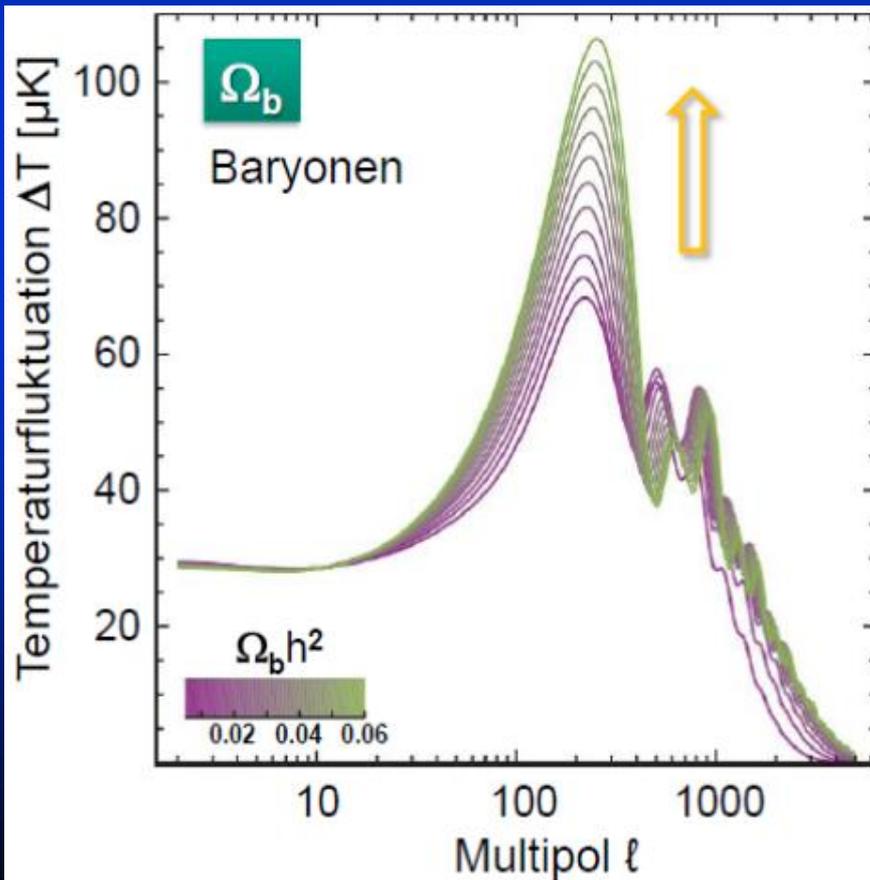
## Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

Materiedichte ableitbar:

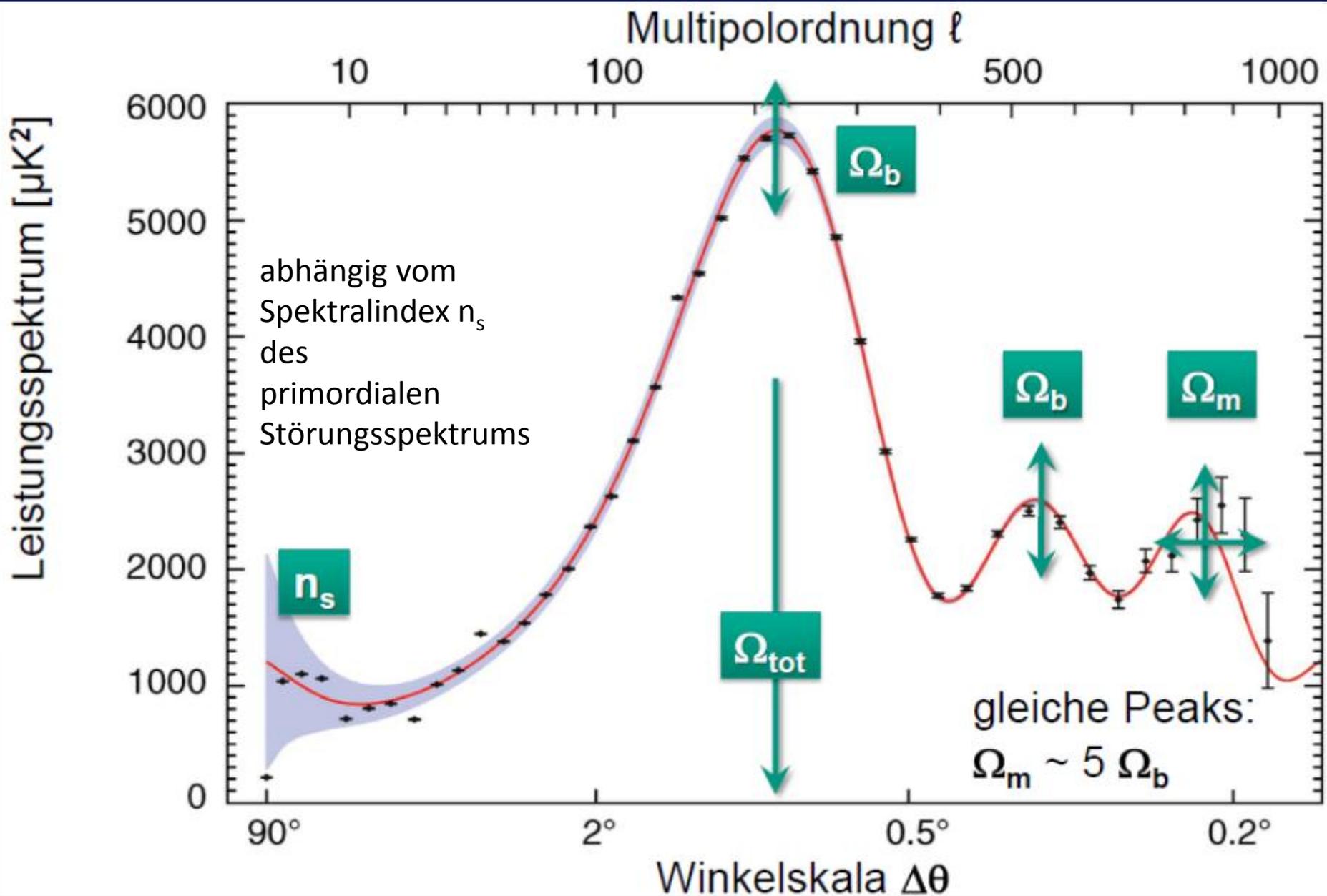
Baryonen-Photonen-Verhältnis  $\Rightarrow$  aus Höhe des ersten Peaks, und Peakintensitätsverteilung:

$\Rightarrow$  um so mehr Baryonen – um so größere  $\Delta T$ -Intensitäts-Fluktuationen

$\Rightarrow$  genaue Messung von  $\Delta T \Rightarrow$  Bestimmung  $\Omega_b$



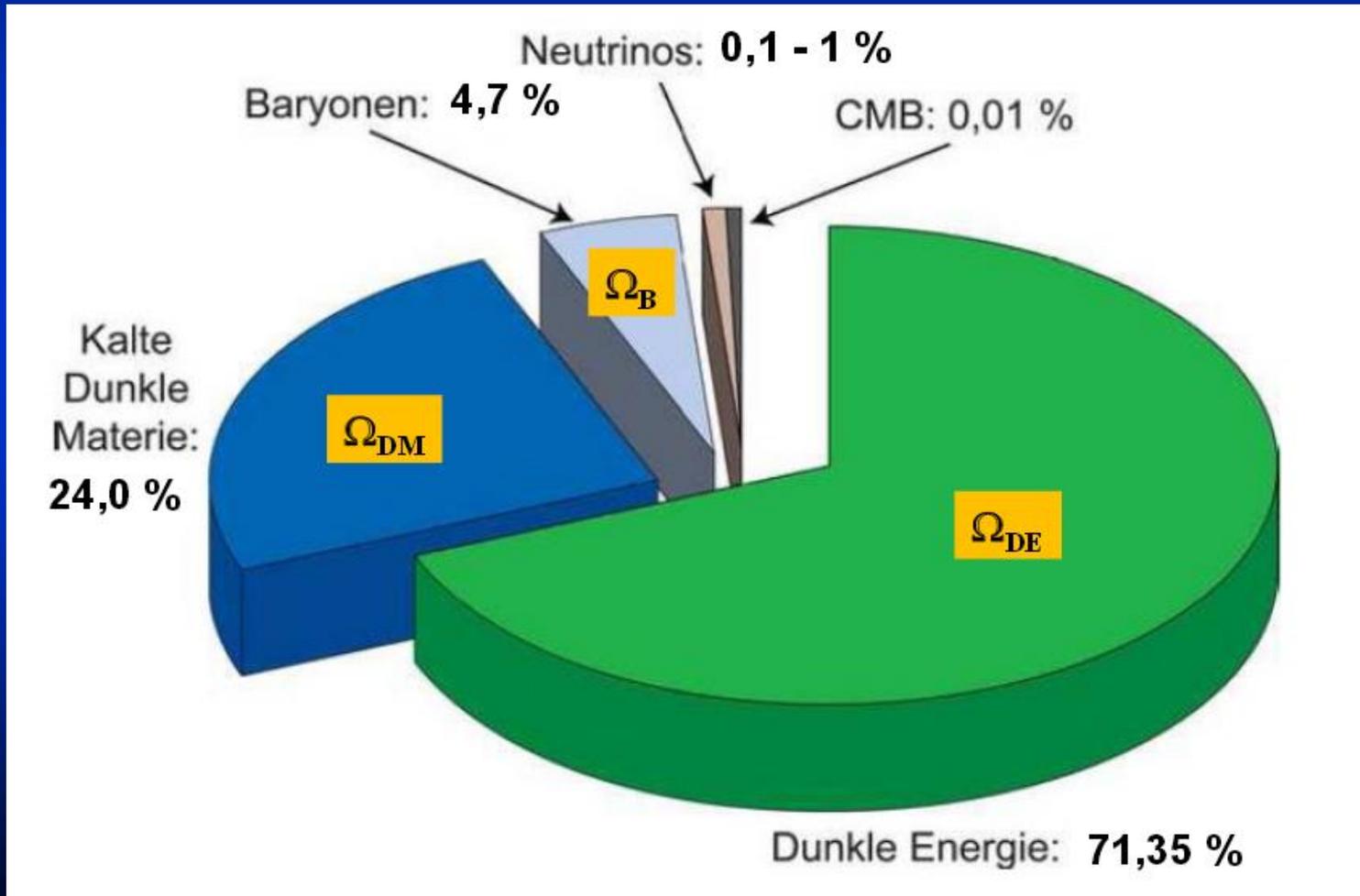
# 3 K – Strahlung



# 3 K – Strahlung

## Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

### Materieverteilung im Universum



# 3 K – Strahlung

## Sachs-Wolfe-Effekt $6 < \ell < 40$

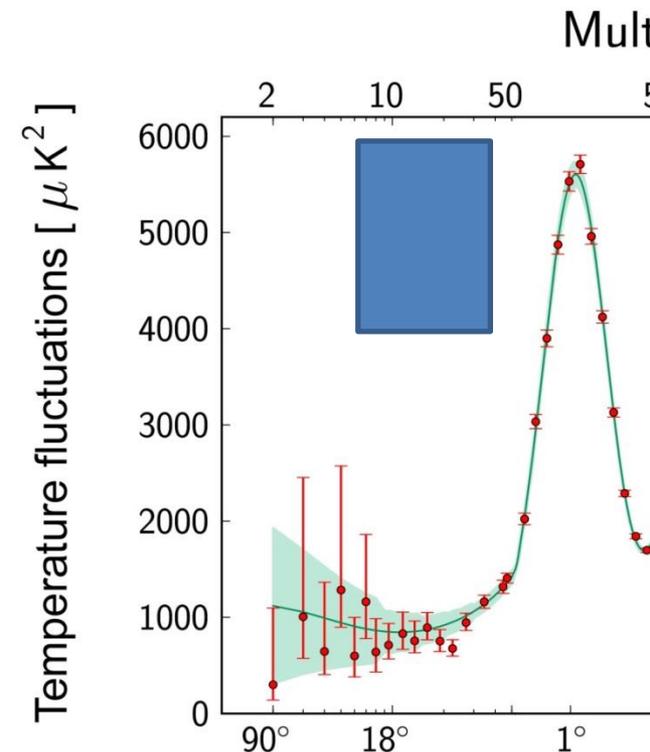
Strahlung, die aus überdichten Regionen entweicht, erfährt eine **zusätzliche Gravitationsrotverschiebung**

... so dass die Hintergrundstrahlung in der entsprechenden Richtung eine geringfügig niedrigere Temperatur hat,

Effekt aber teilweise kompensiert, da Gravitation  $\Rightarrow$  Zeitdilatation

### Vermuteter Ursprung:

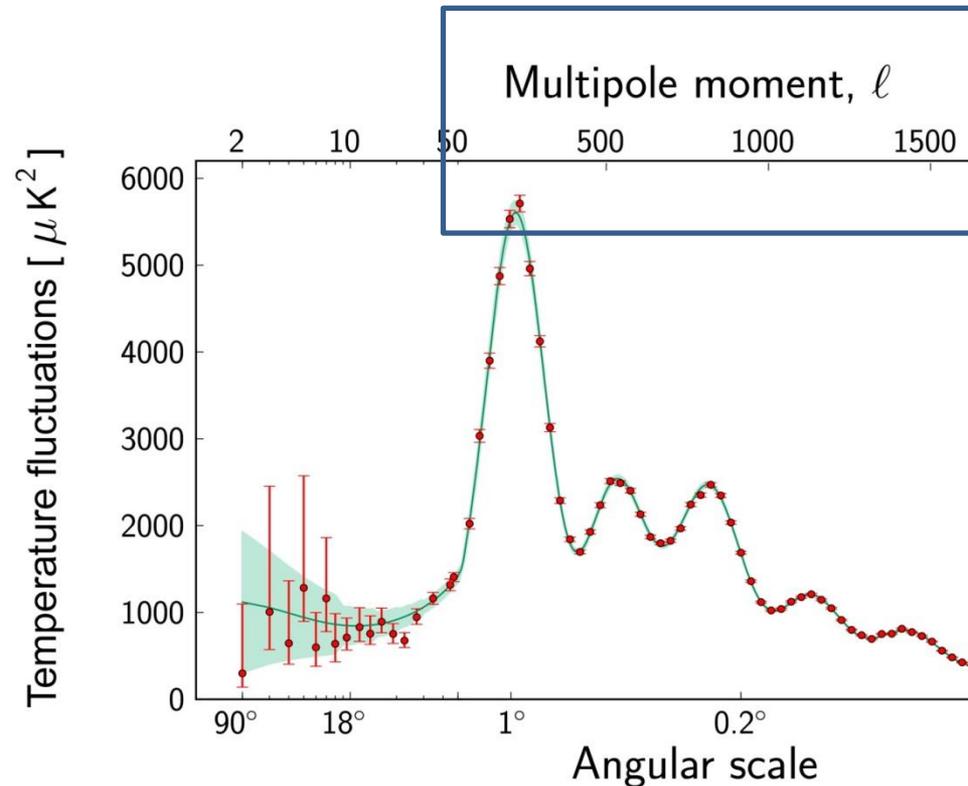
- $\Rightarrow$  mögliche Quantenfluktuationen im Inflationsfeld
- $\Rightarrow$  durch Inflation minimalste Inhomogenitäten auf kosmische Dimensionen
- $\Rightarrow$  dadurch existierten bereits Verdichtungen und Verdünnungen (Unterschiede im Gravitationspotential) im kosmischen Material
- $\Rightarrow$  kosmische Strukturen in unserer Nachbarschaft schon vor Rekombination angelegt
- $\Rightarrow$  Photonen in überdichten Gebieten
- $\Rightarrow$  Energieverlust beim Verlassen
- $\Rightarrow$  Verringerung der Photonentemperatur
- $\Rightarrow$  Anisotropien auf großen Winkelskalen



