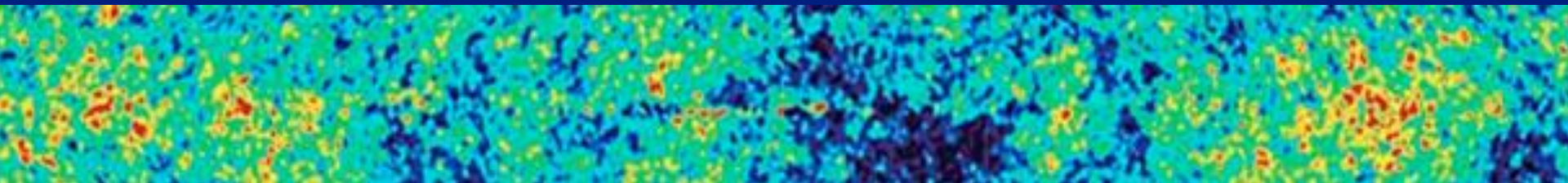


3 K – Strahlung

Kosmische Hintergrundstrahlung

CMBR = cosmic background **radiation**

Messung



3 K – Strahlung

Entwicklung Universium

- Planck – Ära, Beginn GUT-Ära: Dichte $\rho > 10^{94} \text{ g/cm}^3$
- mit Zeit $t = 0$ Beginn Expansion, ab Planckzeit $t = 5.39 \times 10^{-44} \text{ s}$, Weltallgröße = $1.6 \times 10^{-35} \text{ m}$, Plancktemperatur $T = 5 \times 10^{31} \text{ K}$

- $T > 10^{28} \text{ K}$: Abspaltung der Gravitation

- $T = 10^{27} \text{ K}$: 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^{50}

3 K – Strahlung

- $T = 10^{25} \text{K}$, Quark- Ära: Quark-Gluonen Plasma
- $T = 10^{16} \text{K}$, Existenz aller 4 Einzelkräfte
- $T = 10^{13} \text{K}$, $t = 10^{-12} \text{s}$: Quarks \rightarrow Hadronen \rightarrow Protonen & Neutronen + Antiteilchen
- $T = 10^{12} \text{K}$, $t = 10^{-4} \text{s}$: 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^+
- $T = 10^9 \text{K}$ Nukleosynthese, $t = 10 \text{s}$, Kernfusion $\text{H} \rightarrow {}^2\text{H}, {}^3\text{H}, \text{He}$
- $T = 10^6 \text{K}$ 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 ≈ 400 Photonen
der Hintergrundstrahlung

3 K – Strahlung

Vorherage: 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:

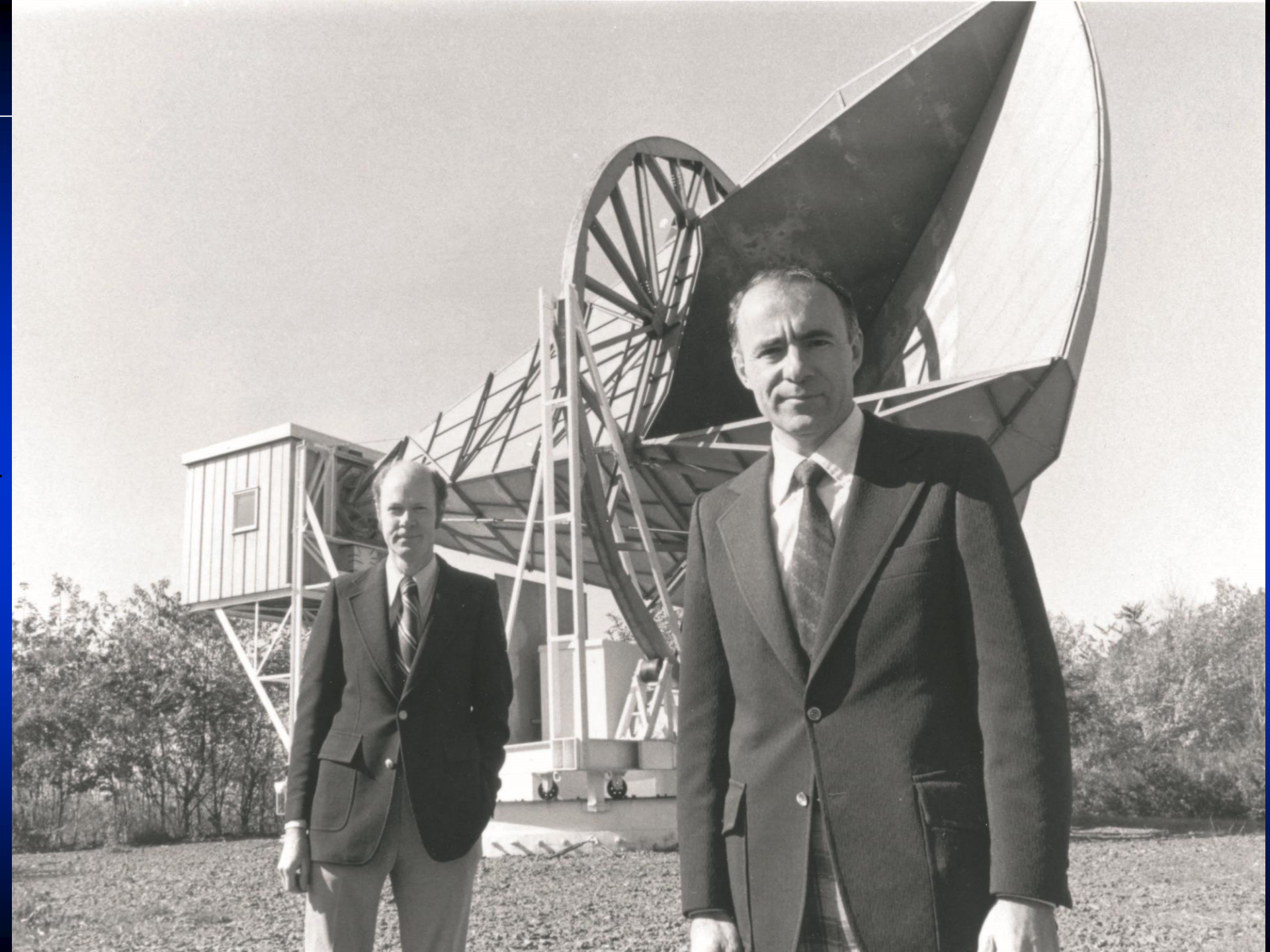
fand schon **Andrew McKellar** 1940/1941 am Mount Wilson Observatorium:

⇒ Bestimmung T_{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

Vorherage: 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_{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 sogen. Reliktstrahlung

3 K – Strahlung

Messung:

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

- Hochpräzise Messungen:

Räumliche Auflösung
(beam size)

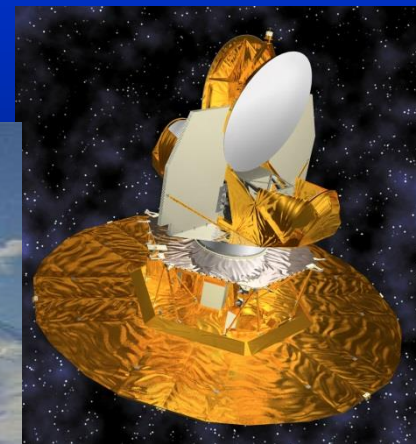
COBE Satellit = Cosmic Background Explorer, 1989-1992	7°-10°
Bollon: BOOMERANG, 1999	0.3°
WMAP Satellit = Microwave Anisotropy Probe, 2001-2010	0.2°
Planck Satellit, 2009-2013	5'-33'



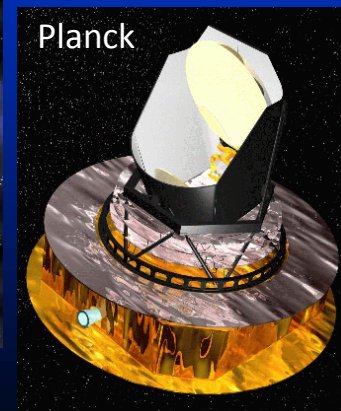
COBE



BOOMERANG



WMAP



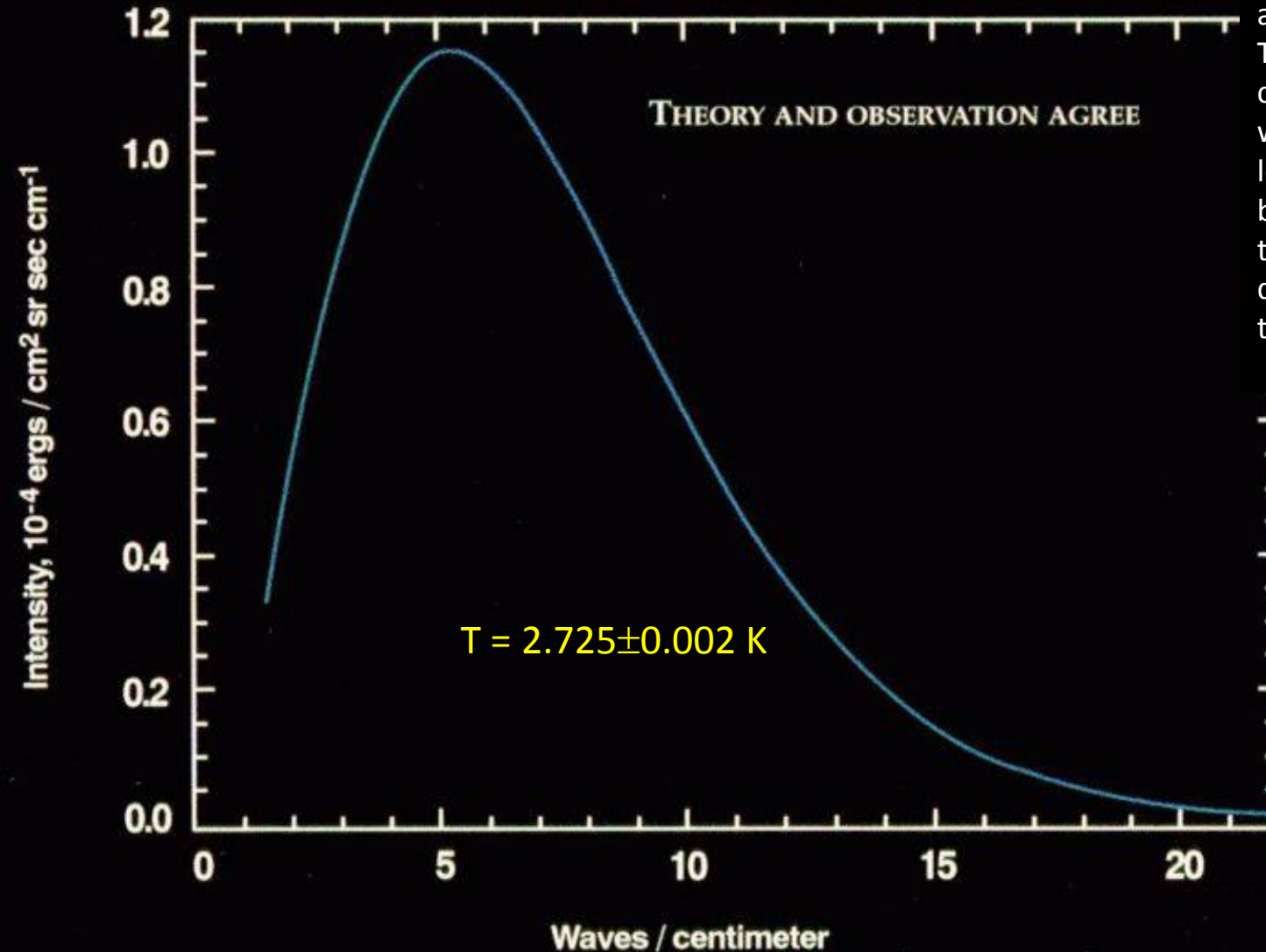
Planck

3 K – Strahlung

COBE spectrum
Cosmic Microwave
Background (CMB)

Data were taken at 34 positions 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.