## 3 K – Strahlung

### Akustische Oszillationen $\ell > 40$

- Schwingungen im kosmischen Plasma, bestehend aus DM (dominant) !!, Baryonen, Photonen und Neutrinos,  $C_{\text{Schall}} = 60\%$  der Lichtgeschwindigkeit, Ausbildung einer Schwingung  $t = L/c_{\text{Schall}}$
- damit Obergrenze für Dichtestörung, da  $t = 400000 \text{ a} \Rightarrow$  nur Materiewolken mit  $L < 80 \text{ Mpc}$  können schwingen (Schallhorizont)
- Schallhorizont definiert Grundton der Temperaturschwankung
- Synchronisierung der Schwingung gleich großer Wolken

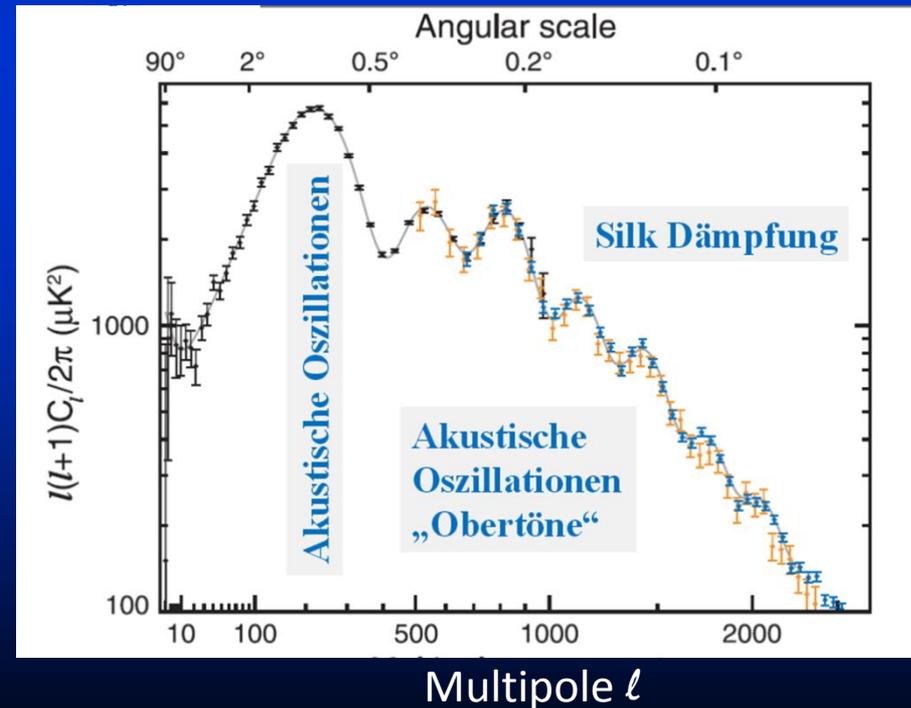
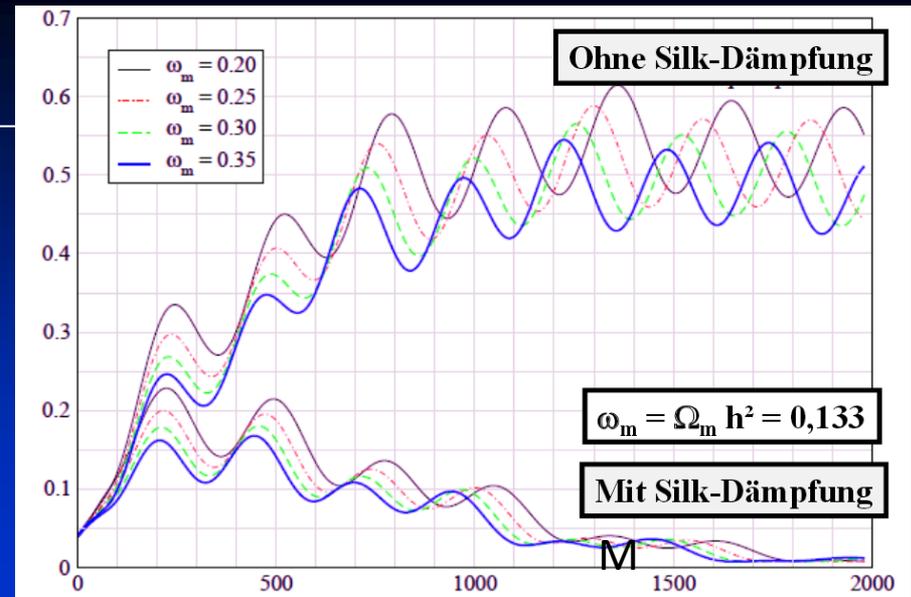


# 3 K – Strahlung

## Silk Dämpfung $\ell > 500$

Untere Grenzgröße für Wolken mit akustischen Schwingungen (Silk 1968):

- Photonen wechselwirken mit dem Plasma (Rekombination + Entkopplung nicht instantan)
- kleine Schwankungen der Strahlungsdichte verhindern Materiekondensation
- Photonen treiben kleine Materiewolken wieder auseinander



# 3 K – Strahlung

## Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

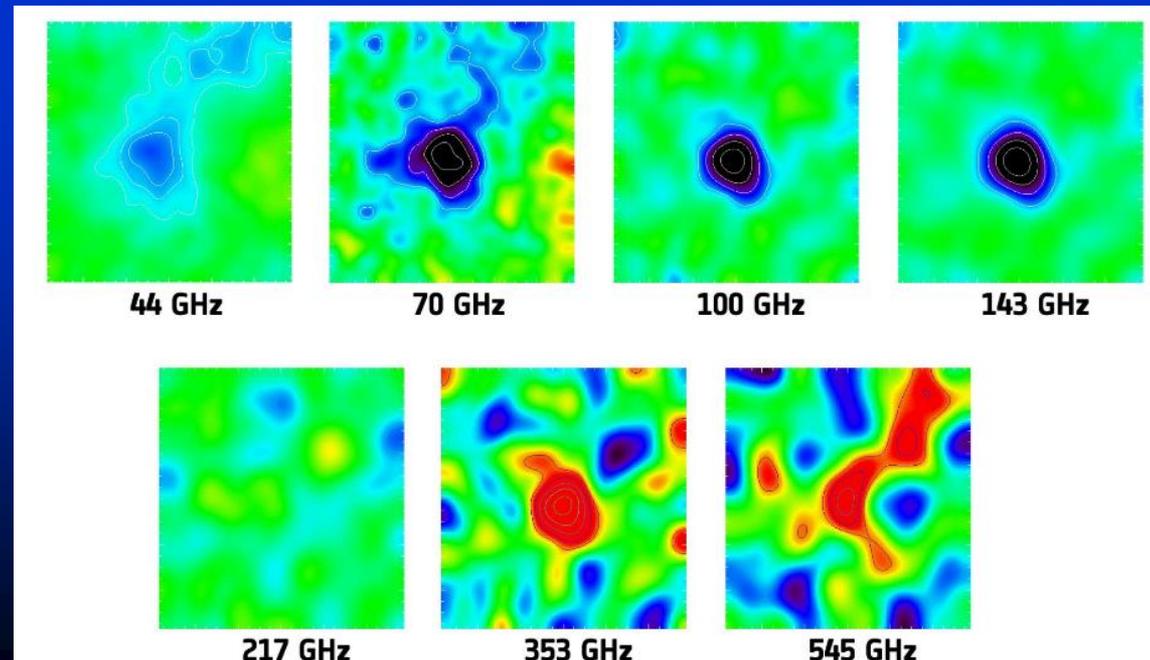
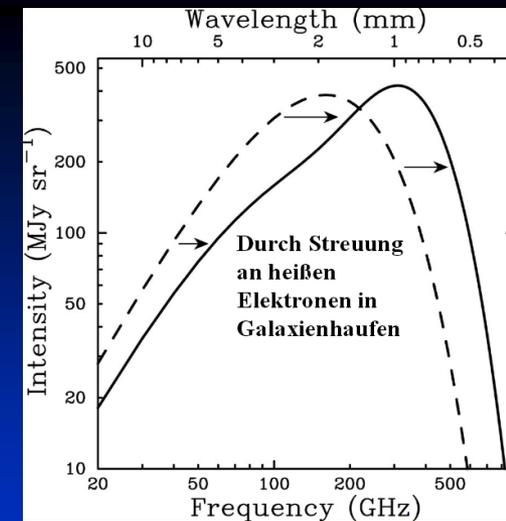
### Sunyaev-Zel'dovich Effekt

- an Elektronen des heißen Gases von Galaxienhaufen können Photonen streuen
- durch Streuung -> kleine Änderung der Photonenenergie: nach Compton-Streuung im Mittel eine höhere Frequenz
- ⇒ dadurch wächst Zahl der hochfrequenten Photonen relativ zum Planckspektrum
- ⇒ während Zahl der niederfrequenten Photonen sinkt

Das ist zu sehen:

⇒ als cool- oder hot spots

⇒ Anwendung, um massereiche Galaxienhaufen aufzuspüren



Abell 2319 @ d = 260 Mpc

# Bestimmung sämtlicher wichtiger kosmologischer Parameter

Cosmological parameters from 2013 Planck results<sup>[24][25][26]</sup>

Parameter	Age of the universe (Gy)	Hubble's constant ( $\text{km}/\text{Mpc}\cdot\text{s}$ )	Physical baryon density	Physical cold dark matter density	Dark energy density	Density fluctuations at $8h^{-1}$ Mpc	Scalar spectral index	Reionization optical depth
Symbol	$t_0$	$H_0$	$\Omega_b h^2$	$\Omega_c h^2$	$\Omega_\Lambda$	$\sigma_8$	$n_s$	$\tau$
Planck Best fit	13.819	67.11	0.022068	0.12029	0.6825	0.8344	0.9624	0.0925
Planck 68% limits	$13.813 \pm 0.058$	$67.4 \pm 1.4$	$0.022\ 07 \pm 0.000\ 33$	$0.1196 \pm 0.0031$	$0.686 \pm 0.020$	$0.834 \pm 0.027$	$0.9616 \pm 0.0094$	$0.097 \pm 0.038$
Planck+lensing Best fit	13.784	68.14	0.022242	0.11805	0.6964	0.8285	0.9675	0.0949
Planck+lensing 68% limits	$13.796 \pm 0.058$	$67.9 \pm 1.5$	$0.022\ 17 \pm 0.000\ 33$	$0.1186 \pm 0.0031$	$0.693 \pm 0.019$	$0.823 \pm 0.018$	$0.9635 \pm 0.0094$	$0.089 \pm 0.032$
Planck+WP Best fit	13.8242	67.04	0.022032	0.12038	0.6817	0.8347	0.9619	0.0925
Planck+WP 68% limits	$13.817 \pm 0.048$	$67.3 \pm 1.2$	$0.022\ 05 \pm 0.000\ 28$	$0.1199 \pm 0.0027$	$0.685^{+0.018}_{-0.016}$	$0.829 \pm 0.012$	$0.9603 \pm 0.0073$	$0.089^{+0.012}_{-0.014}$
Planck+WP +HighL Best fit	13.8170	67.15	0.022069	0.12025	0.6830	0.8322	0.9582	0.0927
Planck+WP +HighL 68% limits	$13.813 \pm 0.047$	$67.3 \pm 1.2$	$0.022\ 07 \pm 0.000\ 27$	$0.1198 \pm 0.0026$	$0.685^{+0.017}_{-0.016}$	$0.828 \pm 0.012$	$0.9585 \pm 0.0070$	$0.091^{+0.013}_{-0.014}$
Planck+lensing +WP+highL Best fit	13.7914	67.94	0.022199	0.11847	0.6939	0.8271	0.9624	0.0943
Planck+lensing +WP+highL 68% limits	$13.794 \pm 0.044$	$67.9 \pm 1.0$	$0.022\ 18 \pm 0.000\ 26$	$0.1186 \pm 0.0022$	$0.693 \pm 0.013$	$0.8233 \pm 0.0097$	$0.9614 \pm 0.0063$	$0.090^{+0.013}_{-0.014}$
Planck+WP +highL+BAO Best fit	13.7965	67.77	0.022161	0.11889	0.6914	0.8288	0.9611	0.0952
Planck+WP								

Quelle: wikipedia

Heute ist  $\Lambda$ CDM das Standard-Modell des expandierenden Universums.

# 3 K – Strahlung

---

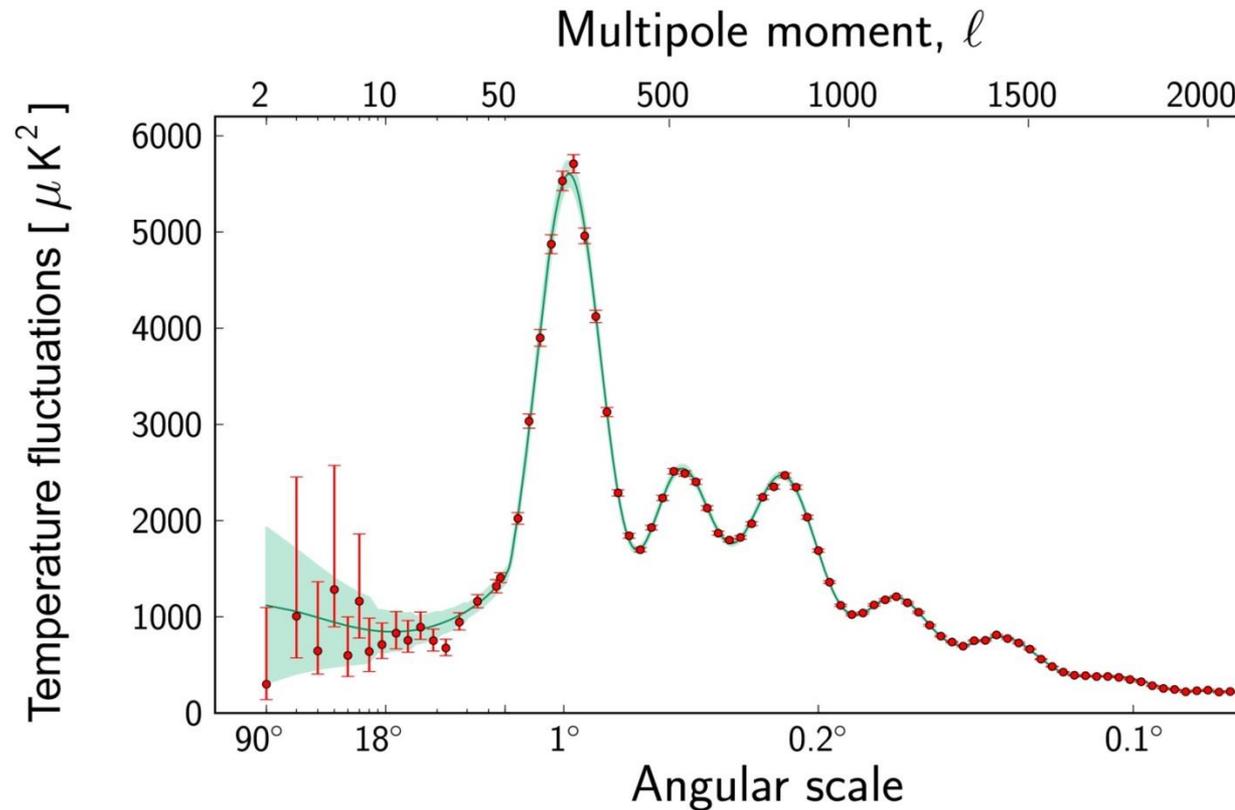
## Offene Fragen

- (1) einige der niedrigsten Momente in der Winkelverteilung der Temperatur sind niedriger als vorhergesagt
- (2) die gemessenen Extremwerte der Hintergrundstrahlung verlaufen fast senkrecht zur Ekliptik des Sonnensystems, wobei die Abweichung von der Senkrechten sich im Rahmen der Messungengenauigkeiten bewegt.
- (3) es gibt eine deutliche Nord-Süd-Asymmetrie mit einem Maximum im Norden. Dies ist überraschend, denn eigentlich sollte die kosmische Hintergrundstrahlung unabhängig von einer Galaxie sein, die ja keine bevorzugte Stellung im Kosmos einnimmt
- (4) Natur eines Cool spots

# 3 K – Strahlung

## Offene Fragen

- (1) einige der niedrigsten Momente in der Winkelverteilung der Temperatur sind niedriger als vorhergesagt



# 3 K – Strahlung

---

## Offene Fragen

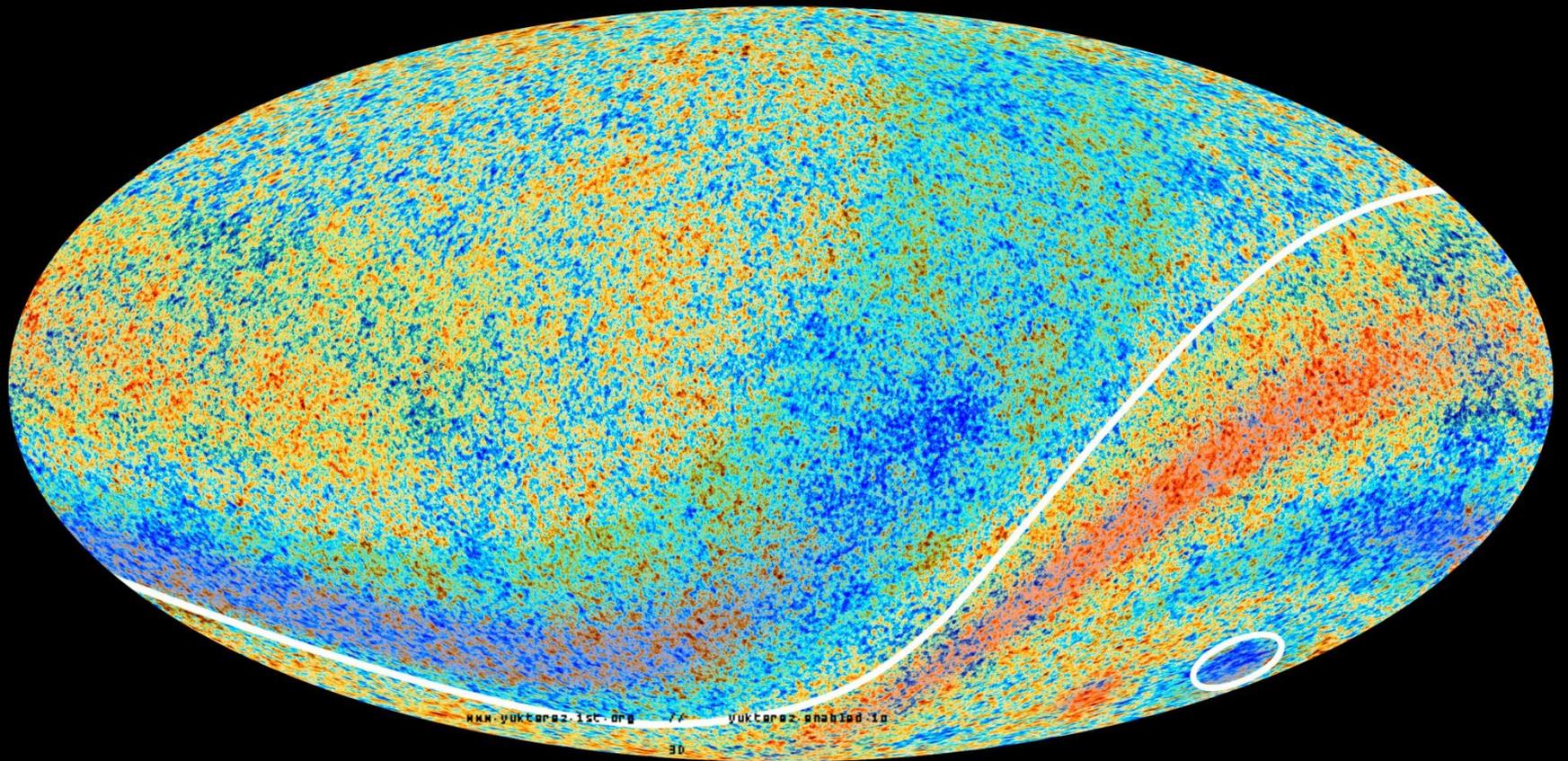
- (1) Einige der niedrigsten Momente in der Winkelverteilung der Temperatur sind niedriger als vorhergesagt.
- (2) Die gemessenen Extremwerte der Hintergrundstrahlung verlaufen **fast senkrecht zur Ekliptik des Sonnensystems**, wobei die Abweichung von der Senkrechten sich im Rahmen der Messungsgenauigkeiten bewegt.
- (3) deutliche Nord-Süd-Asymmetrie mit einem Maximum im Norden: Dies ist überraschend, denn eigentlich sollte die kosmische Hintergrundstrahlung unabhängig von einer Galaxie sein, die ja keine bevorzugte Stellung im Kosmos einnimmt.
- (4) Natur eines Cool spots

# 3 K – Strahlung

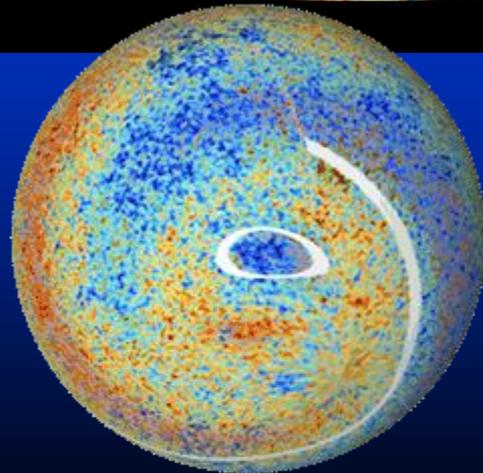
---

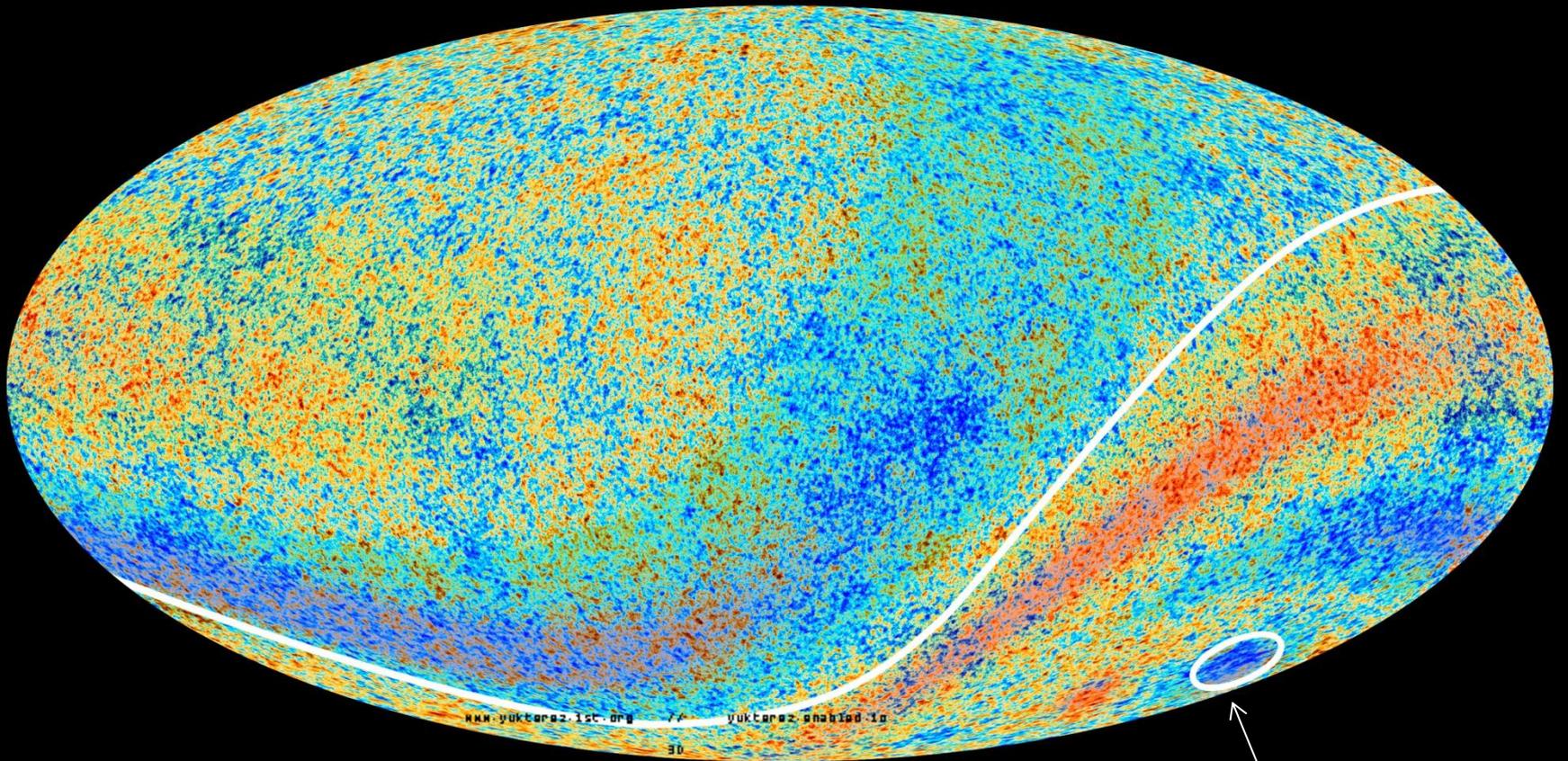
## Offene Fragen

- (1) einige der niedrigsten Momente in der Winkelverteilung der Temperatur sind niedriger als vorhergesagt
- (2) die gemessenen Extremwerte der Hintergrundstrahlung verlaufen fast senkrecht zur Ekliptik des Sonnensystems, wobei die Abweichung von der Senkrechten sich im Rahmen der Messungsgenauigkeiten bewegt.
- (3) **deutliche Nord-Süd-Asymmetrie mit einem Maximum im Norden**: Dies ist überraschend, denn eigentlich sollte die kosmische Hintergrundstrahlung unabhängig von einer Galaxie sein, die ja keine bevorzugte Stellung im Kosmos einnimmt
- (4) Natur eines Cool spots

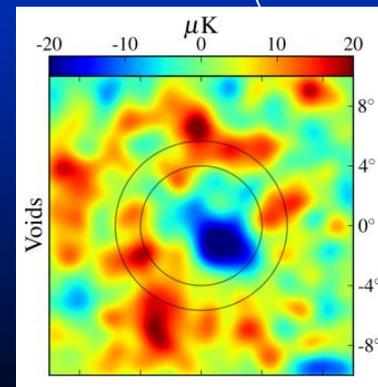
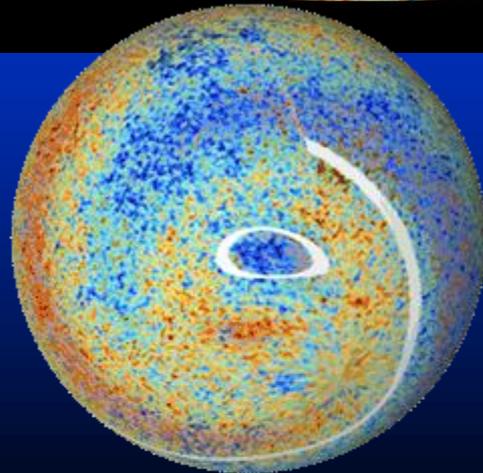