COSMIC MICROWAVE BACKGROUND SPECTRUM FROM COBE



COBE-Satellit

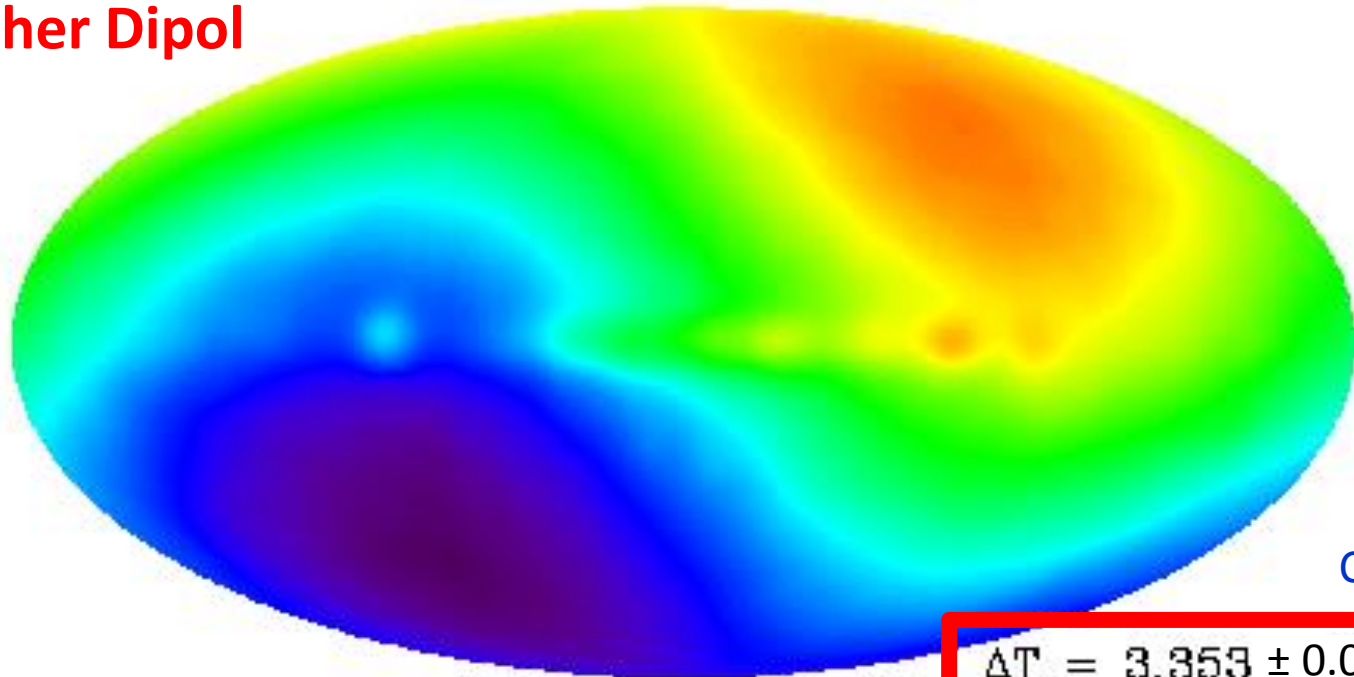
3 K – Strahlung

Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

- stärkste Abhängigkeit von der Beobachtungsrichtung ca. 0,1%
entsteht aufgrund der Bewegung unserer Milchstraße
relativ zum Mikrowellenhintergrund
→ Dipolanisotropie der Temperaturverteilung

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

Kosmischer Dipol



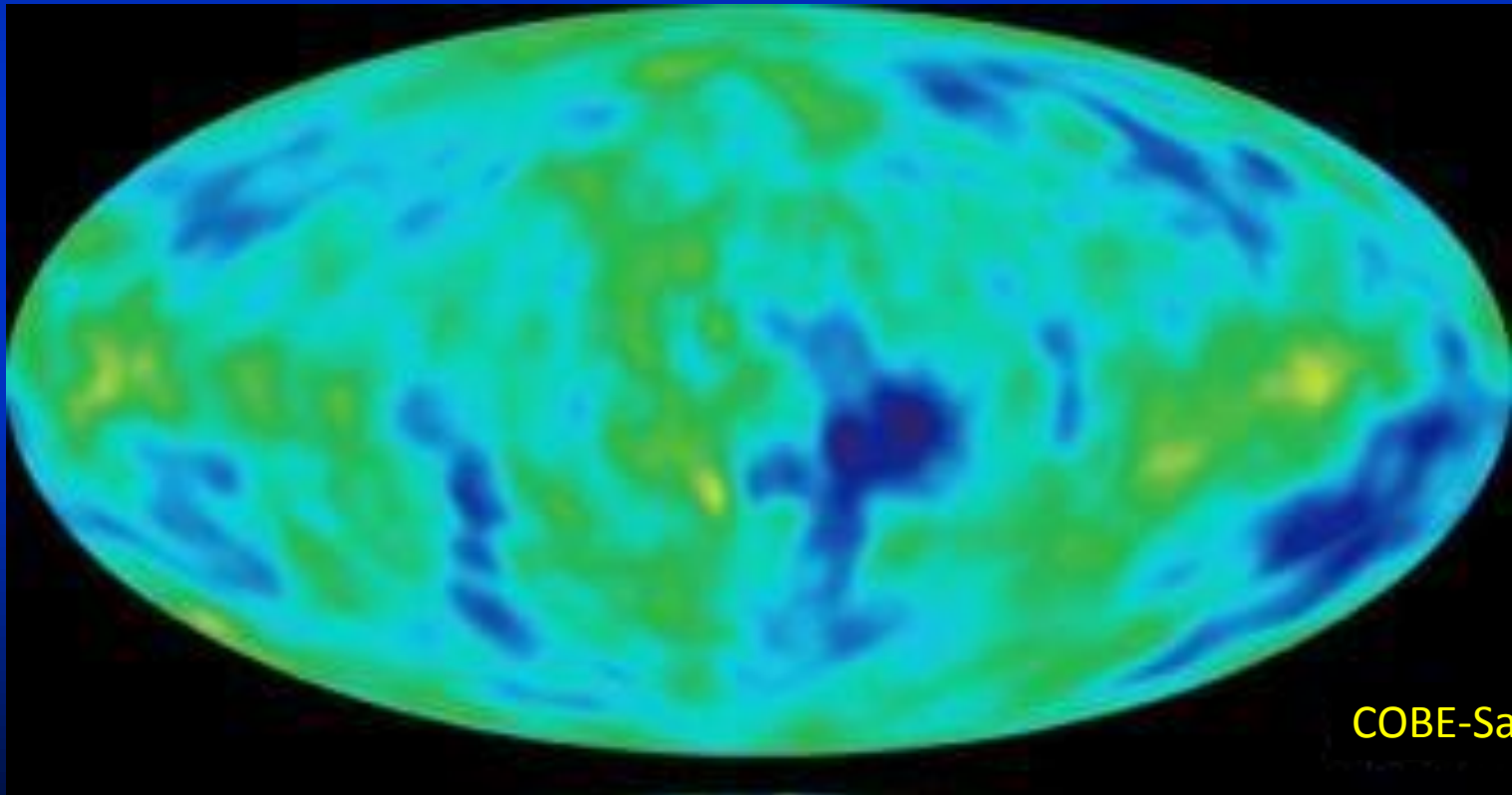
$$\Delta T = 3.353 \pm 0.016 \text{ mK (!)}$$

3 K – Strahlung

Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

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

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



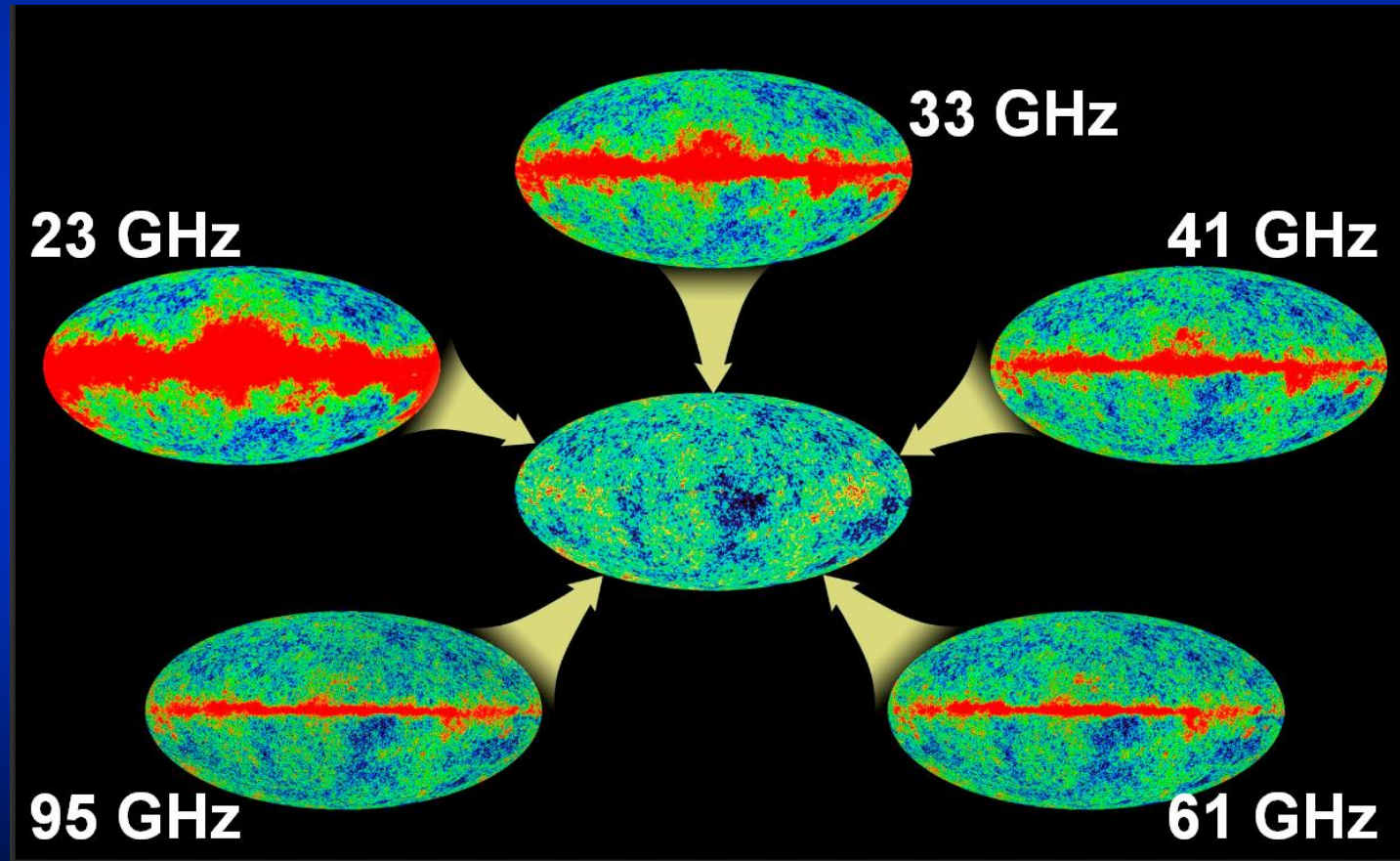
3 K – Strahlung

Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

Raumsonde WMAP :

Vermessung Stärke feinsten Temperaturschwankungen in Abhängigkeit von ihrer Winkelausdehnung am Himmel

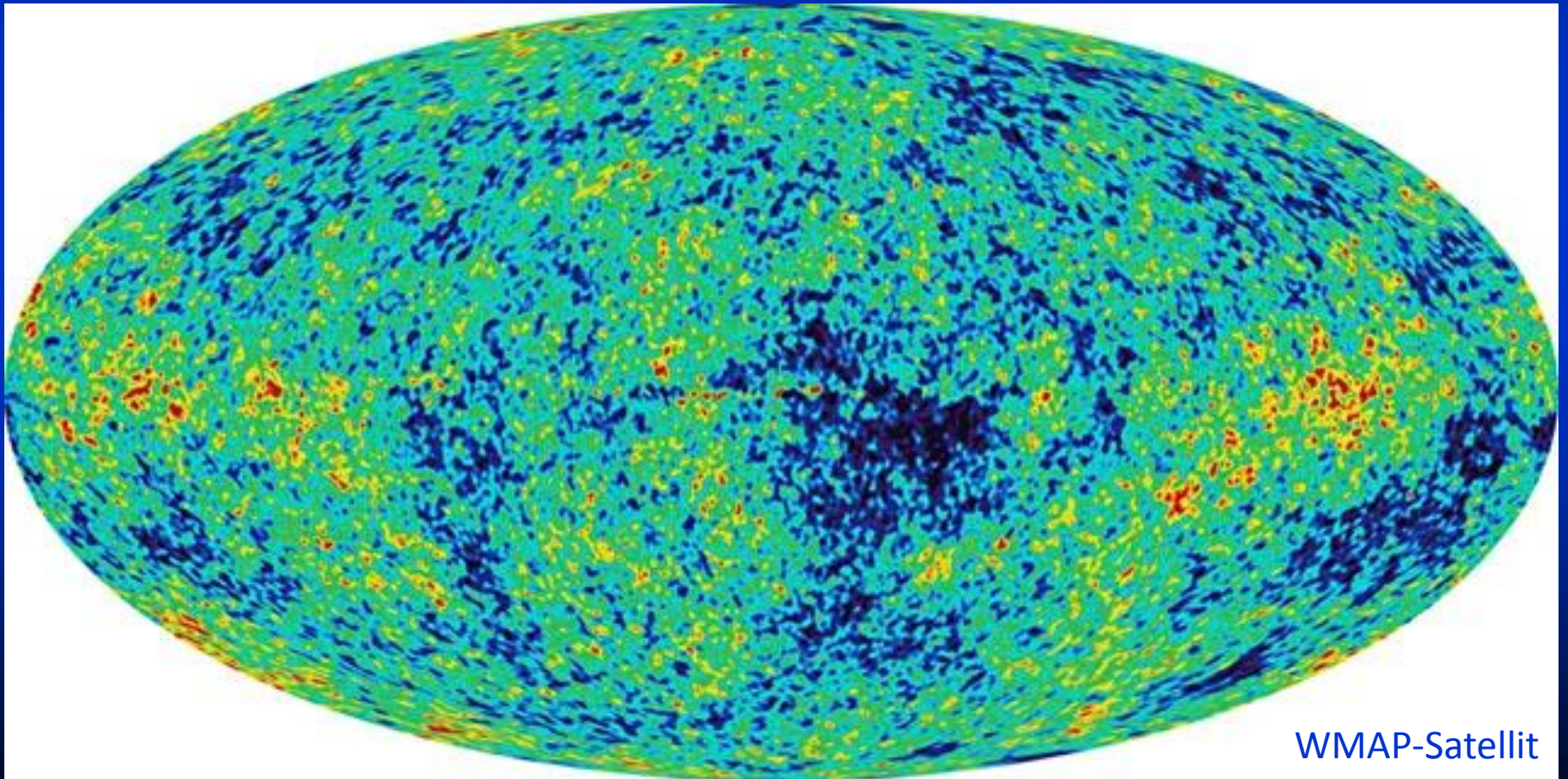
Vermessung kosmologischer Parameter: favorisiert das Λ CDM-Modell: Lambda (Λ) = kosmologische Konstante, CDM für *cold dark matter* (kalte dunkle Materie)



WMAP-Satellit

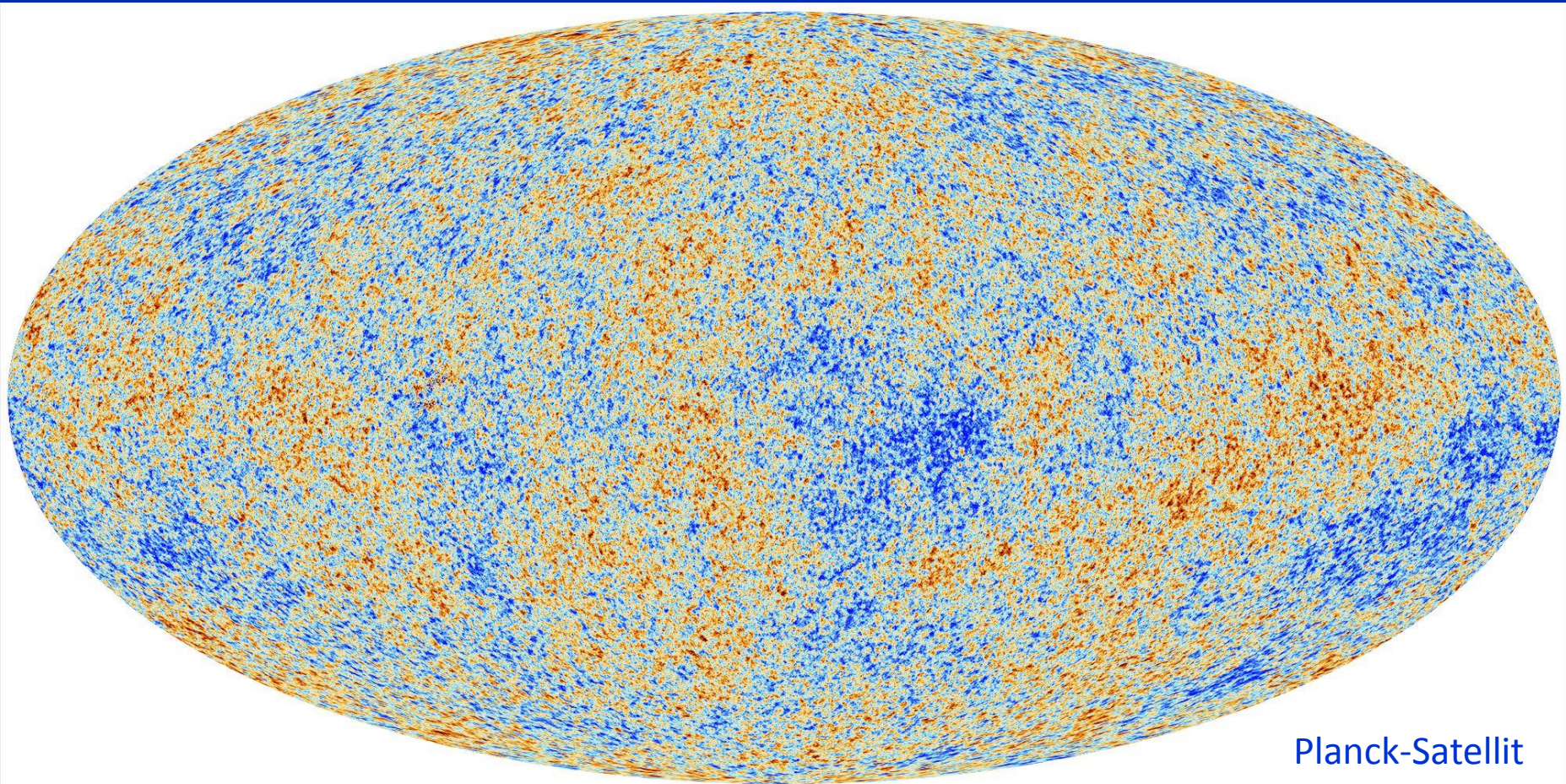
3 K – Strahlung

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



3 K – Strahlung

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



Planck-Satellit

3 K – Strahlung

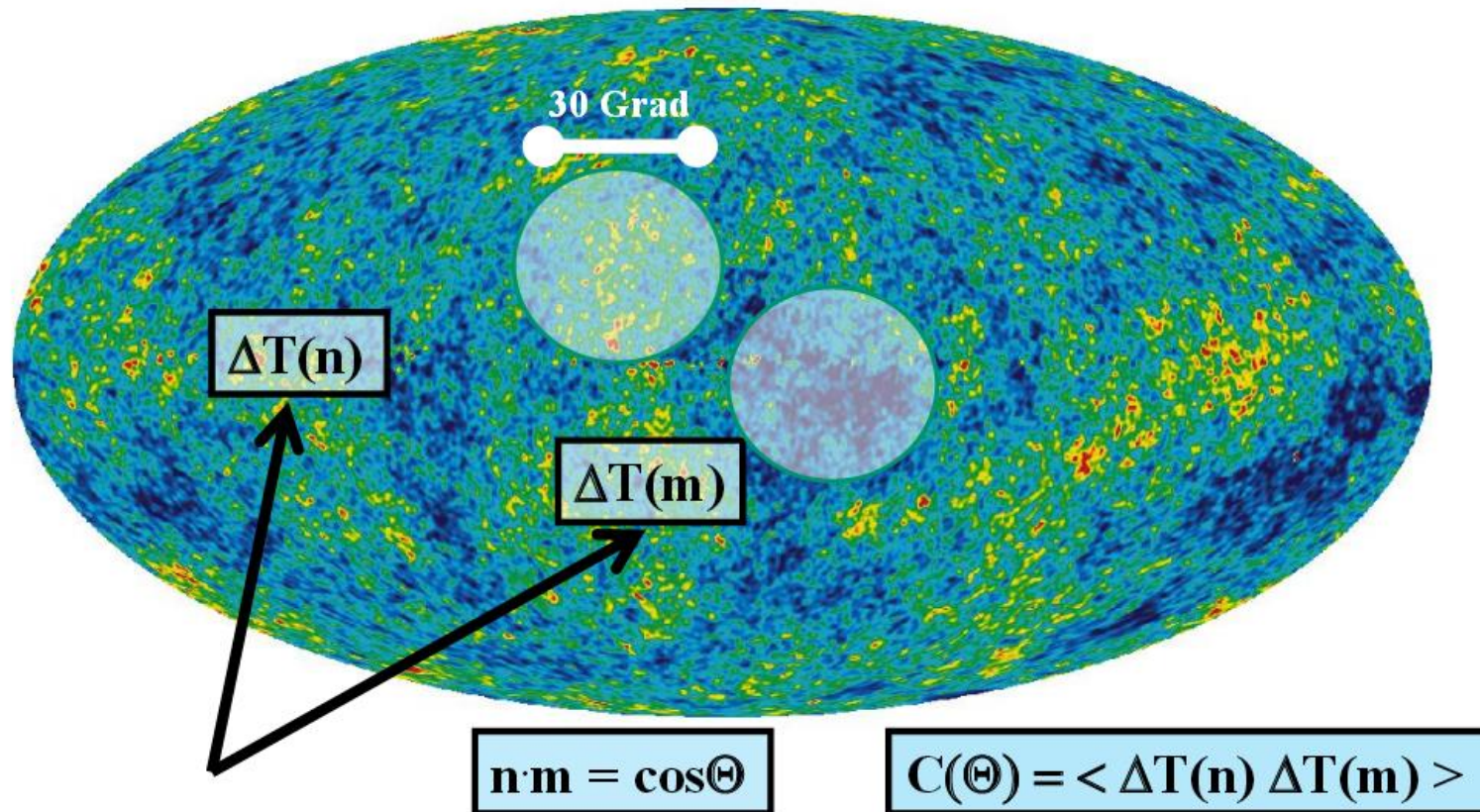
Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

Warum interessant ?

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

- statistische Eigenschaften der Dichteverteilung zum Zeitpunkt der Rekombination aufgrund der relativistischen Kosmologie als Funktion weniger kosmologischer Parameter genau modellierbar für Vorhersagen über die zu erwartende T-Verteilung & Winkelleistungsspektrum

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

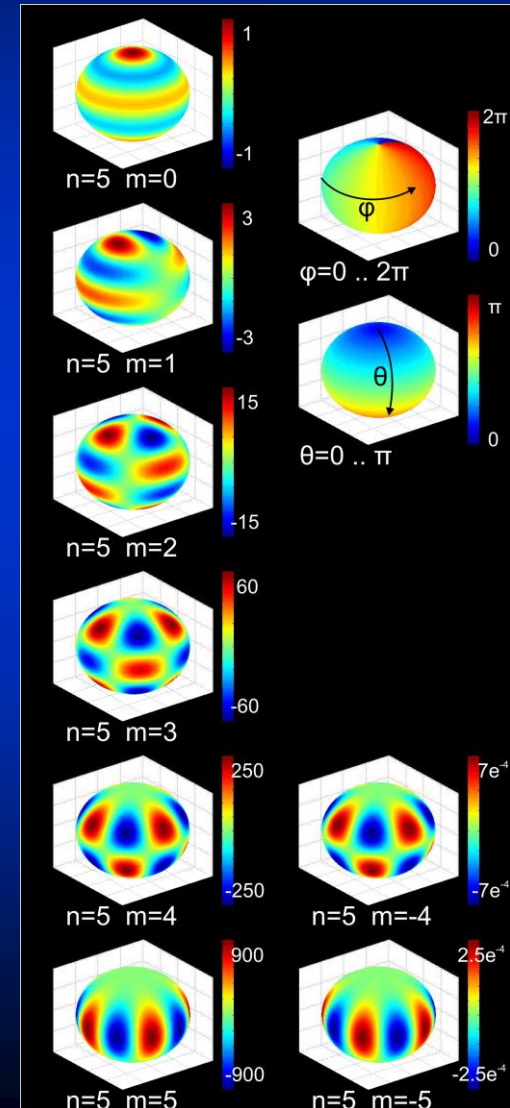
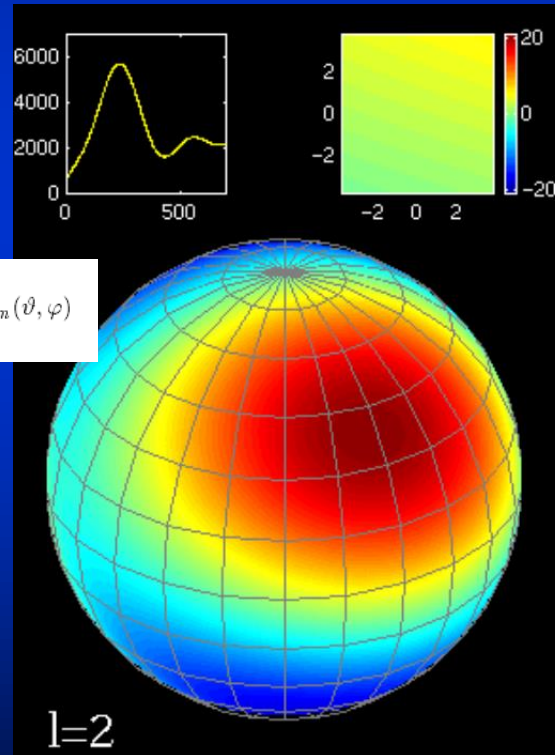
Die Kugelflächenfunktionen
= vollständiger und orthonormaler
Satz von Eigenfunktionen des
Winkelanteils des Laplace-Operators