Nord-Süd-Asymmetrie





(4) Natur eines Cool spots

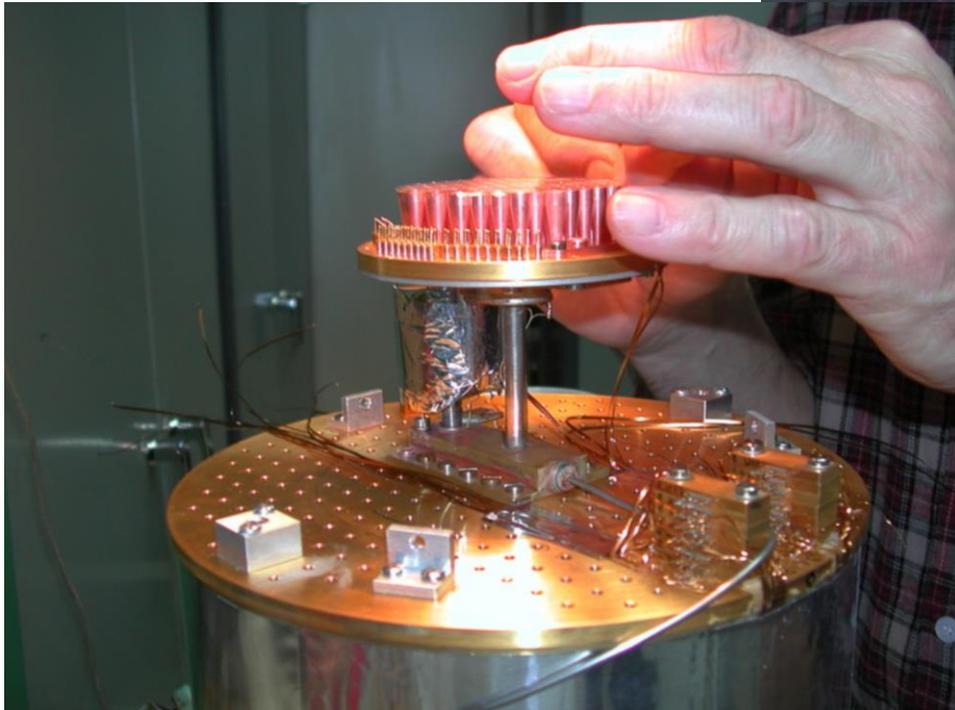
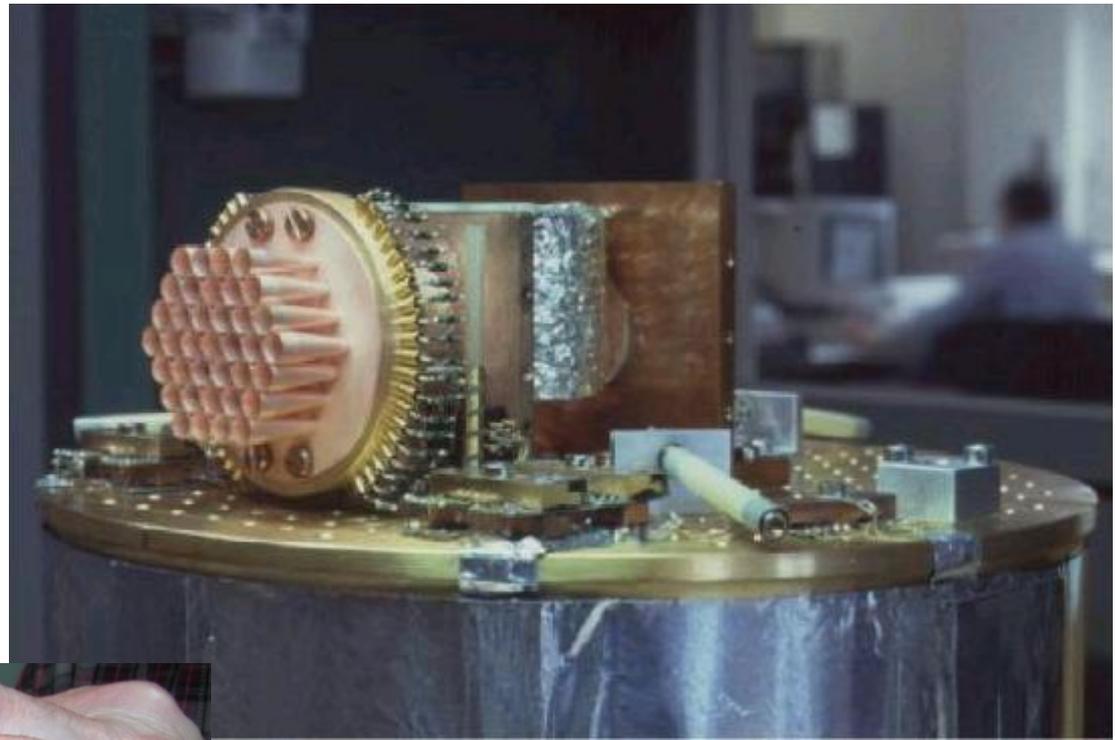




**T4**

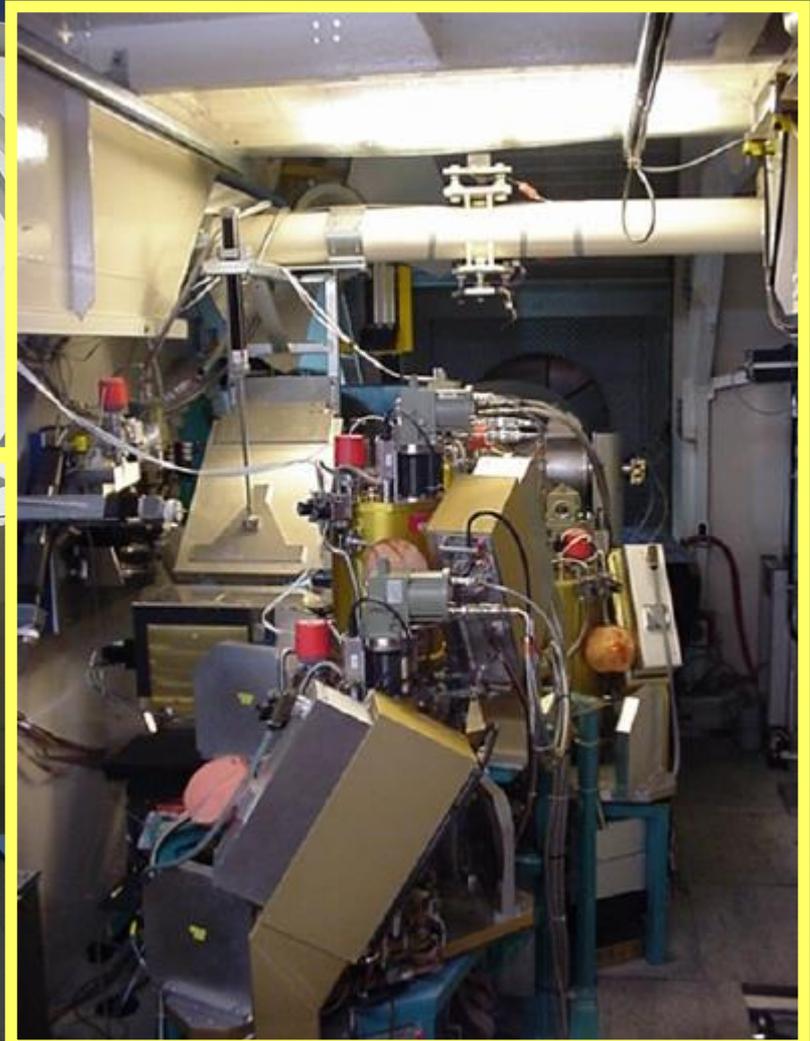
MAMBO-2 @ IRAM 30m  
Telescope, Spain  
(Max-Planck-Millimeter-  
Bolometer)  
2003: 117 „Pixel“

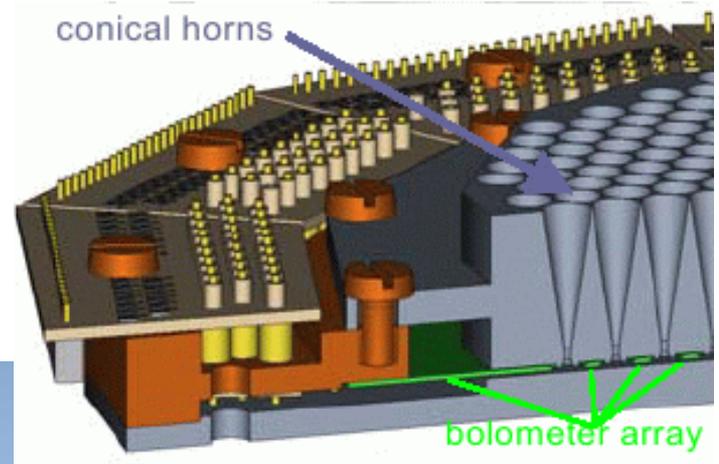
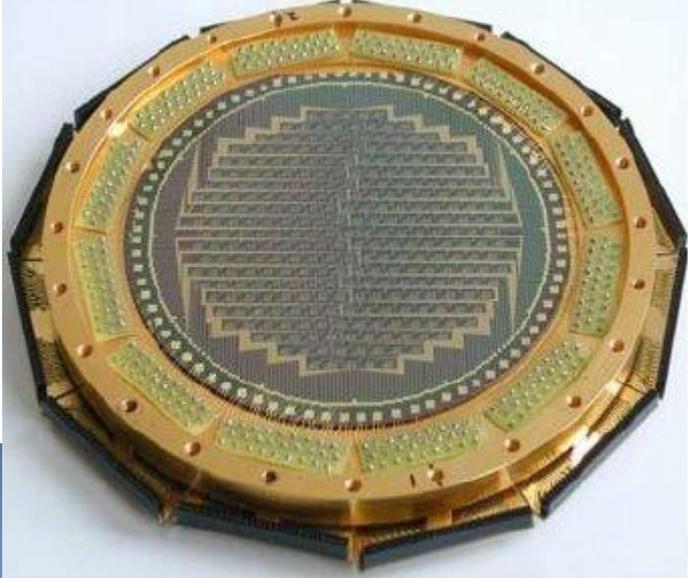
Bolometer-Detektor besteht aus  
einer millimeter-großen Folie, in der  
die einfallende Strahlung absorbiert  
wird.