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

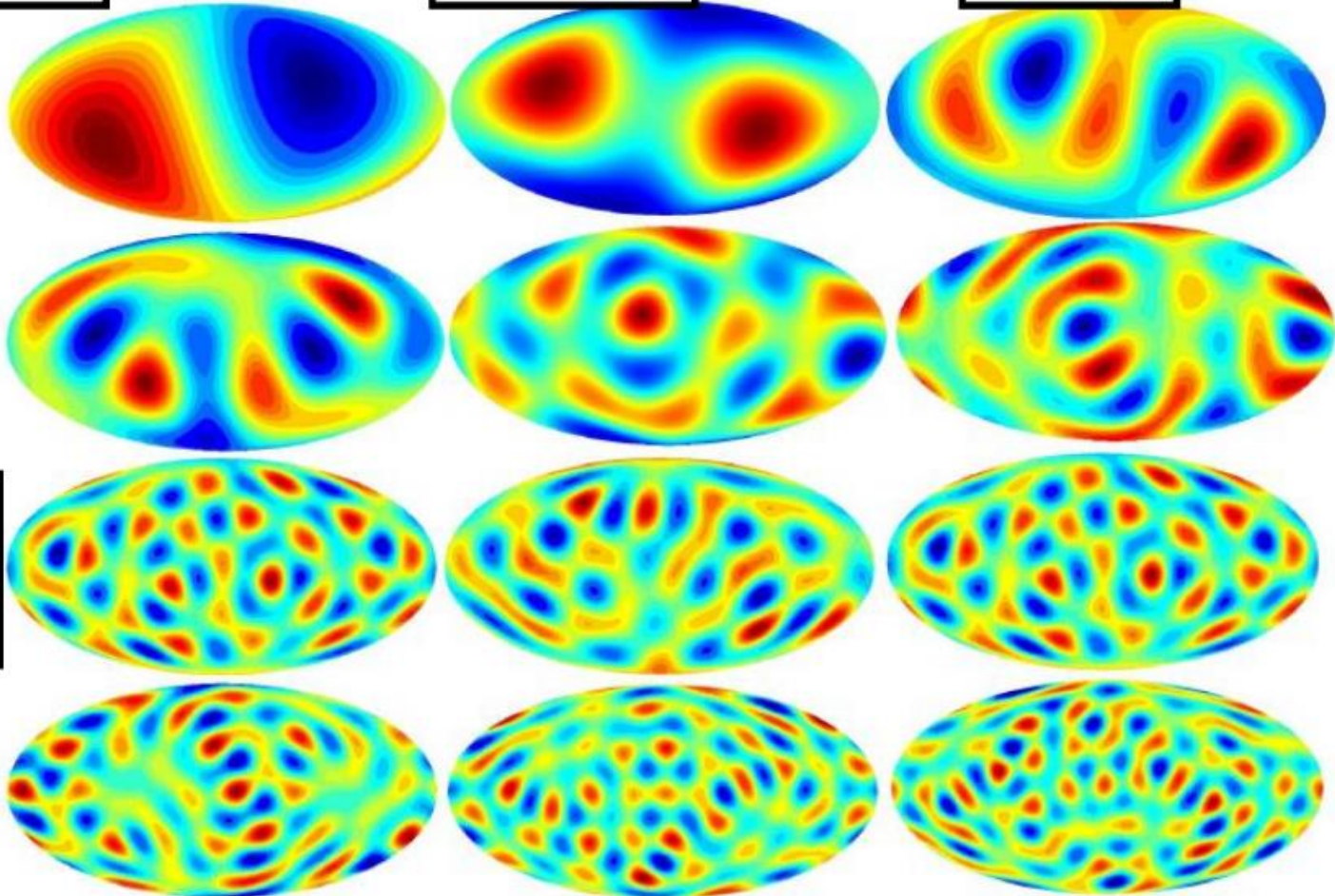


Multipole – $\ell = 1, 2, 3, \dots, 12$

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**

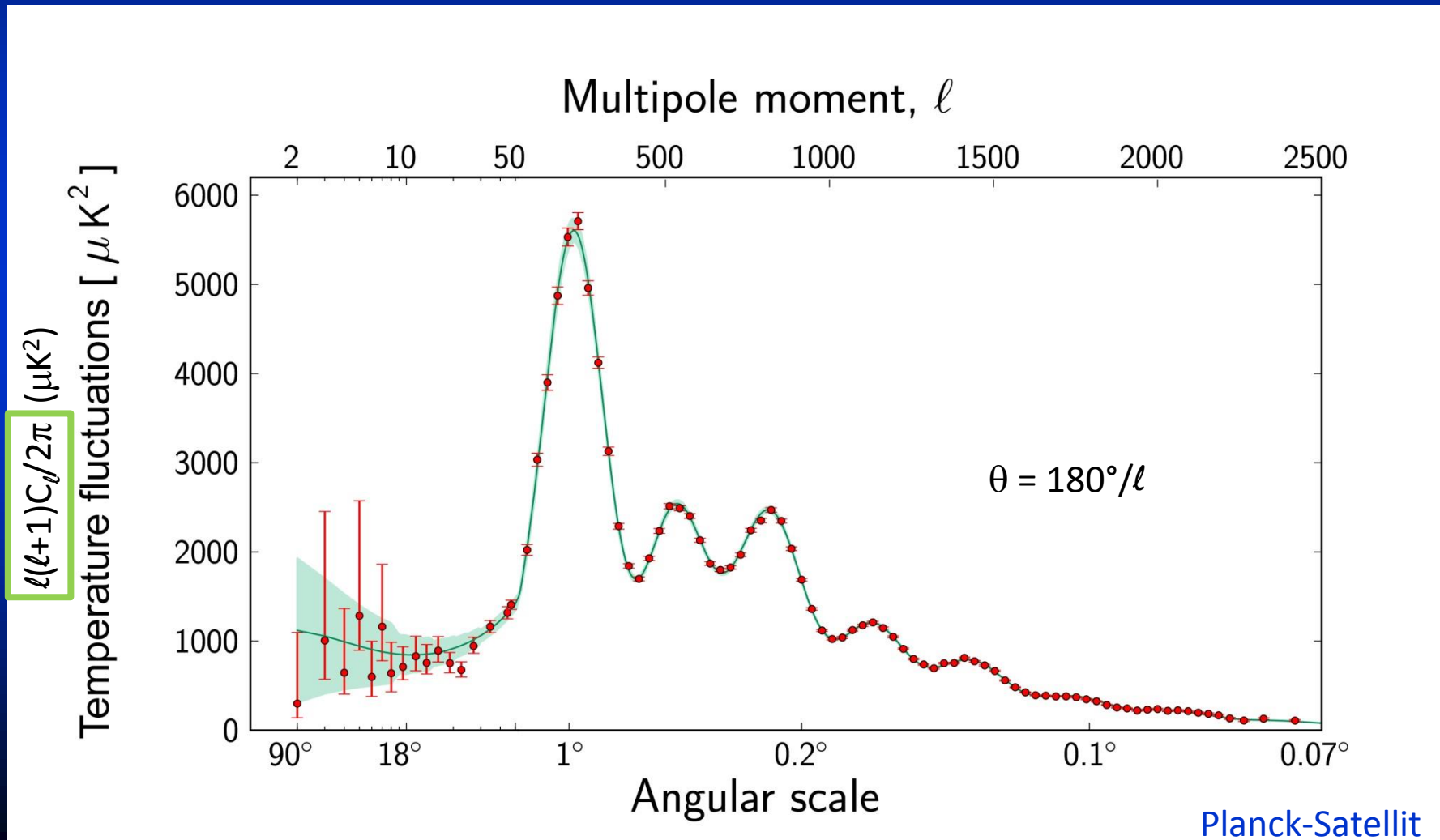
3 K – Strahlung



Leistungsspektrum
der Temperaturschwankungen
der kosmischen
Hintergrundstrahlung

Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

„Summen“ des frühen Universiums: = akustische Oszillationen

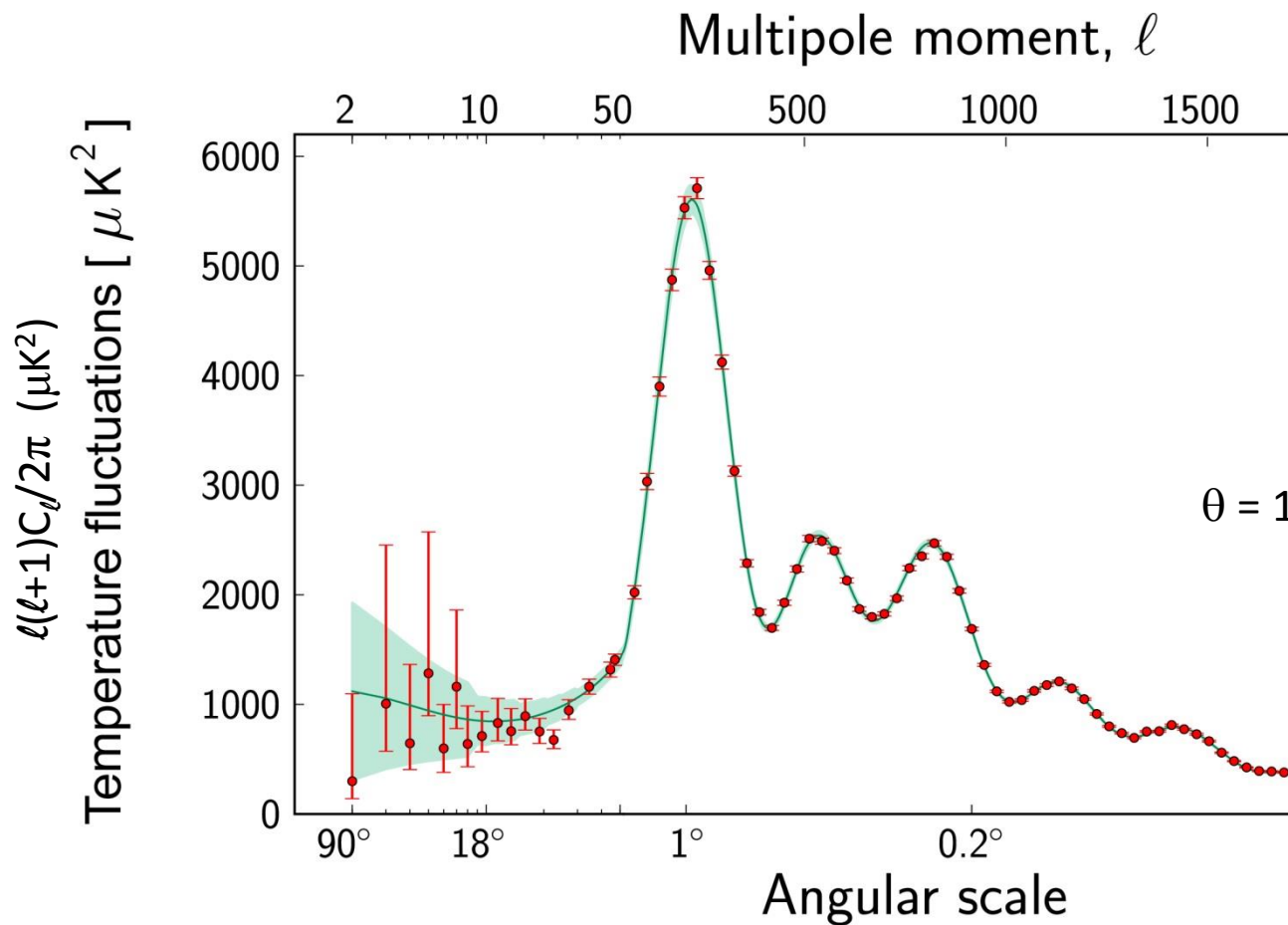


3 K – Strahlung

Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

„Summen“ des frühen Universiums: = akustische Oszillationen

Leistungsspektrum der Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung



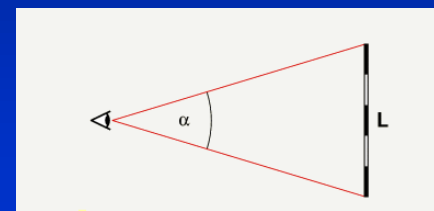
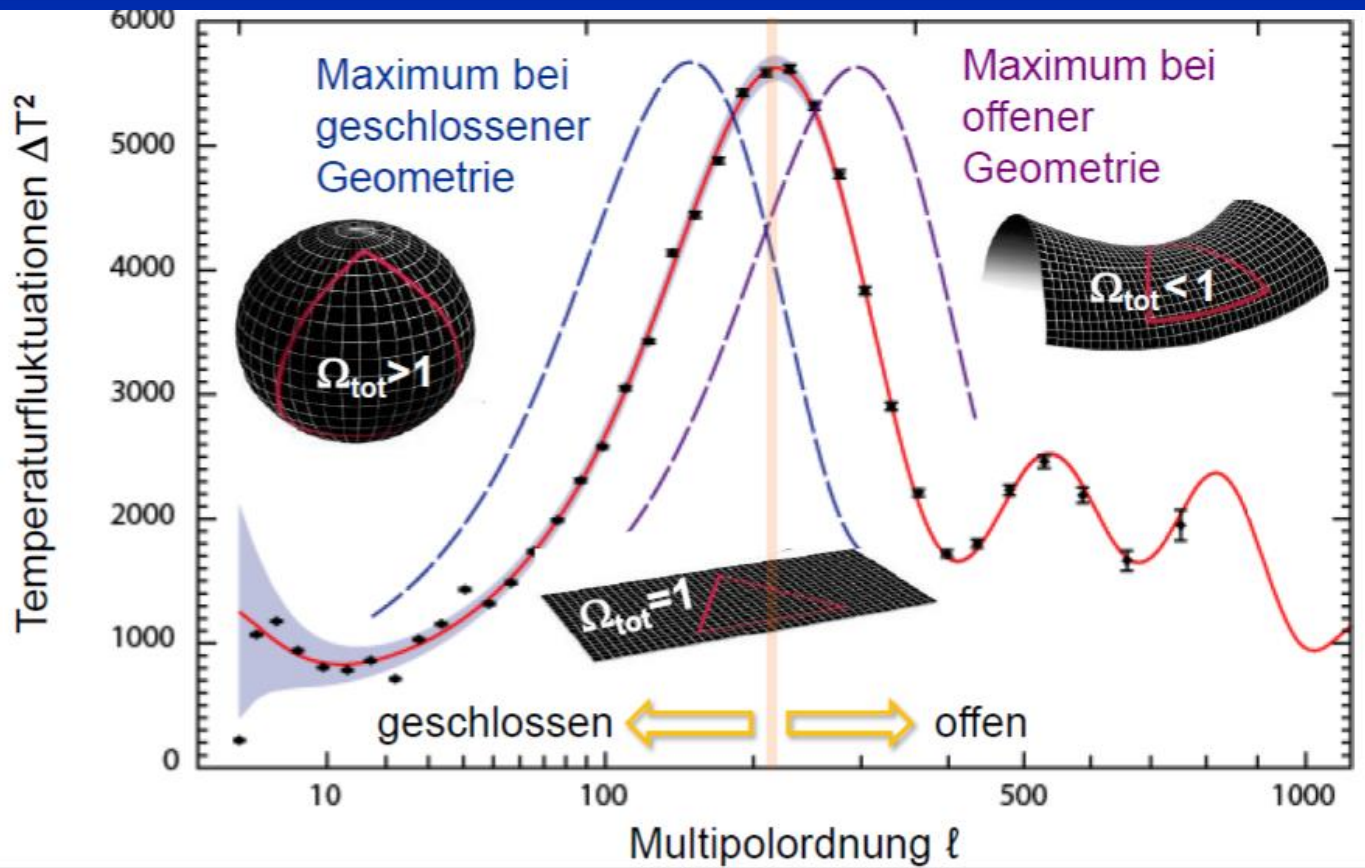
Erklärung:

- **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° 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

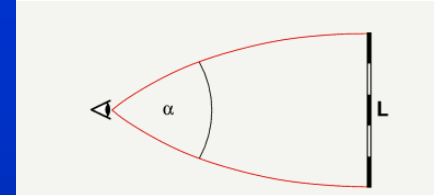
3 K – Strahlung

Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

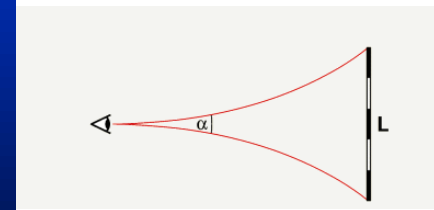
Geometrie des Weltalls



Flacher Raum

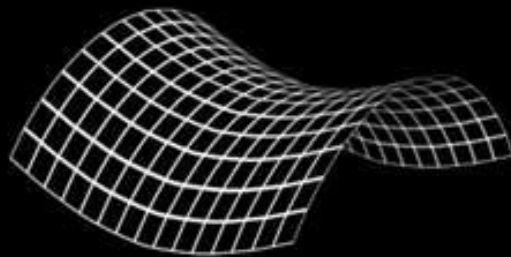
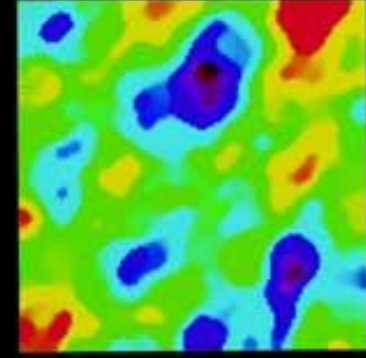
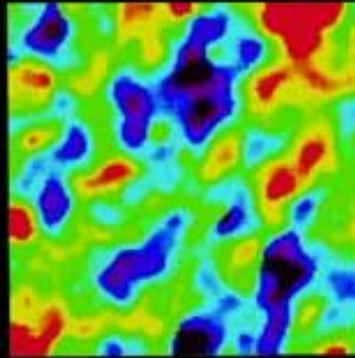
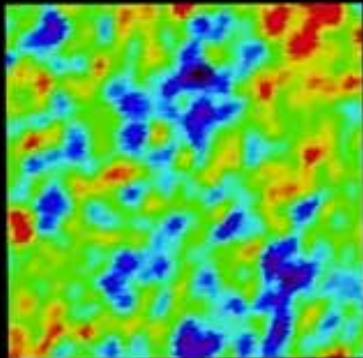


Positiv gekrümmter Raum



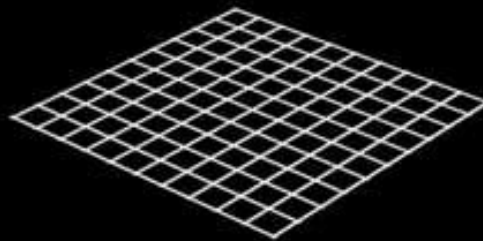
Negativ gekrümmter Raum

GEOMETRY OF THE UNIVERSE



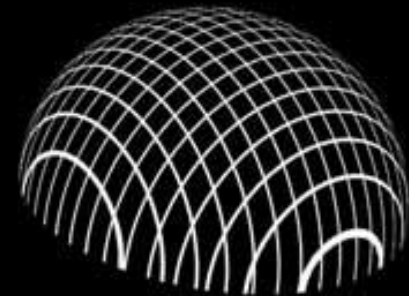
OPEN

Fluctuations largest on half-degree scale



FLAT

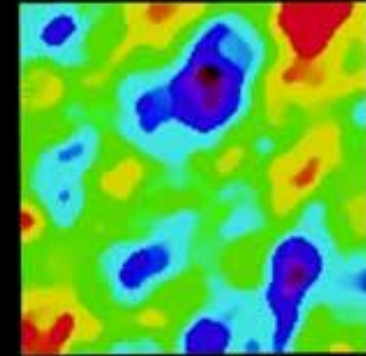
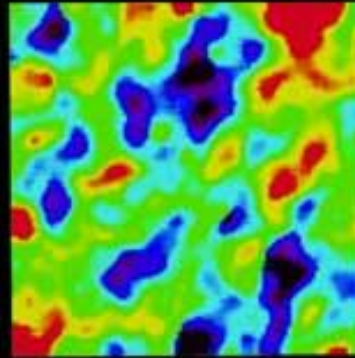
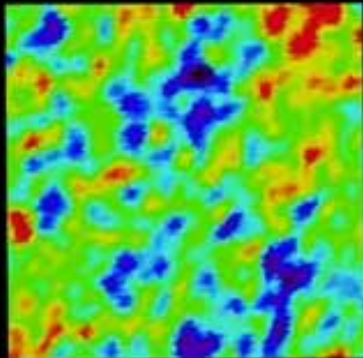
Fluctuations largest on
1-degree scale



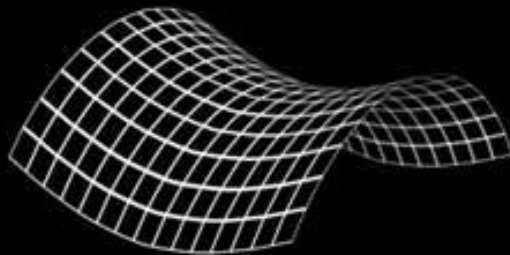
CLOSED

Fluctuations largest on
greater than 1-degree scale

GEOMETRY OF THE UNIVERSE

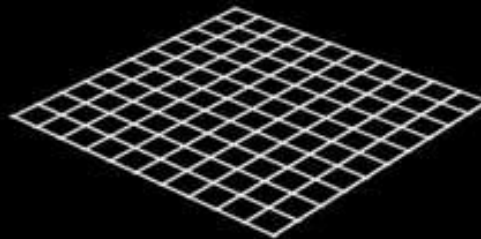


Deutliches Maximum bei 0.9° !