## Blick in die Empfängerkabine

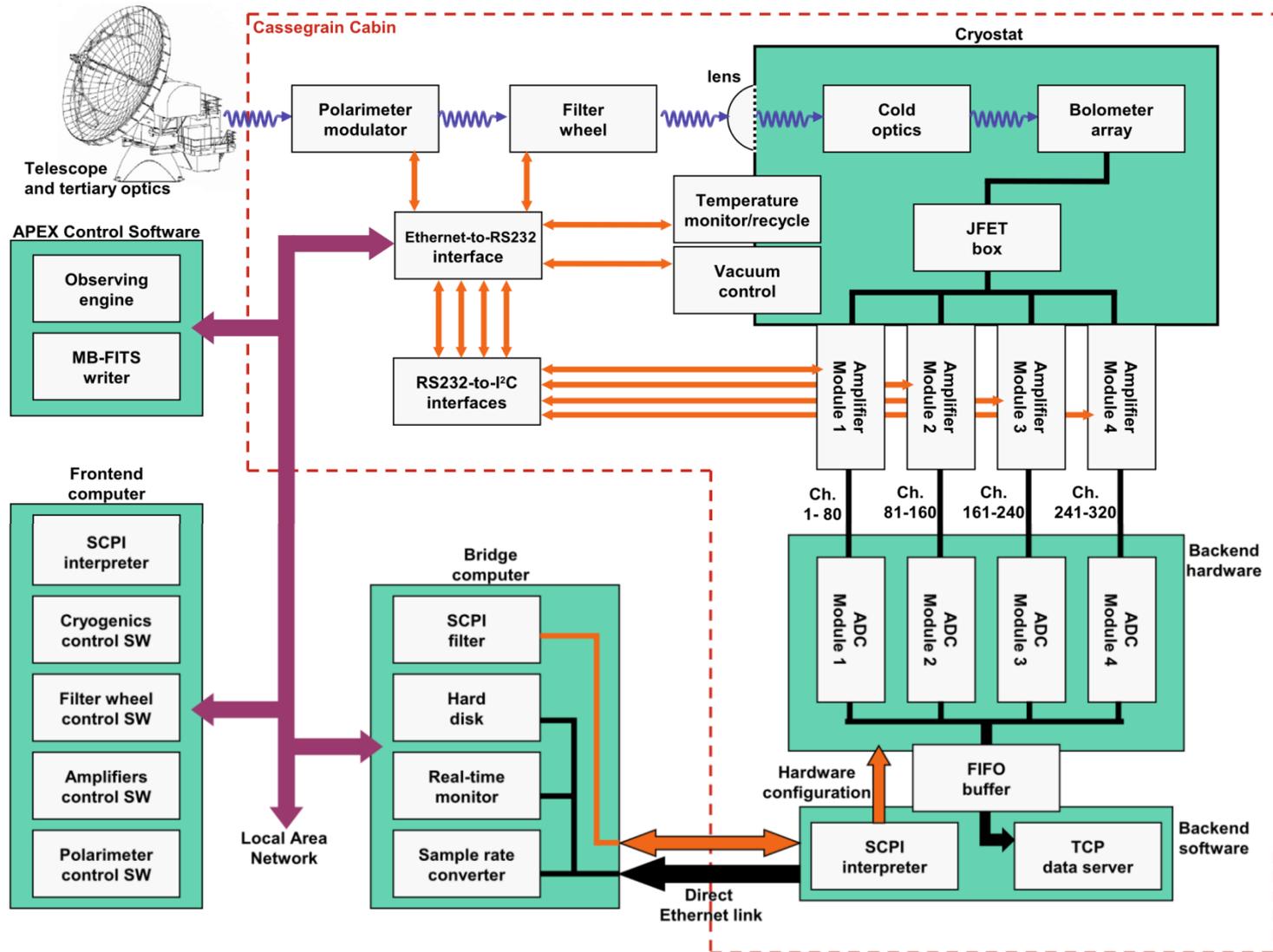


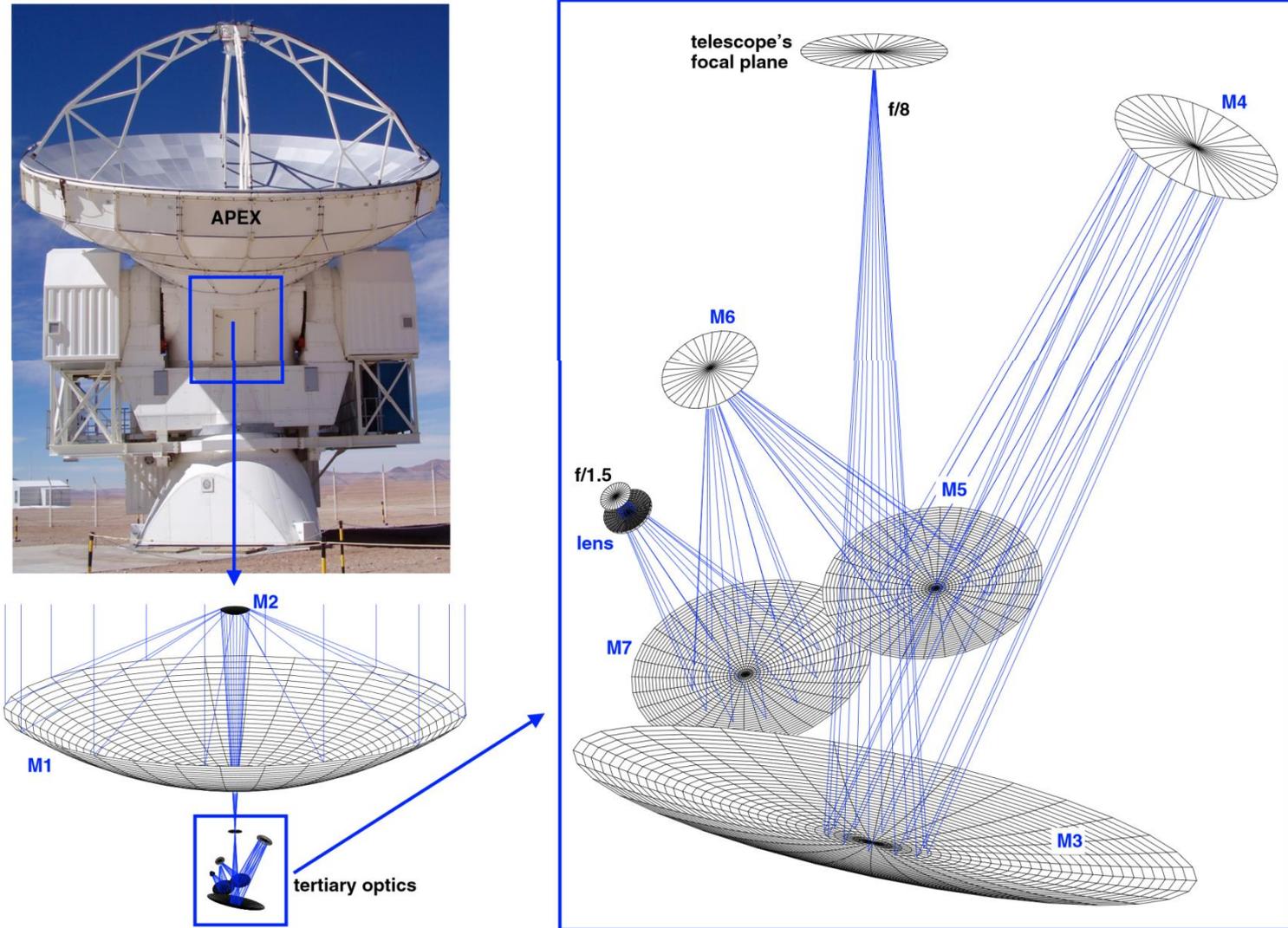


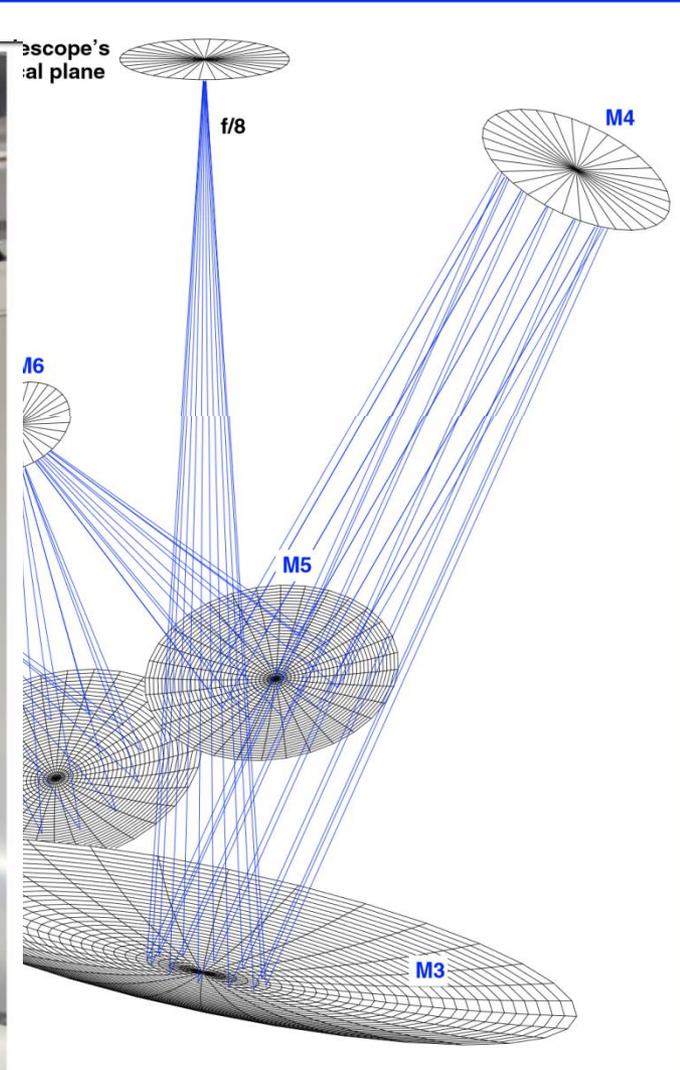
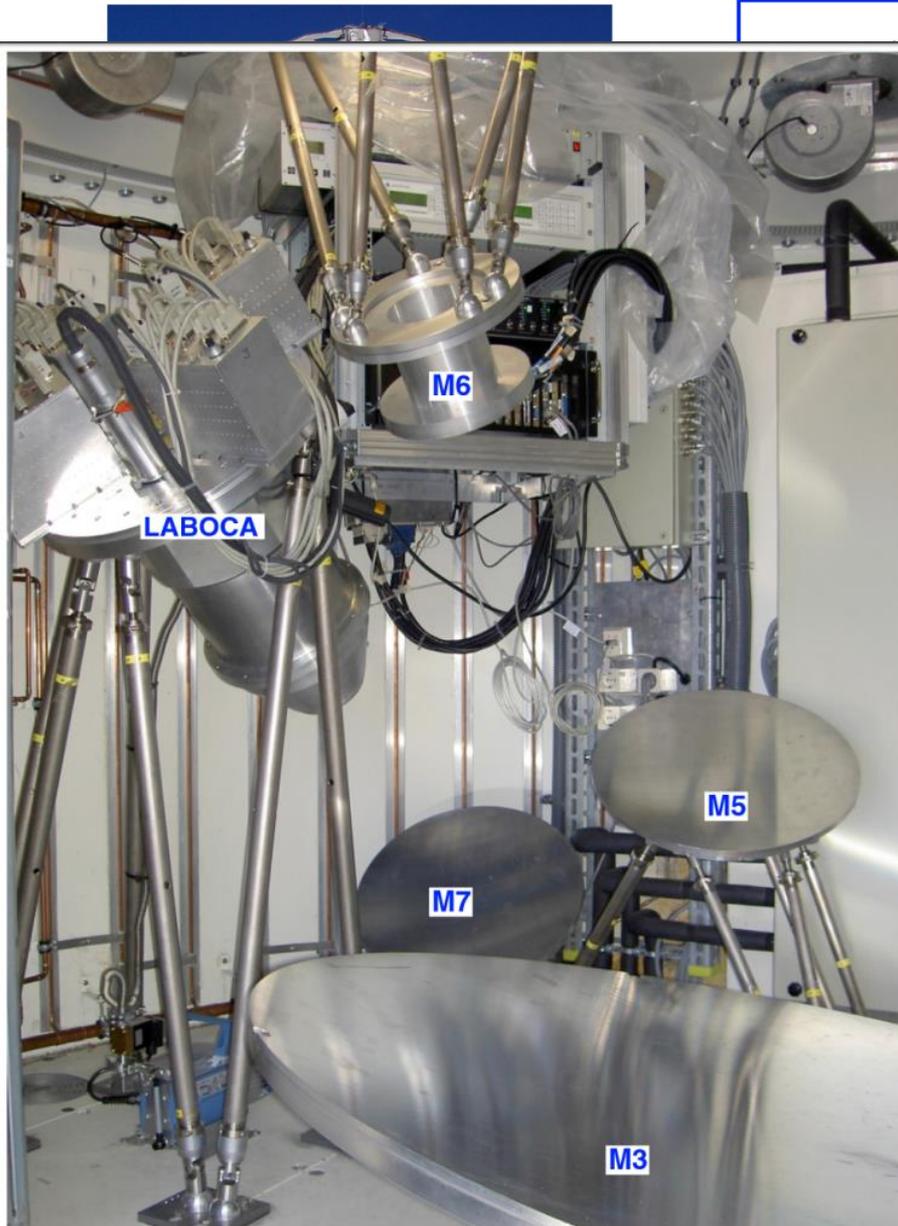
## LABOCA

The **L**arge **B**olometer **C**amera for APEX: 295 pixels at 870 micron wavelength, Atacama-Wüste , Chile

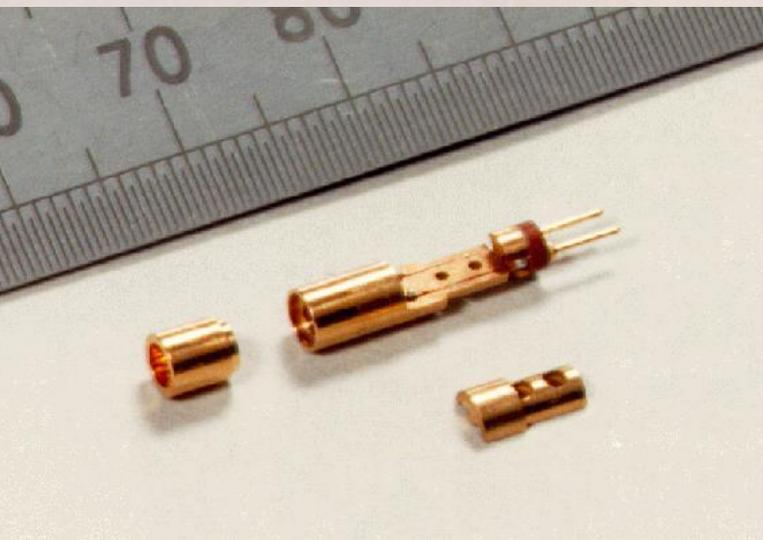
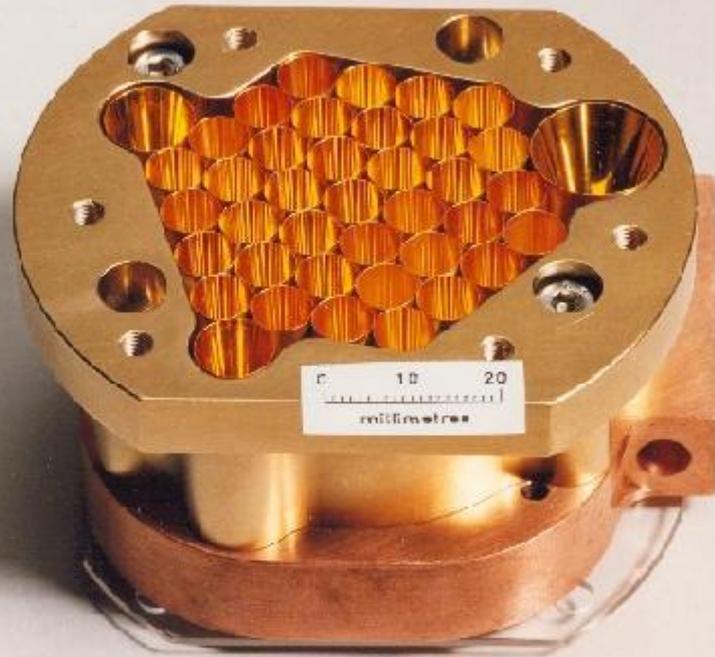




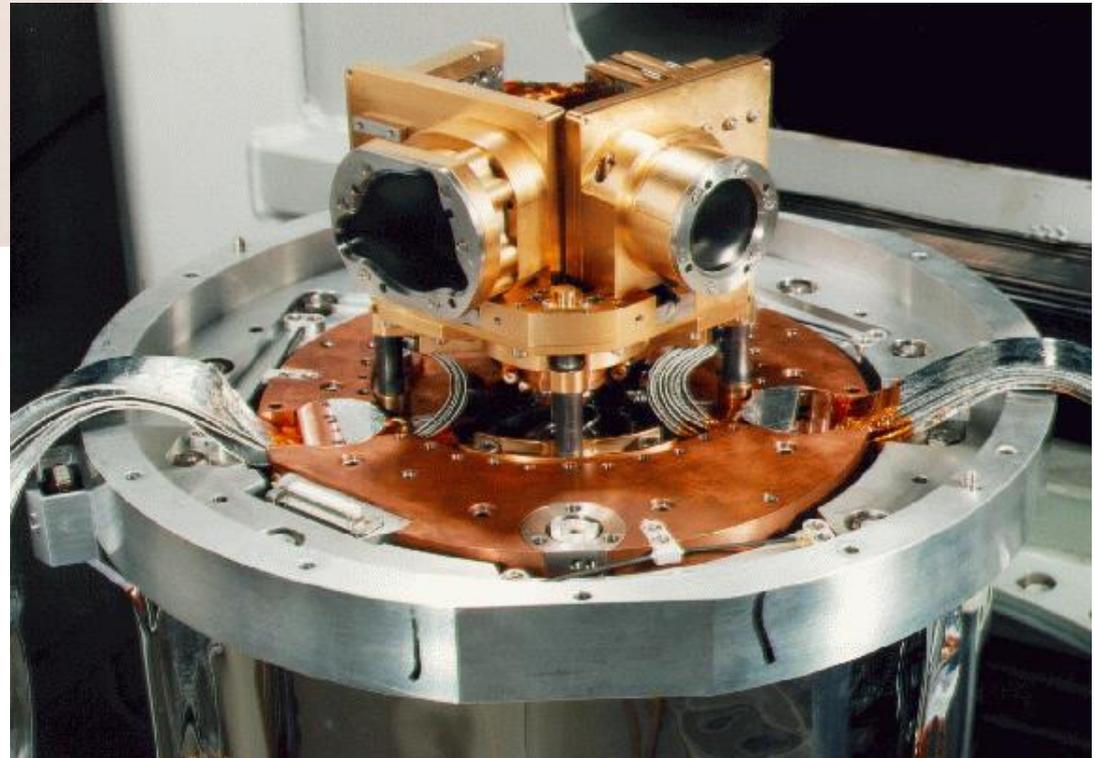
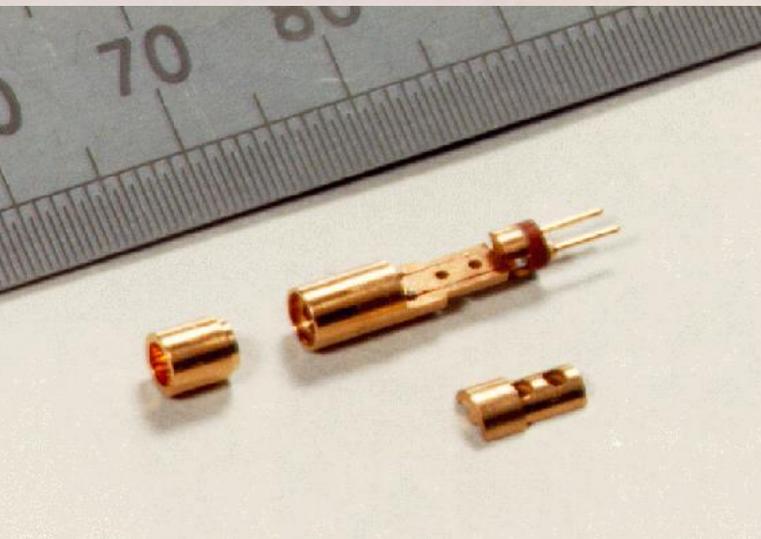
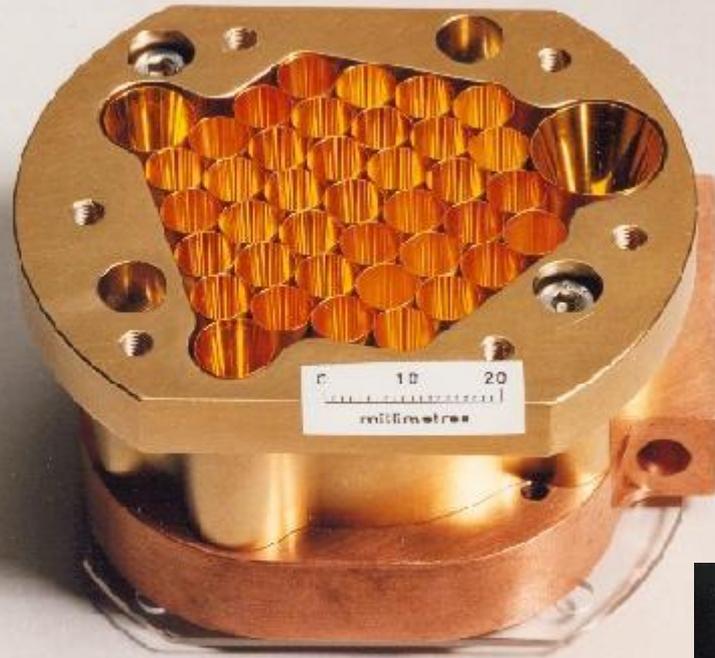