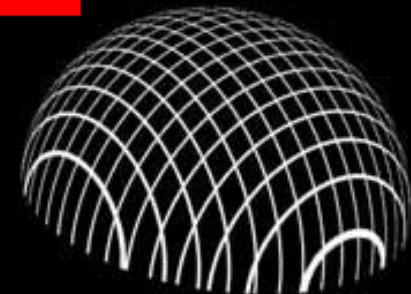
OPEN

Fluctuations largest on half-degree scale



FLAT

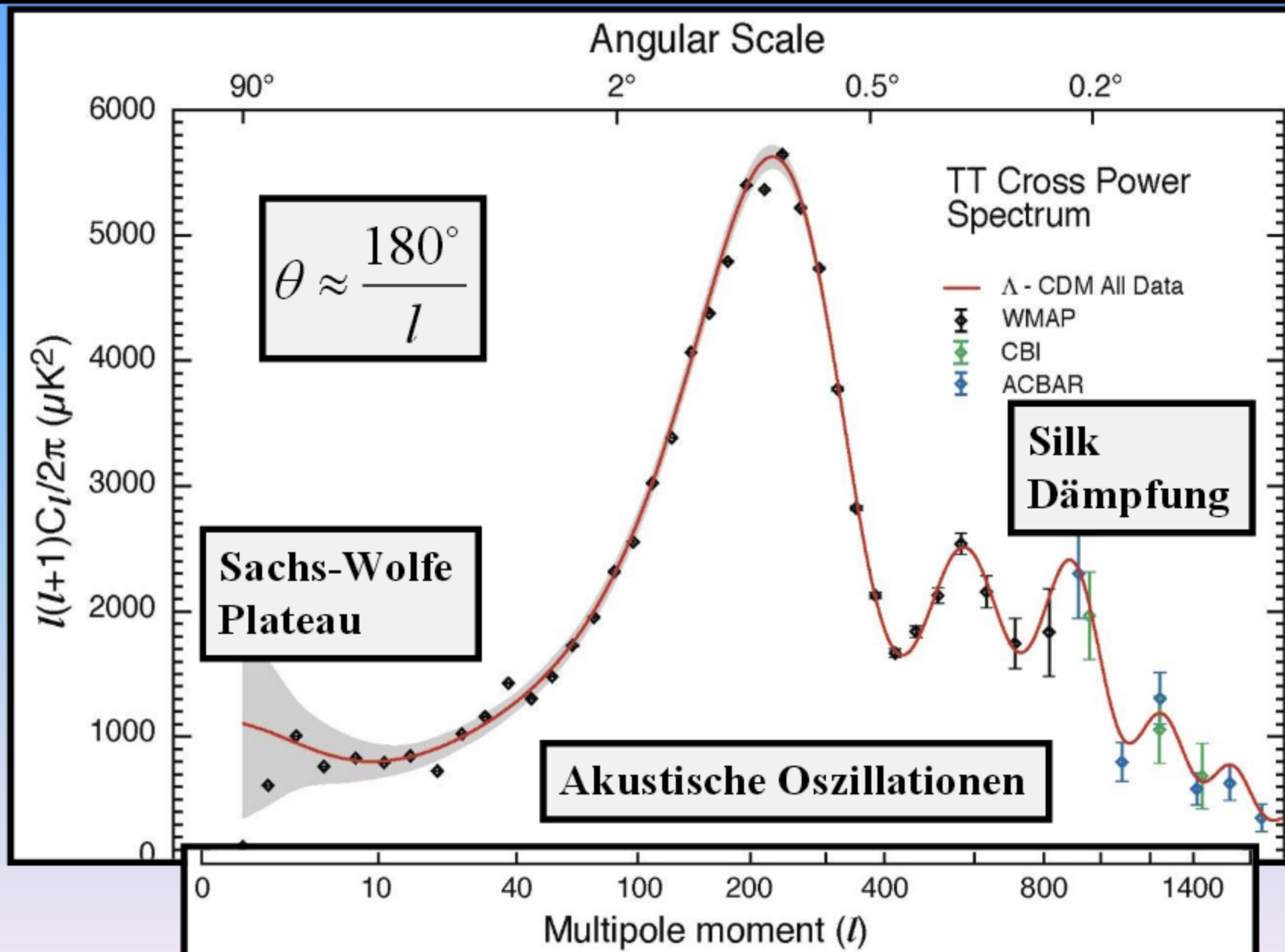
Fluctuations largest on
1-degree scale



CLOSED

Fluctuations largest on
greater than 1-degree scale

3 Effekte ausschlaggebend



3 K – Strahlung

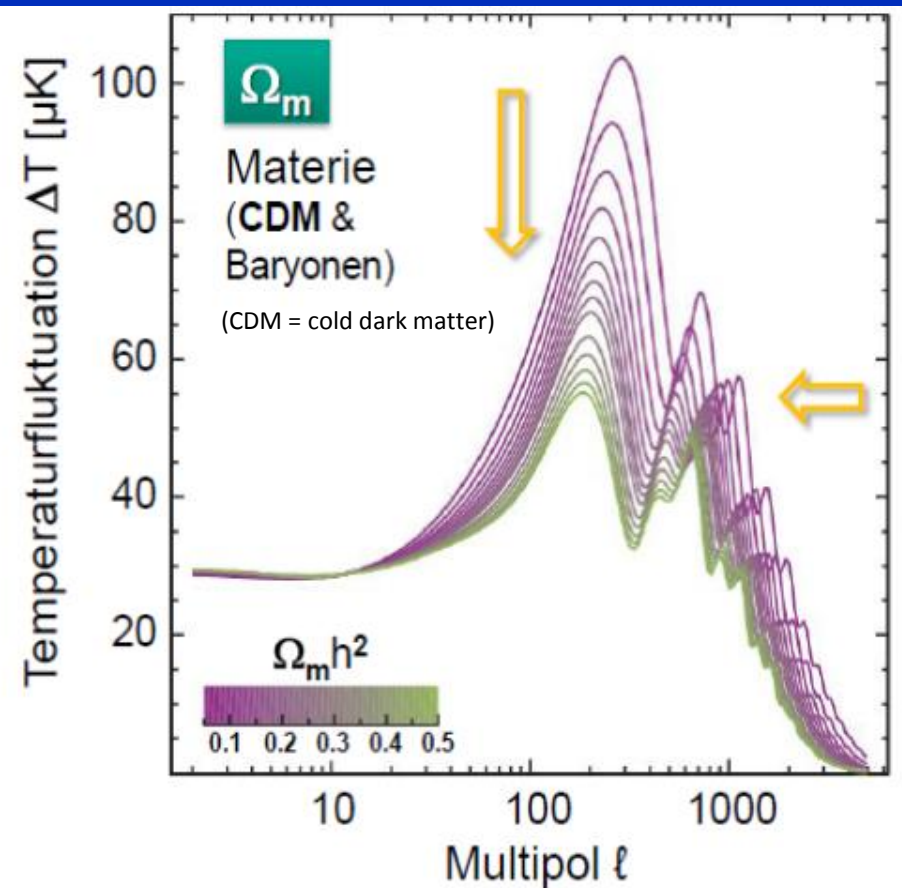
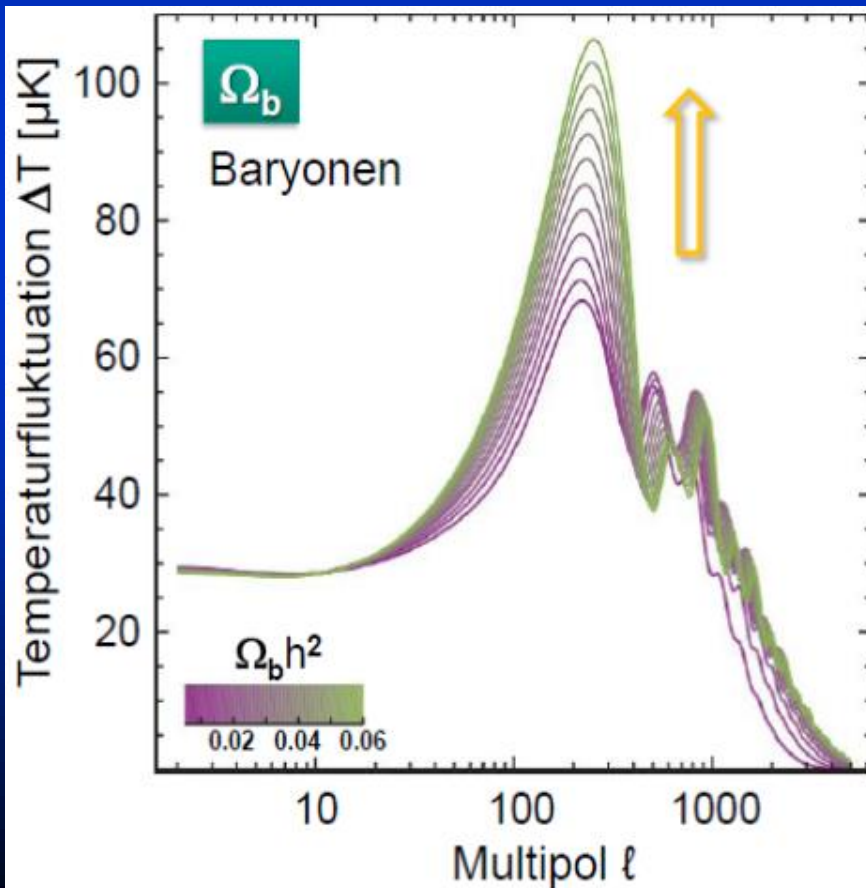
Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

Materiedichte ableitbar:

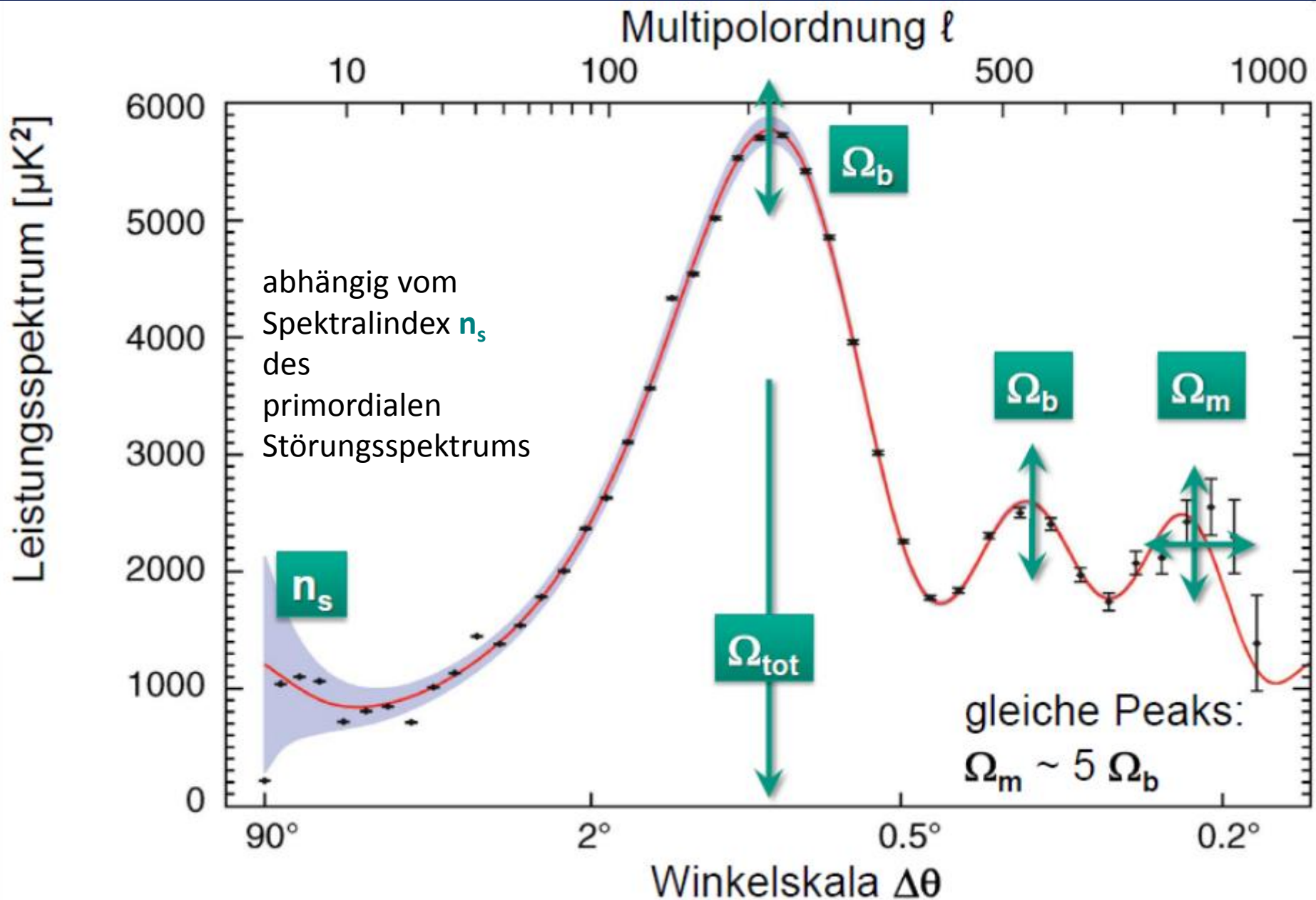
Baryonen-Photonen-Verhältnis \Rightarrow aus Höhe des ersten Peaks, und Peakintensitätsverteilung:

\Rightarrow um so mehr Baryonen – um so größere ΔT -Intensitäts-Fluktuationen

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



3 K – Strahlung

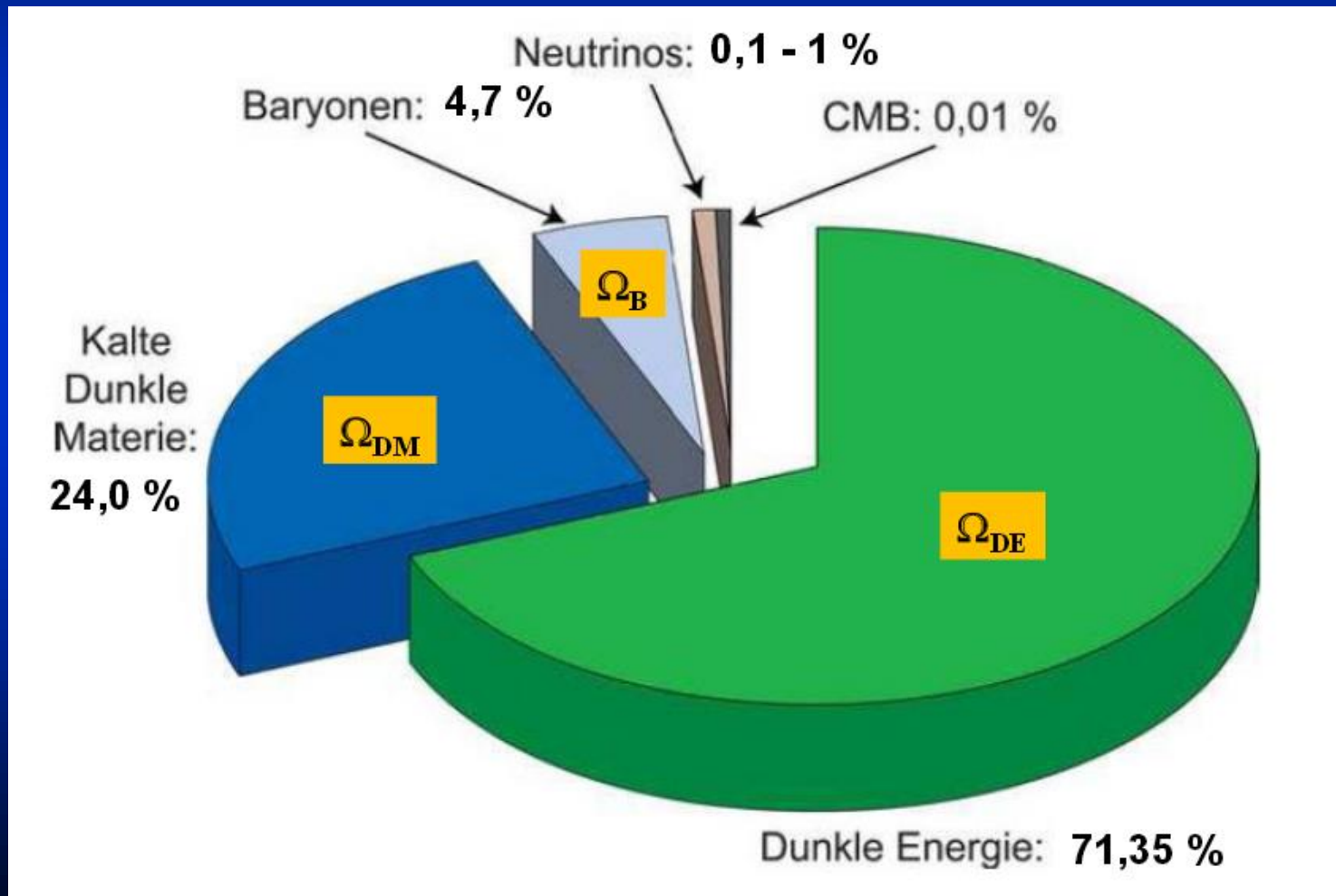


3 K – Strahlung

Leistungsspektrum
der Temperaturschwankungen
der kosmischen
Hintergrundstrahlung

Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

Materieverteilung im Universum



3 K – Strahlung

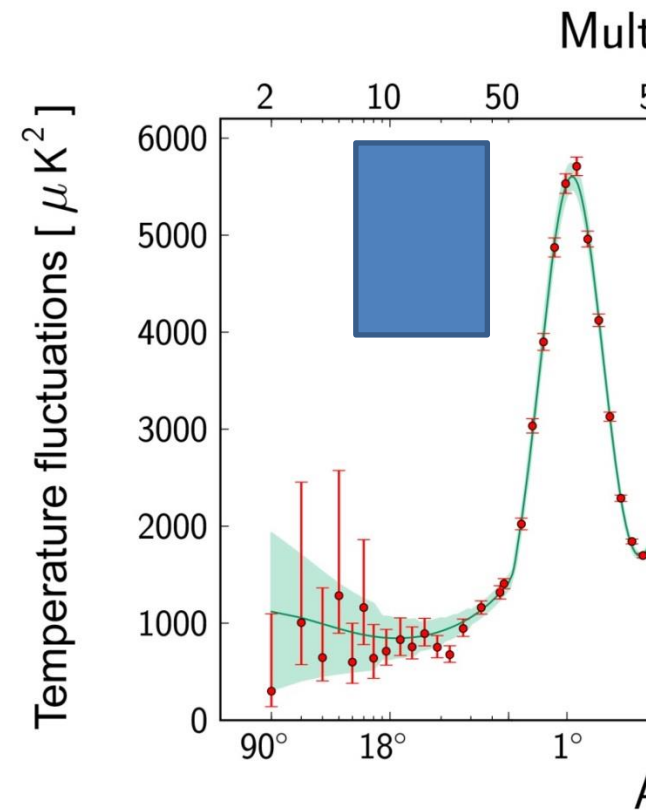
Sachs-Wolfe-Effekt $6 < \ell < 40$

Strahlung, die aus überdichten Regionen entweicht,
erfährt eine Gravitationsrotverschiebung
... so dass die Hintergrundstrahlung in der entsprechenden Richtung
eine geringfügig niedrigere Temperatur hat,

Effekt aber teilweise kompensiert, da Gravitation \Rightarrow Zeitdilatation

Vermuteter Ursprung:

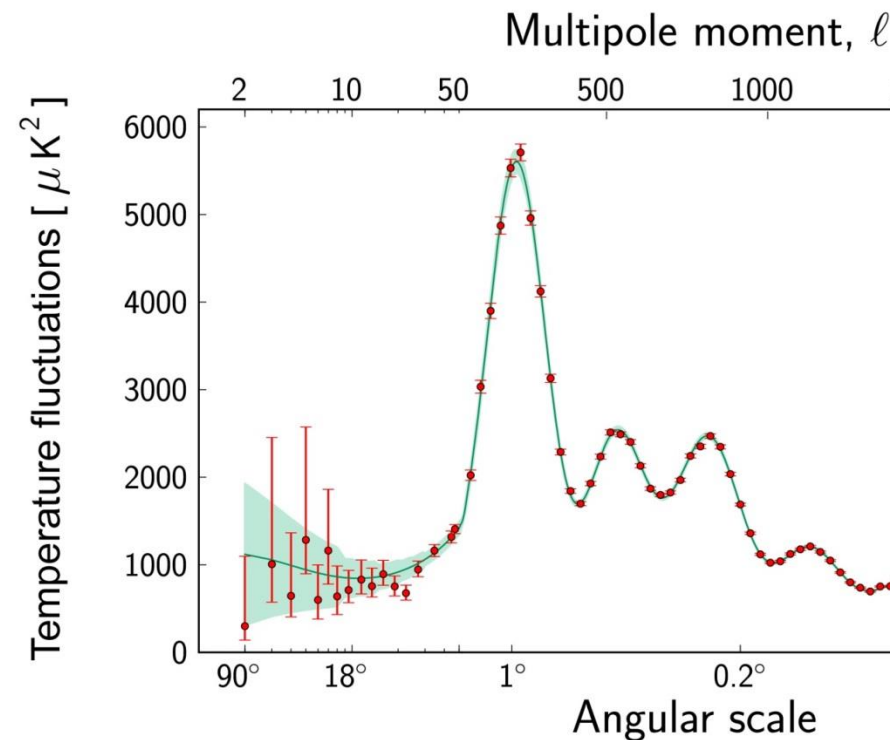
- \Rightarrow mögliche Quantenfluktuationen im Inflationsfeld
- \Rightarrow durch Inflation minimalste Inhomogenitäten
auf kosmische Dimensionen
- \Rightarrow dadurch existierten bereits Verdichtungen und
Verdünnungen (Unterschiede im Gravitations-
potential) im kosmischen Material
- \Rightarrow kosmische 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



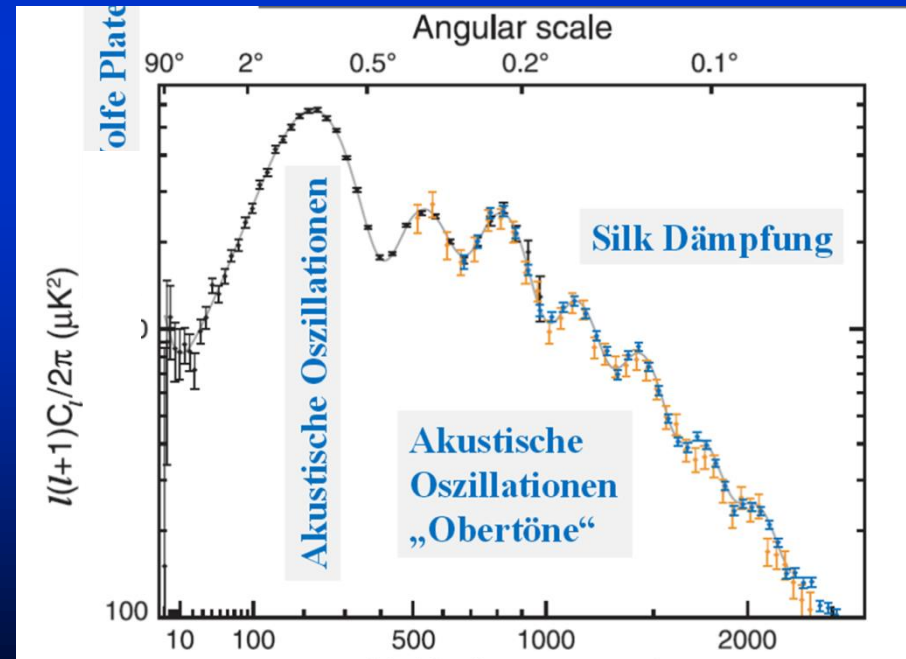
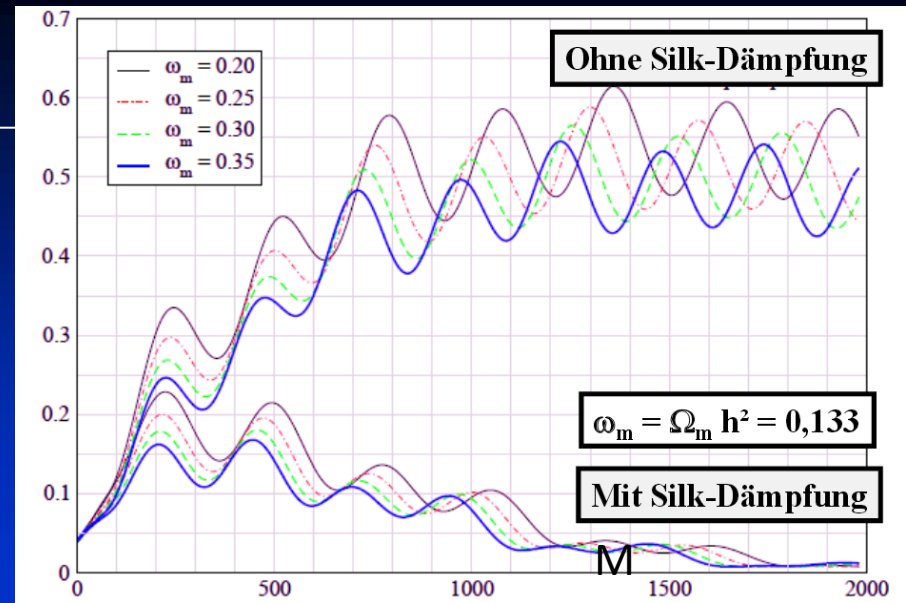
3 K – Strahlung