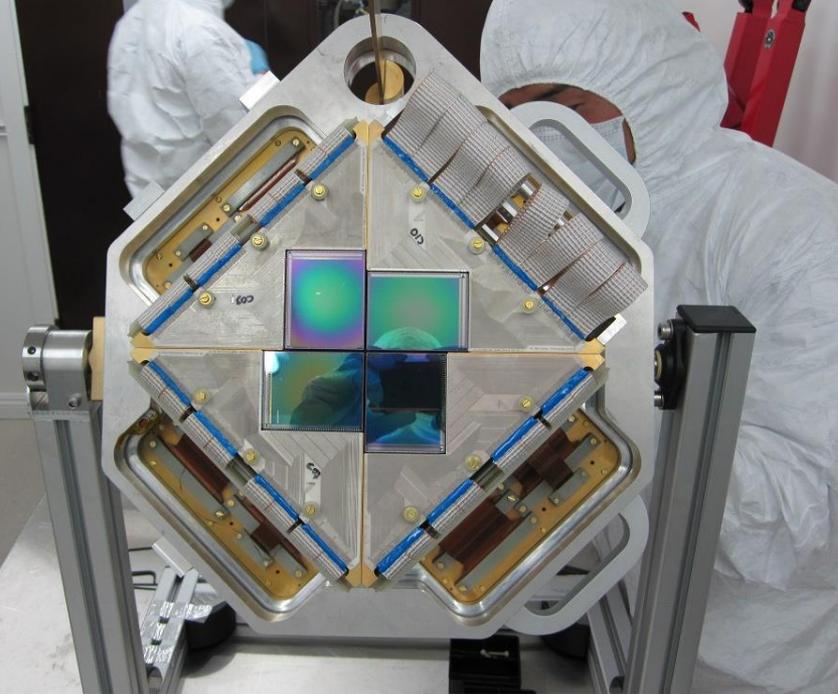


**SCUBA**  
**(submm common user bolometer array)**  
**am**  
James Clerk Maxwell Telescope (*JCMT*)  
Hawaii



**SCUBA**  
(submm common user bolometer array)  
am  
James Clerk Maxwell Telescope (*JCMT*)





## SCUBA-2

**450 and 850 focal plane units installed  
(submm common user bolometer array)**

**am**

James Clerk Maxwell Telescope (*JCMT*)

The heart of SCUBA2 is the Transition Edge Sensor (TES) arrays = four 32x40 detector arrays at each of 850 and 450 micron, in total 10240 detectors

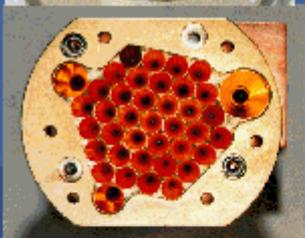
In order to decrease the number of wires from the cold focal plane unit the readout is time multiplexed using SQUID devices. The arrays are used bare i.e. without any field of view defining horns. This necessitates a very careful optical design to control stray light but makes it possible to space the detectors closer.



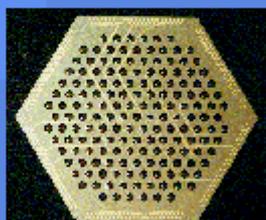
# Future Bolometer Arrays in the Submillimetre

Timeline: 1999

**JCMT-SCUBA**  
350/450 &  
750/850  $\mu\text{m}$



2001



**CSO-BOLOCAM**  
1.4mm

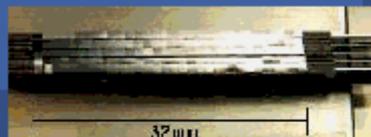


**SIRTf-MIPS**  
160  $\mu\text{m}$

2003

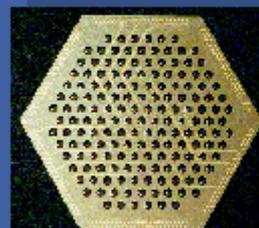


**SOFIA-HAWC**  
200  $\mu\text{m}$

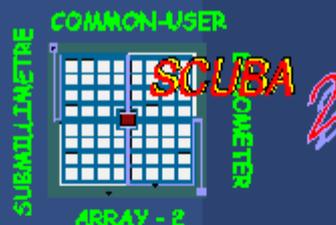


**CSO-SHARC-II**  
350/450

2004

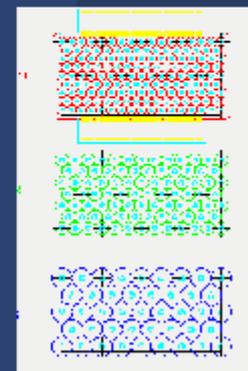


**LMT-BOLOCAM**  
1.1mm



**JCMT-SCUBA2**  
450/850  $\mu\text{m}$

2007+



**FIRST-SPIRE**  
250, 350,  
450  $\mu\text{m}$

SCUBA+  
(JCMT)

91/37 pixels  
300/65 mJy

Bolocam  
(CSO)

144  
40

MIPS  
(SIRTf)

40  
160

HAWC  
(SOFIA)

384  
560

SHARC-II  
(CSO)

384  
600

Bolocam  
(LMT)

151  
3

SCUBA-2  
(JCMT)

22500/6500  
100/20

SPIRE  
(FIRST)

32/72/128  
~40

**B4**

# B4: Das Planck Teleskop

---

## Arbeitsaufgabe:

- Ziel: genaueste Vermessung der Temperaturfluktuationen der Hintergrundstrahlung im Bereich von einem Millionstel Grad
- Projekt: 1996 begründet, Zusammenarbeit von 40 europäischen und 10 amerikanischen Instituten mit der ESA.
- ursprünglich unter dem Namen COBRAS/SAMBA evaluiert und später zu Ehren Max Plancks umbenannt
- Absorption der Atmosphäre  $\Rightarrow$  Teleskop muss in einen Satelliten

# B4: Das Planck Teleskop

## Technische Daten

Höhe: 4,2 m

Durchmesser: max. 4,2 m

Startmasse: 1,921 t

Hauptspiegeldurchmesser: 1,75 m

Teleskopmasse: 28 kg

Kühlflüssigkeit: 1500 l Helium

Einsatzdauer: 21 Monate (geplant),  
29 Monate erreicht (HFI),

Teilbetrieb während weiterer 7 Monate

Bahn: Lissajous-Bahn:

0,28 Mio. km x 0,28 Mio. km

um L2 Erde-Sonne,

(jetzt Sonnenumlaufbahn)

Gesamtkosten: 600 Mio. Euro

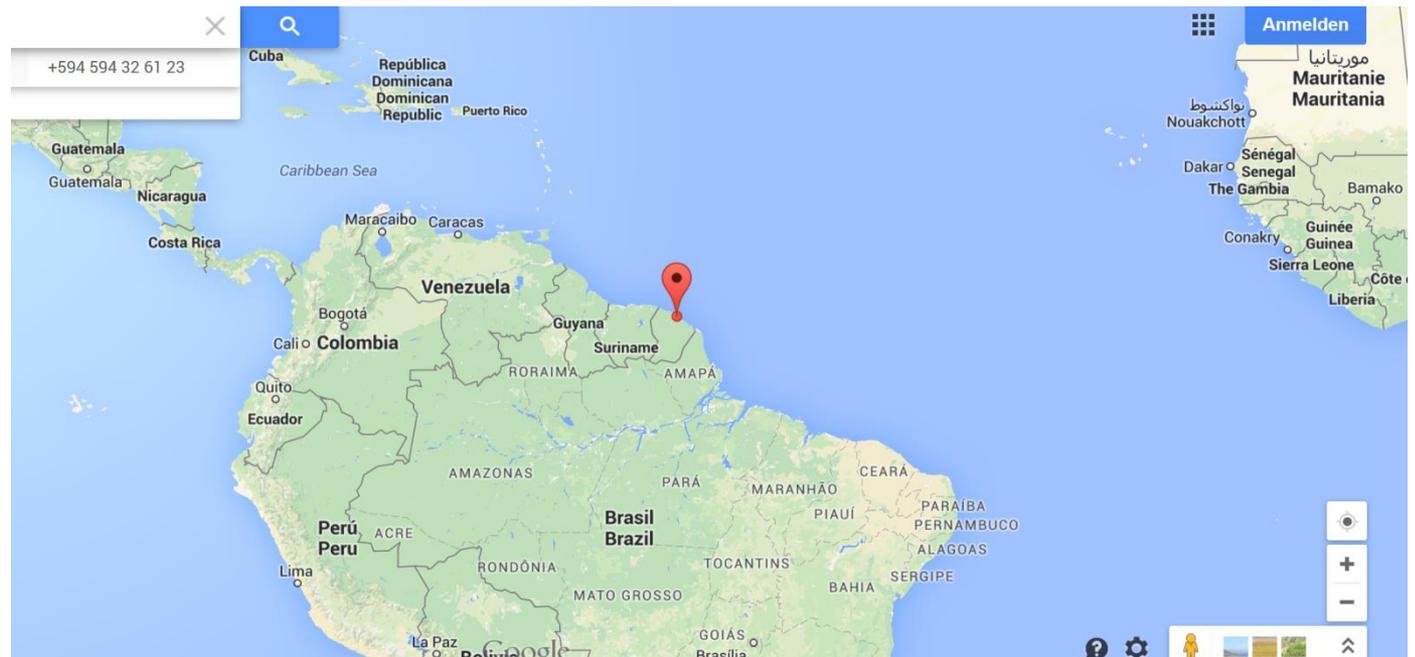


BILD: Hier war PLANCK noch im warmen, irdischen Labor am 26.02.09. Unter der glänzenden Abdeckung sind die hochempfindlichen Messinstrumente  
(Credit: ESA-CNES-Arianespace / Optique Vidéo du CSG - L. Mira)

# B4: Das Planck Teleskop

Start 14. Mai 2009

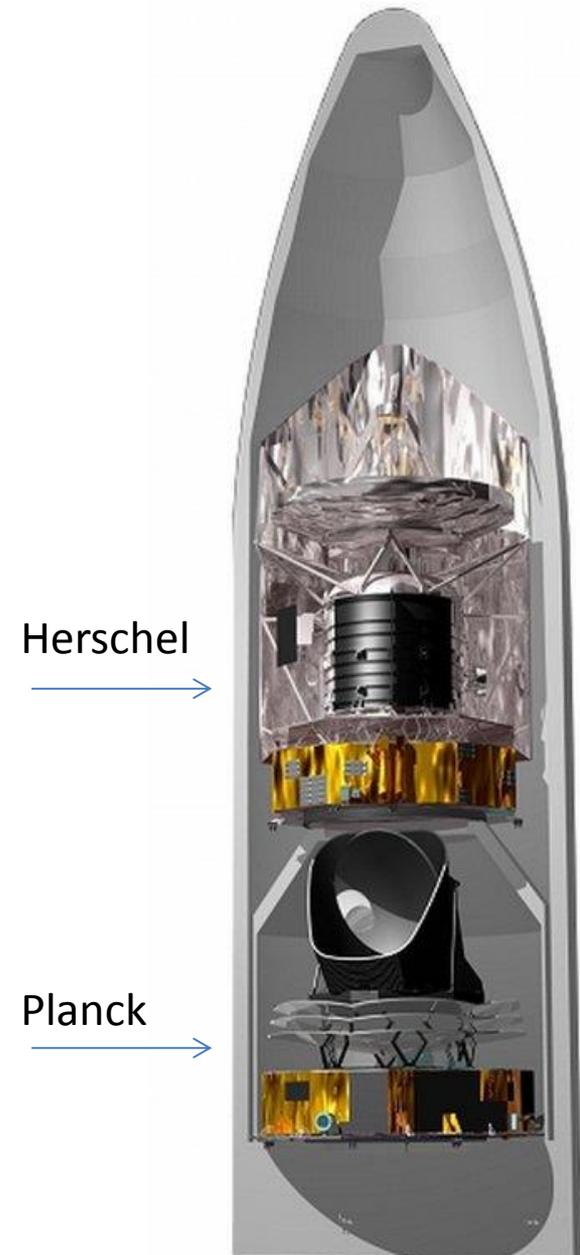
- Planck 1,921 t
- Trägerrakete Ariane 5 ECA
- Centre Spatial Guyanais bei Kourou



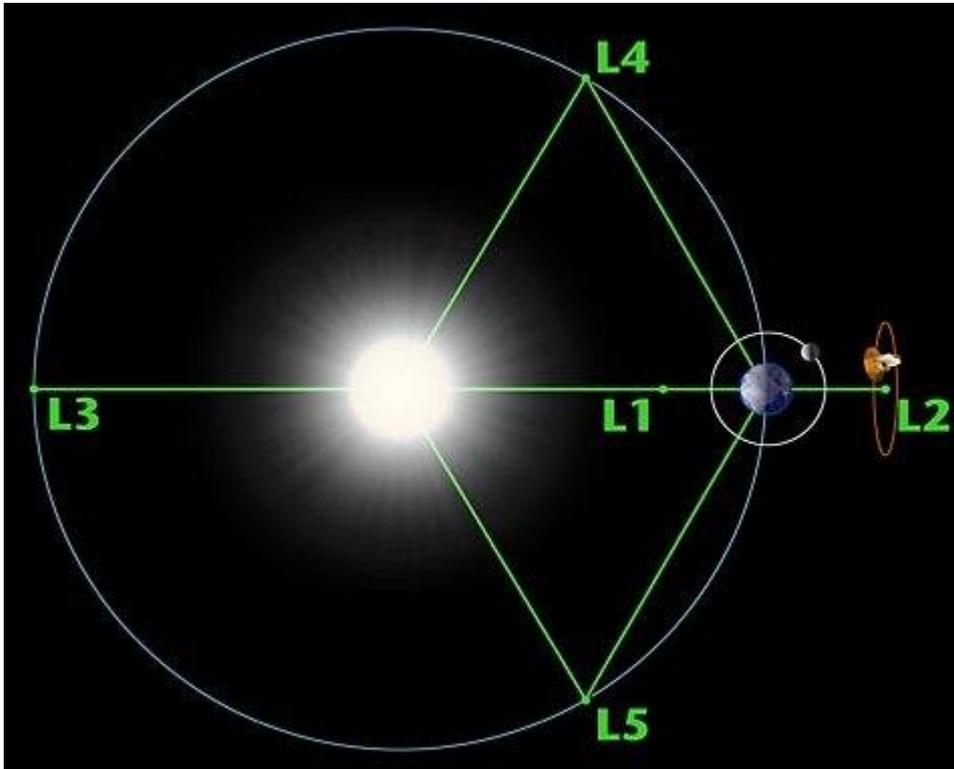
# B4: Das Planck Teleskop

Start 14. Mai 2009

- Planck 1,921 t
  - Trägerrakete Ariane 5 ECA
  - Centre Spatial Guyanais bei Kourou
  - zusammen mit Infrarotteleskop Herschel
  - Planck-Satellit wenige Minuten nach Herschel-Teleskop ausgeklinkt
  - hochelliptische Erdumlaufbahn:  
270 und 1.197.080 km Höhe,  
die 5,99° zum Äquator geneigt
- ⇒ von dieser Umlaufbahn erreichte der Satellit nach mehreren Bahnmanövern seine Lissajous-Bahn um den Lagrange Punkt  $L_2$  des Erde-Sonne-Systems



# B4: Das Planck Teleskop



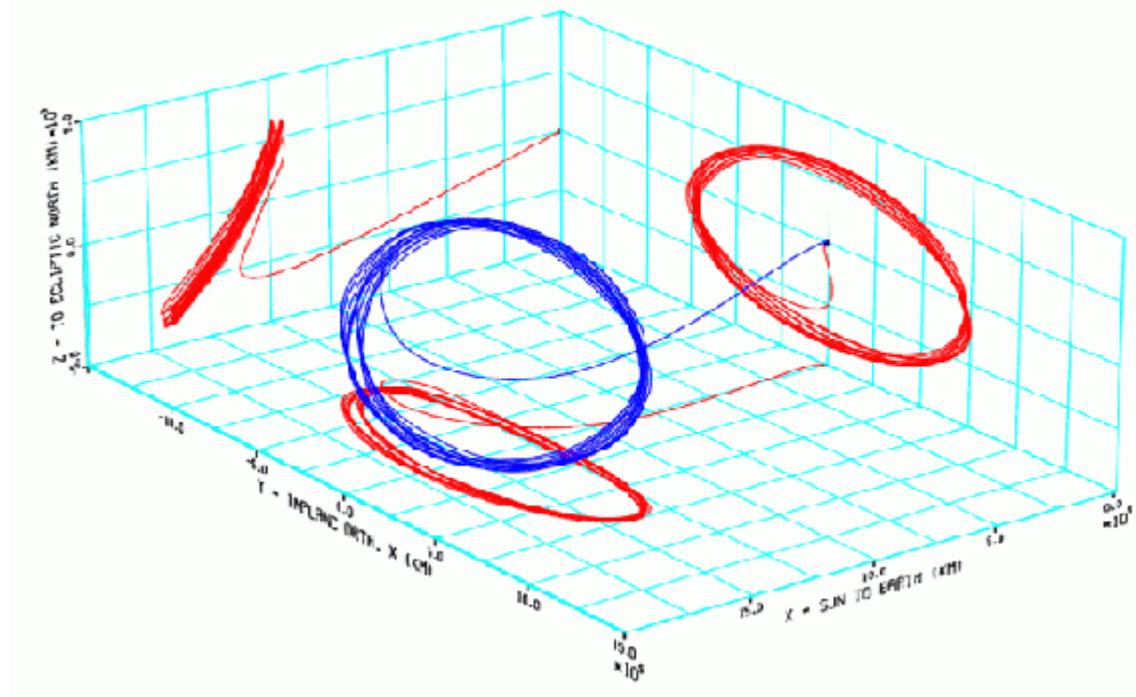
## Bahn:

Drehung mit der Erde im Lagrangepunkt  $L_2$ , 1,5 Millionen Kilometer hinter der Erde von der Sonne aus gesehen.

Herschel umkreist  $L_2$  mit einem mittleren Abstand von 800 000 km

Planck mit 400 000 km

# B4: Das Planck Teleskop



**Wahre Bahn:**  
Lissajou-Figur

**Blau: 3D**  
**Rot: Projektion in 2D**

Vorteile der Orbits: Da Sonnen abgewandt und ein Stück außerhalb der Erdbahn

- drei potentielle Störquellen minimiert: Sonne, Mond und die Erde
- noch so nah an der Erde, Daten per Funk zur Erde

Nachteil:

- da Lagrangepunkte metastabil  $\Rightarrow$  Stabilität nur begrenzte Zeit  
Planung: nach 4 Jahren Treibstoff erschöpft, Beginn langsames Abdriften  
(Lagrangepunkte sind selbstreinigend vom Weltraummüll)

# B4: Das Planck Teleskop

BILD: Der PLANCK-Satellit mit Strahlengang auf Primär- und Sekundärspiegel (Credit: ESA)

Zwei Instrumente:

„High Frequency Instrument“ (HFI)

„Low Frequency Instrument“ (LFI)

Teleskop : Kohlenfaserstruktur

Unterhalb: drei Aluminiumsandwichschilde und aus Glasfaserstützen bestehende Kryostruktur zur Optimierung der Wärmeabstrahlung + Schutz des Teleskops warmen Satellitenkörper.

⇒ Passiv:  $T = 45 \text{ K}$  erreichbar

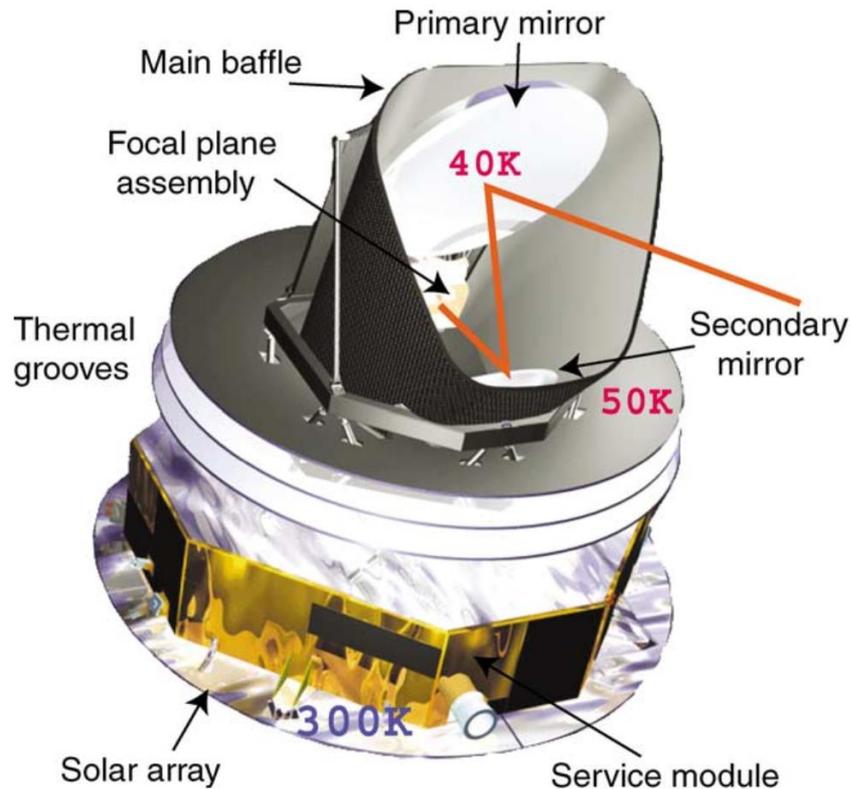
LFI: Kühlung mit Sorptionskühler in geschlossenem Wasserstoff-Kreislauf auf  $20 \text{ K}$

HFI: zusätzlich geschlossener Helium-Kreislauf auf  $4 \text{ K}$

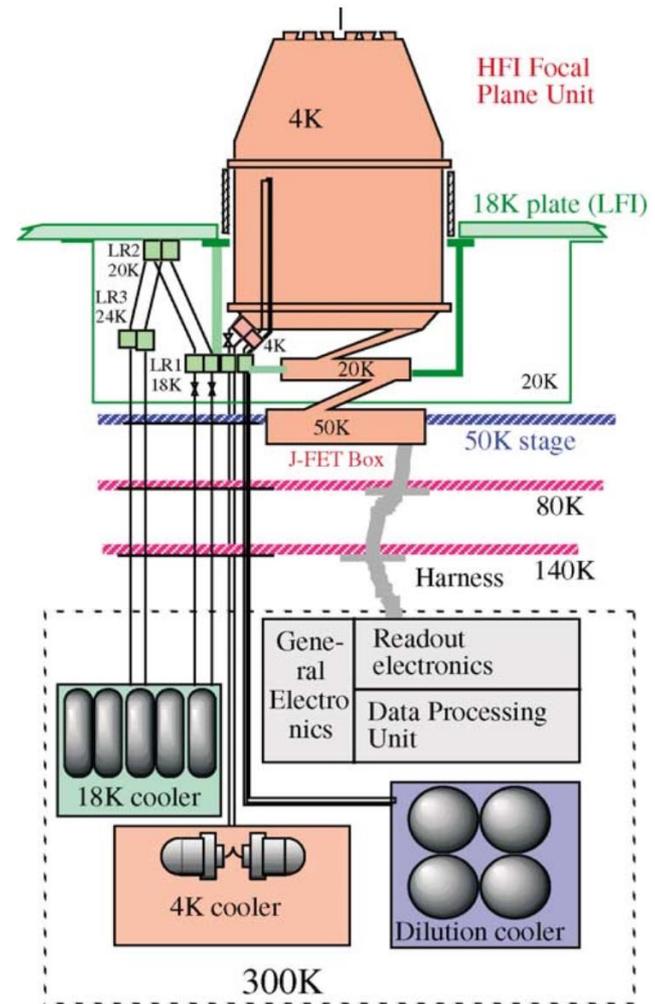
Detektoren des HFI: Kühlung auf  $0.1 \text{ K}$  durch Mischung von flüssigem He-4 & He-3: offener Mechanismus: d. h. das Kühlmittel geht mit der Zeit verloren.



# B4: Das Planck Teleskop



(a)



(b)

# B4: Das Planck Teleskop

---

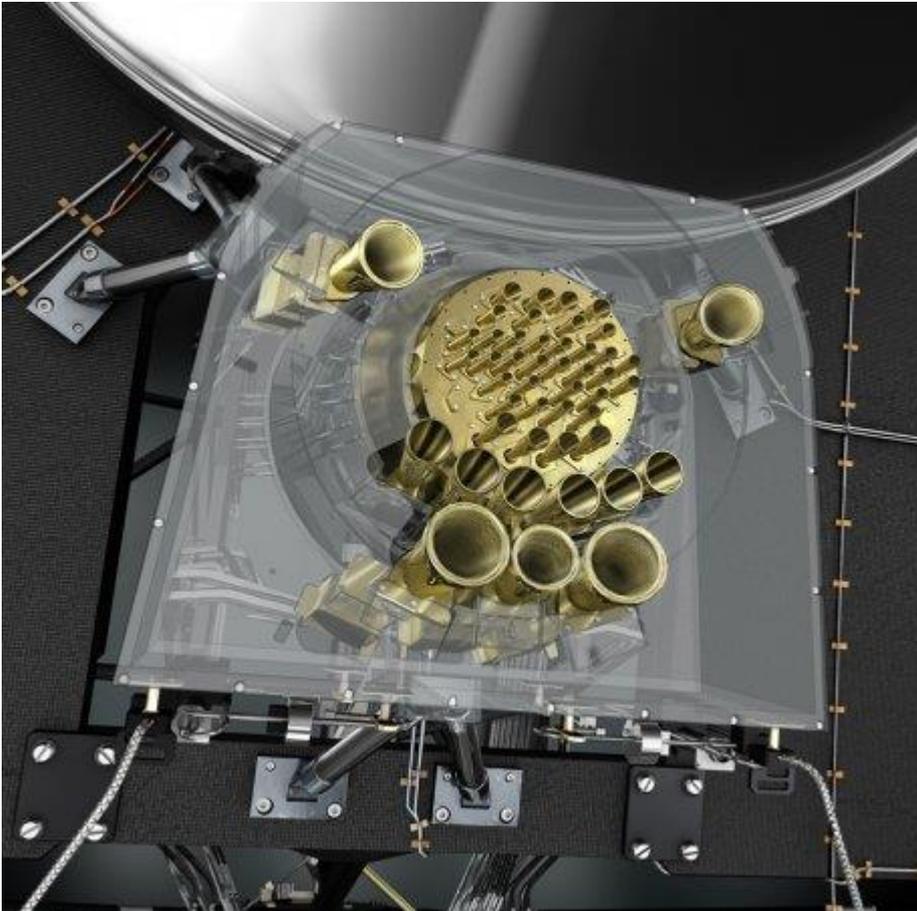
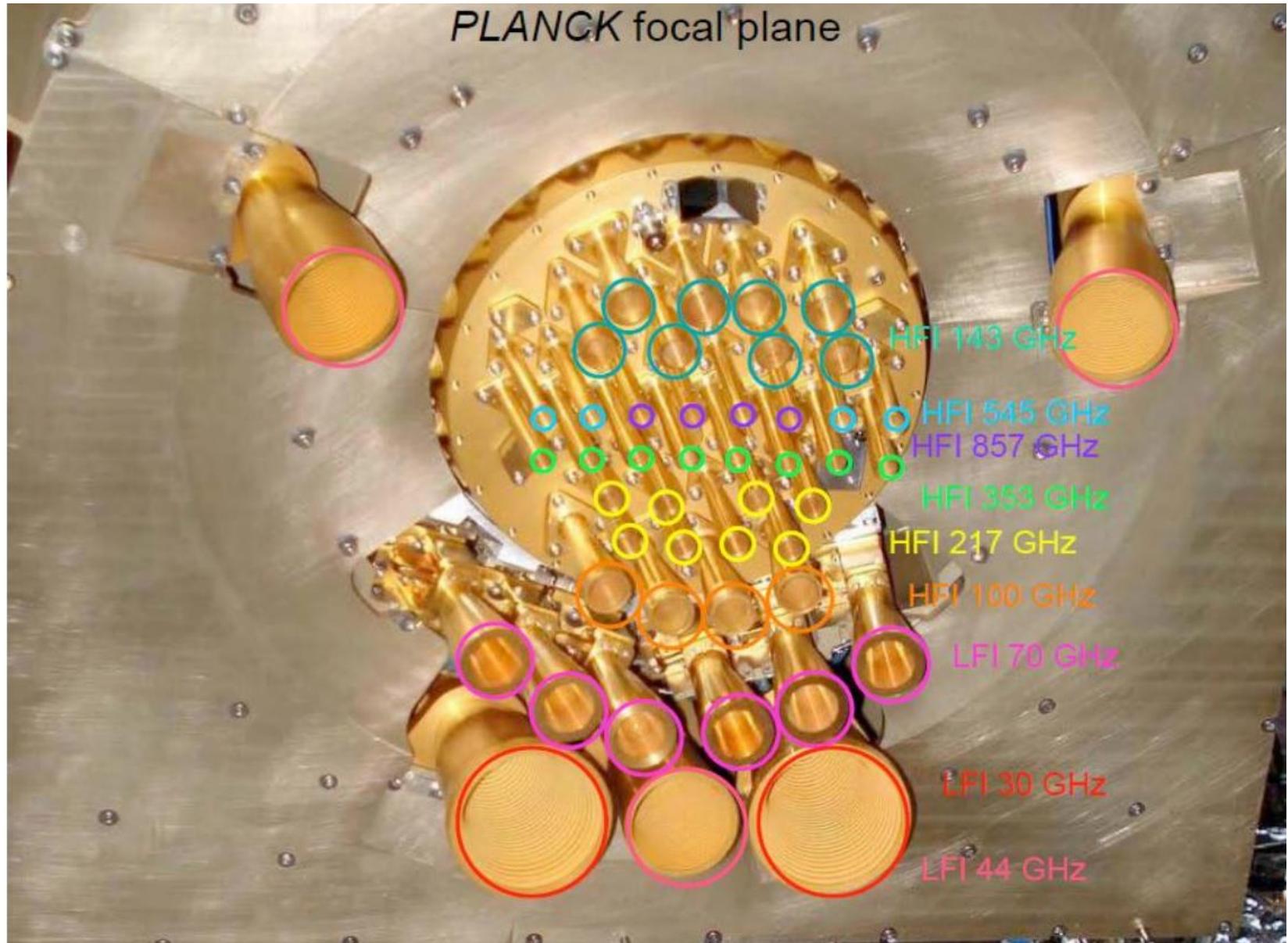


BILD: Ein durchsichtiges Modell des Horn- und Empfängersystems. Die röhrenförmigen Gebilde sind Hornantennen, die für unterschiedliche Frequenzen empfindlich sind. Die großen Hörner gehören zum LFI, die kleinen zum HFI.  
(Credit: ESA/AOES Medialab)

- High Frequency Instrument (HFI):  
100, 143, 217, 353, 545 and 857 GHz
- Low Frequency Instrument (LFI):  
30, 44, and 70 GHz

PLANCK focal plane



HFI 143 GHz

HFI 545 GHz

HFI 857 GHz

HFI 353 GHz

HFI 217 GHz

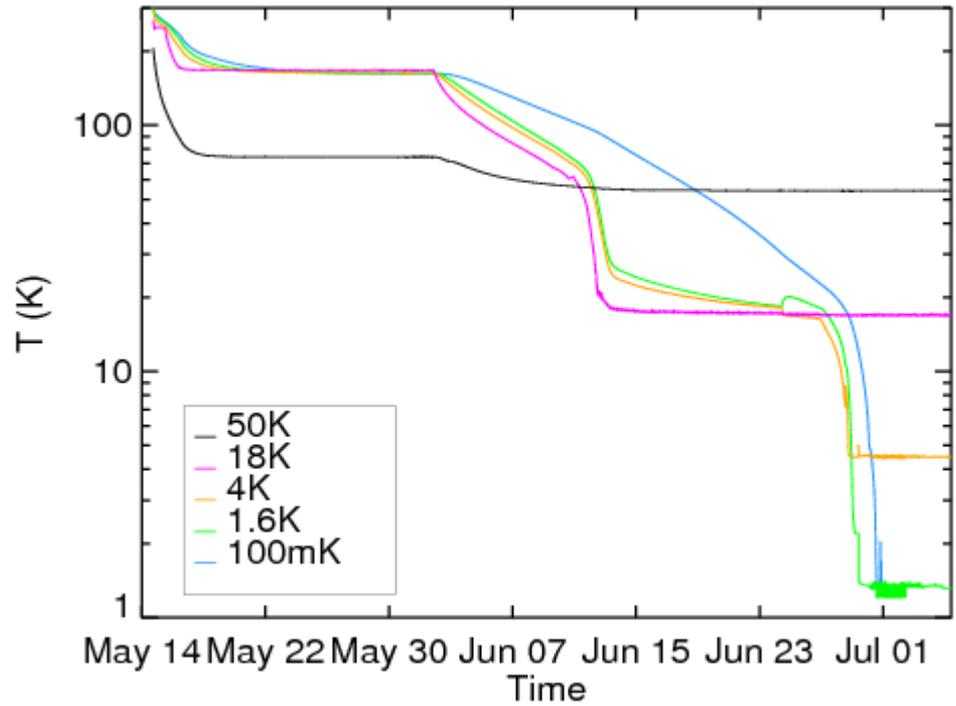
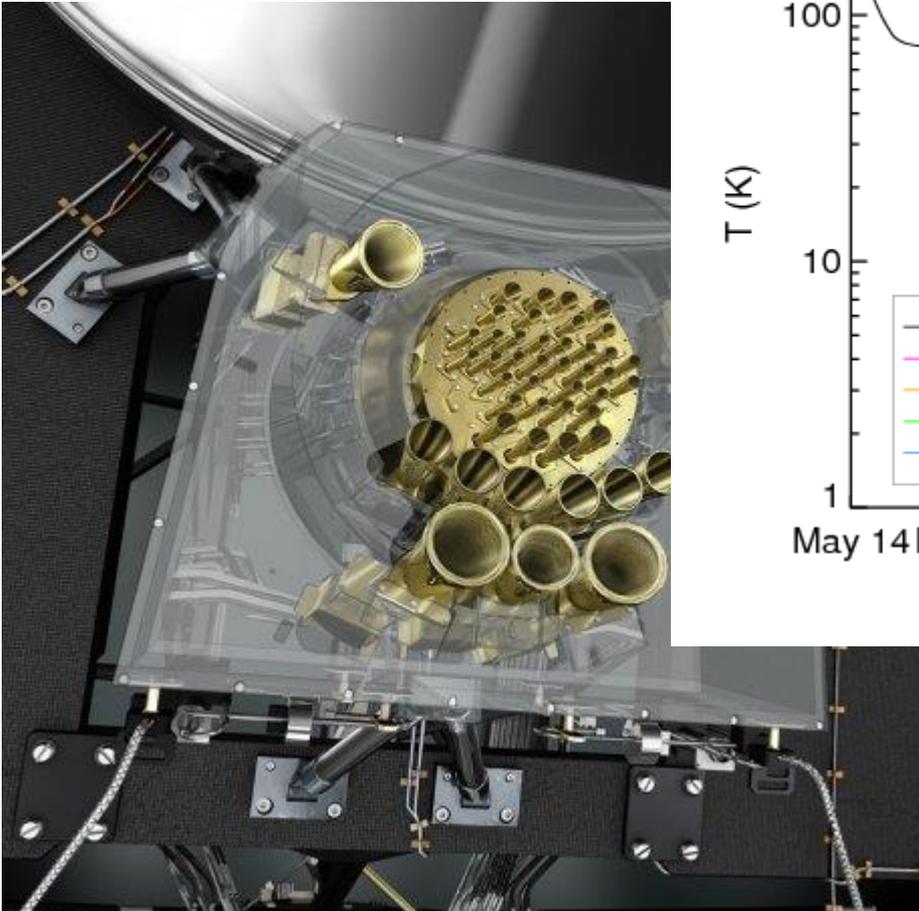
HFI 100 GHz

LFI 70 GHz

LFI 30 GHz

LFI 44 GHz

# B4: Das Planck Teleskop



Institut d'Astrophysique Spatiale

Kühlkuven  
für verschiedene  
Messpunkte

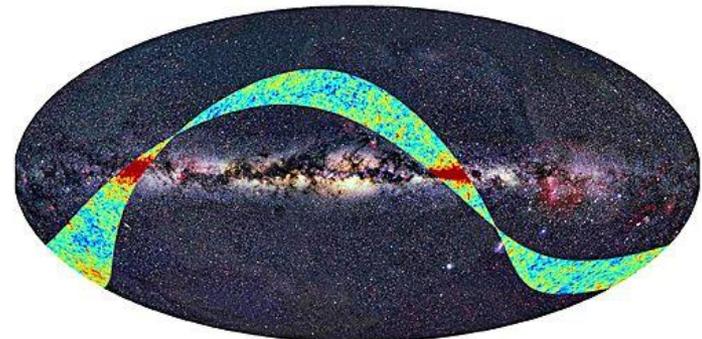
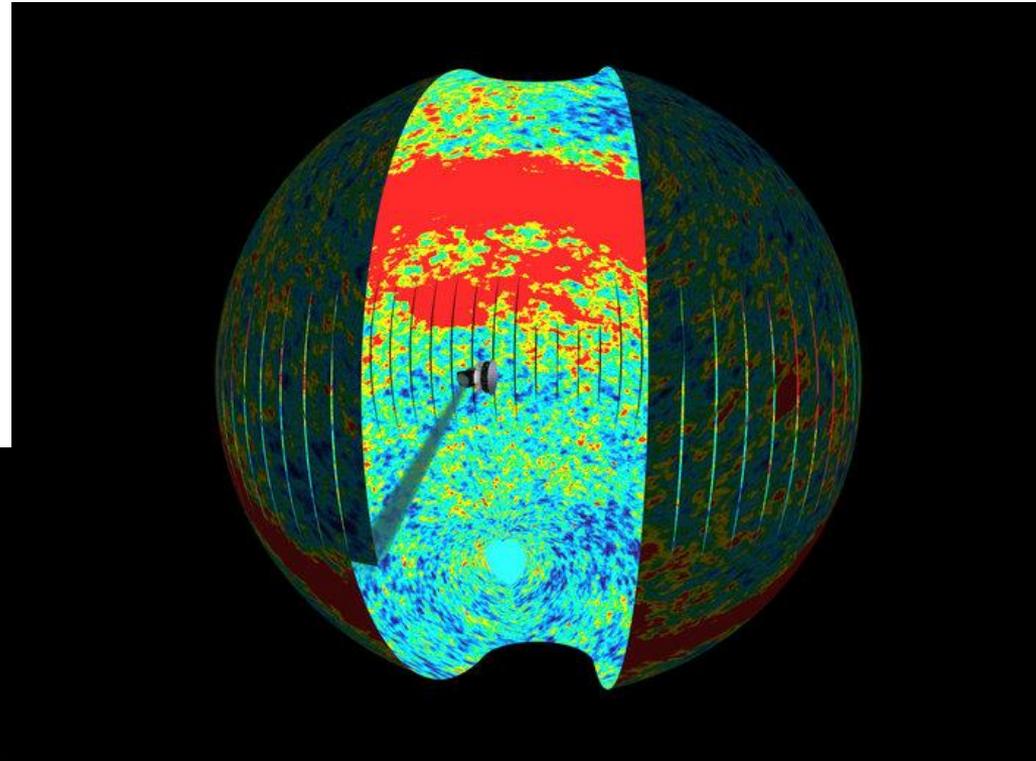
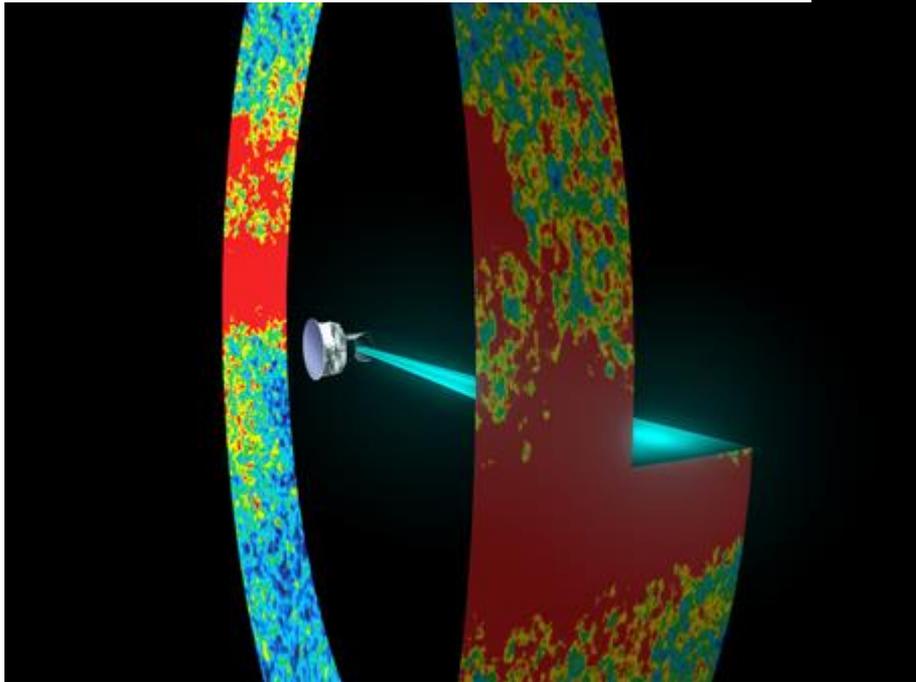
Table 1  
 Planck instrument characteristics. The sensitivities ( $1\sigma$ ) are goal values for 12 months of integration and for square pixels whose sides are given in the row ‘Angular Resolution’. Polarization measurement at 100 GHz on HFI is waiting for approval (the sensitivity level without polarization measurement at 100 GHz is given in parenthesis)

Detector technology	LFI			HFI					
	HEMT arrays			Bolometer arrays					
Center frequency [GHz]	30	44	70	100	143	217	353	545	857
Number of detectors	4	6	12	8 (4)	12	12	6	8	6
Bandwidth ( $\Delta\nu/\nu$ )	0.2	0.2	0.2	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Angular resolution (arcmin)	33	241	14	9.2	7.1	5.0	5.0	5.0	5.0
$\Delta T/T$ per pixel (Stokes I) [ $\mu K/K$ ]	2.0	2.7	4.7	2.5 (2.2)	2.4	3.8	15	17	8000
$\Delta T/T$ per pixel (Stokes Q and U) [ $\mu K/K$ ]	2.8	3.9	6.7	4.1 (NA)	4.8	7.6	30	...	...

# B4: Das Planck Teleskop

Messverfahren:

Drehung der Erde um Sonne =  
Langsamer Schwenk des Raumschiffes  
mit „starrer“ Sichtachse



# B4: Das Planck Teleskop

---

## „Endsorgung“

- 14. August 2013: nach 1554 Tagen Betrieb --- vom L2-Punkt abgezogen
  - in eine Bahn gebracht, die sicherstellt, dass es für die nächsten 300 Jahre nicht durch die Erde eingefangen wird
- 23. Oktober 2013: Planck endgültig abgeschaltet