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

Multipole ℓ



3 K – Strahlung

Anisotropien im Mikrowellenhintergrund

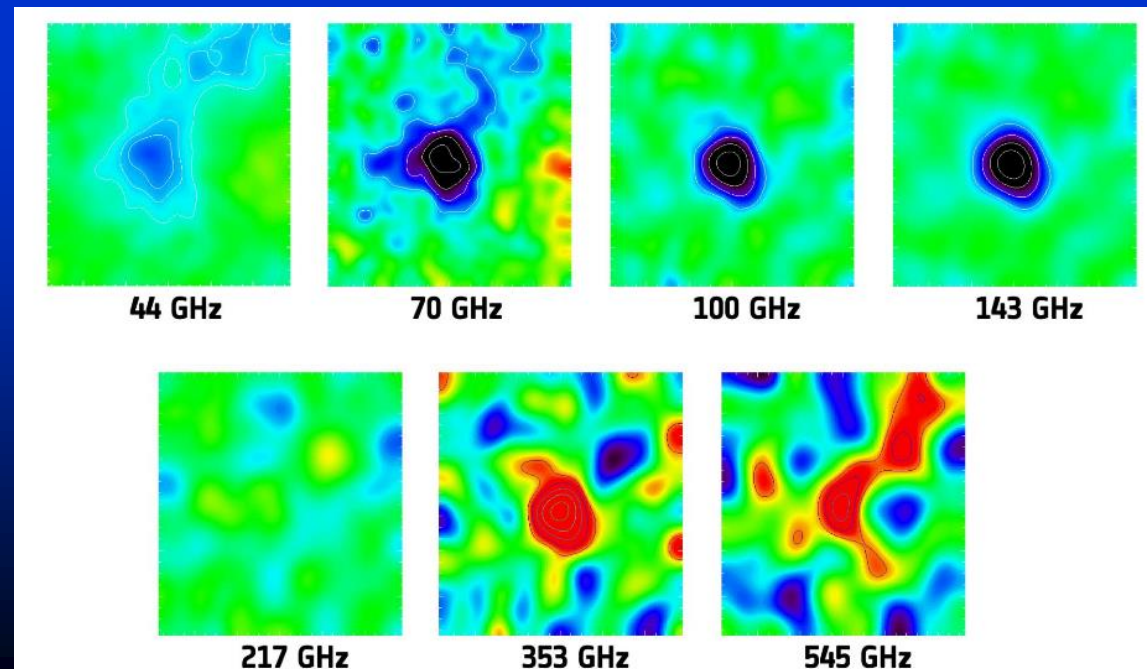
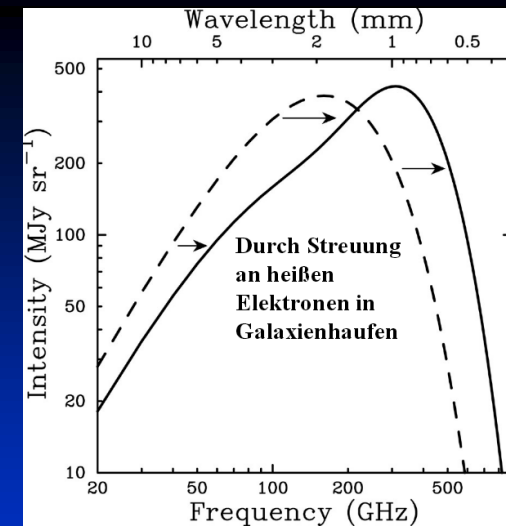
Sunyaev-Zel'dovich Effekt

- 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^{[24][25][26]}

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	$\Omega_b h^2$	$\Omega_c h^2$	Ω_Λ	σ_8	n_s	τ
Planck Best fit	13.819	67.11	0.022068	0.12029	0.6825	0.8344	0.9624	0.0925
Planck 68% limits	13.813 ± 0.058	67.4 ± 1.4	$0.022\ 07 \pm 0.000\ 33$	0.1196 ± 0.0031	0.686 ± 0.020	0.834 ± 0.027	0.9616 ± 0.0094	0.097 ± 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 ± 0.058	67.9 ± 1.5	$0.022\ 17 \pm 0.000\ 33$	0.1186 ± 0.0031	0.693 ± 0.019	0.823 ± 0.018	0.9635 ± 0.0094	0.089 ± 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 ± 0.048	67.3 ± 1.2	$0.022\ 05 \pm 0.000\ 28$	0.1199 ± 0.0027	$0.685^{+0.018}_{-0.016}$	0.829 ± 0.012	0.9603 ± 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 ± 0.047	67.3 ± 1.2	$0.022\ 07 \pm 0.000\ 27$	0.1198 ± 0.0026	$0.685^{+0.017}_{-0.016}$	0.828 ± 0.012	0.9585 ± 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 ± 0.044	67.9 ± 1.0	$0.022\ 18 \pm 0.000\ 26$	0.1186 ± 0.0022	0.693 ± 0.013	0.8233 ± 0.0097	0.9614 ± 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 Λ CDM das Standard-Modell des expandierenden Universums.

3 K – Strahlung

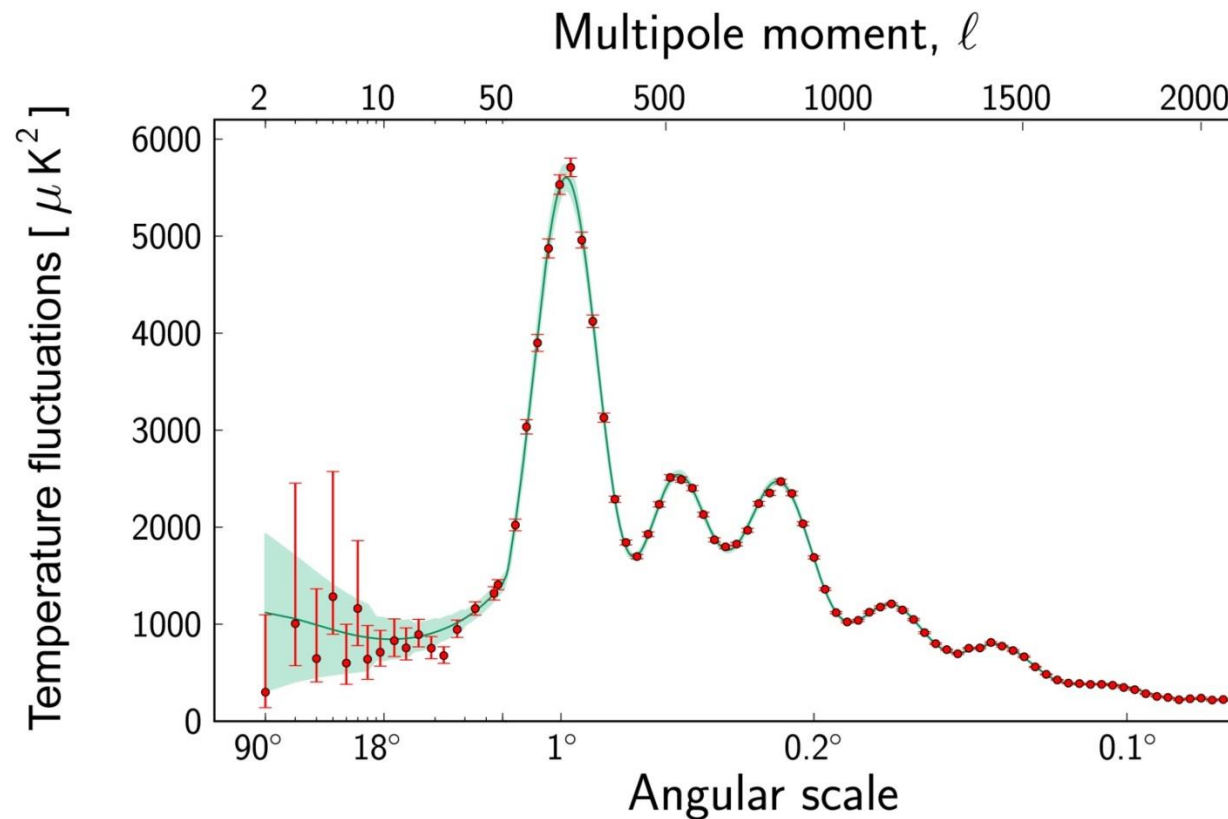
Offene Fragen

- (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 Messungsgenauigkeiten 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

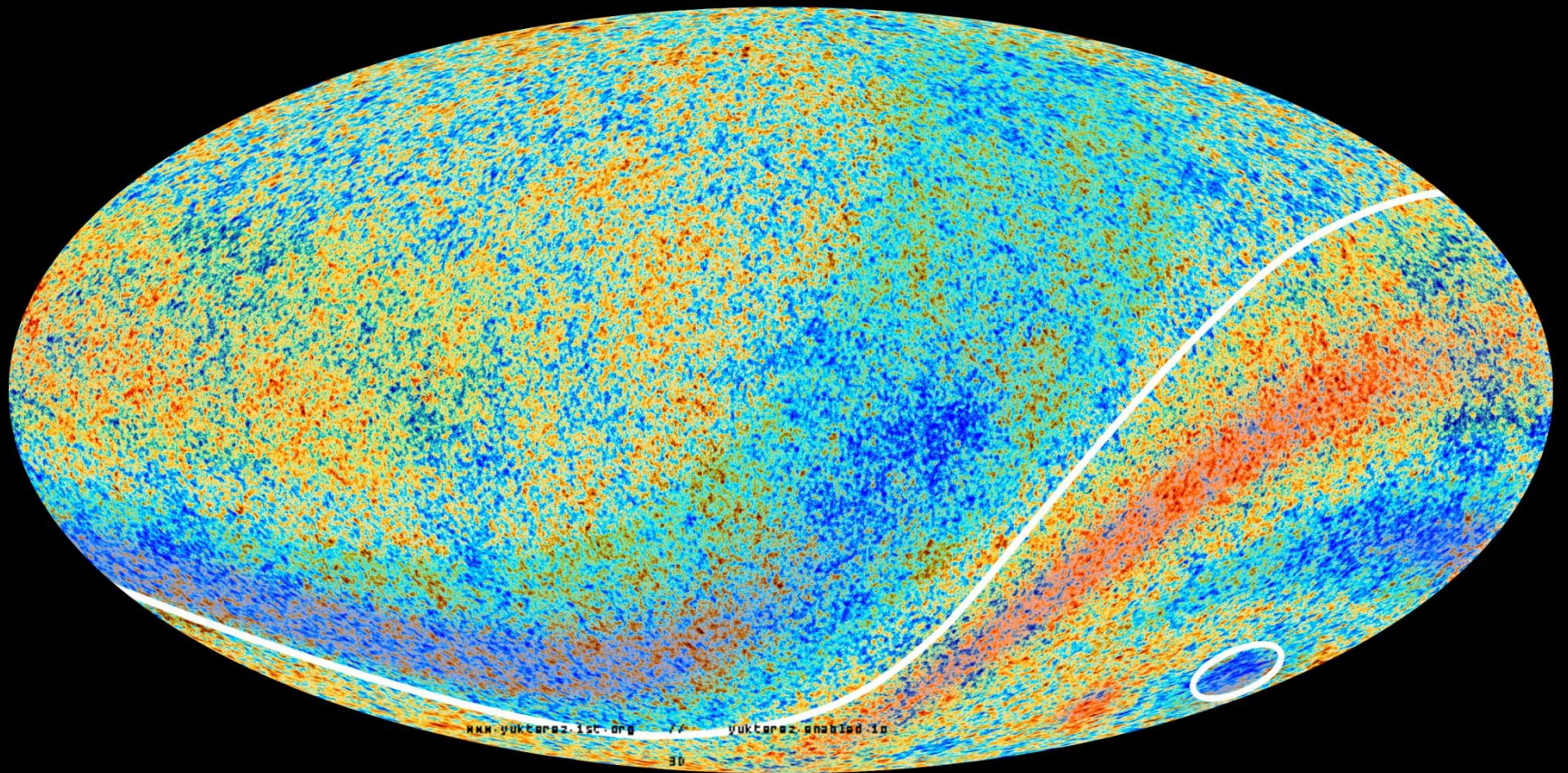
Offene Fragen

- (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 Messungenauigkeiten 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

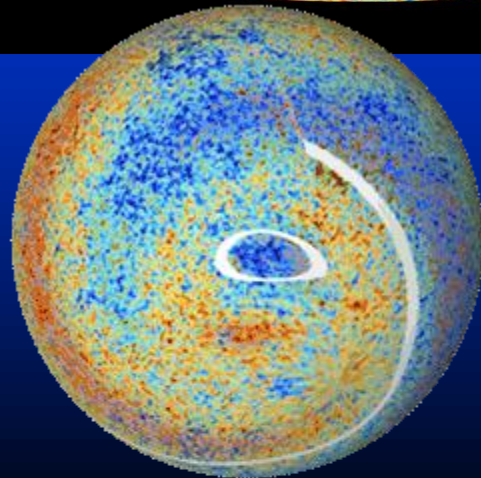
3 K – Strahlung

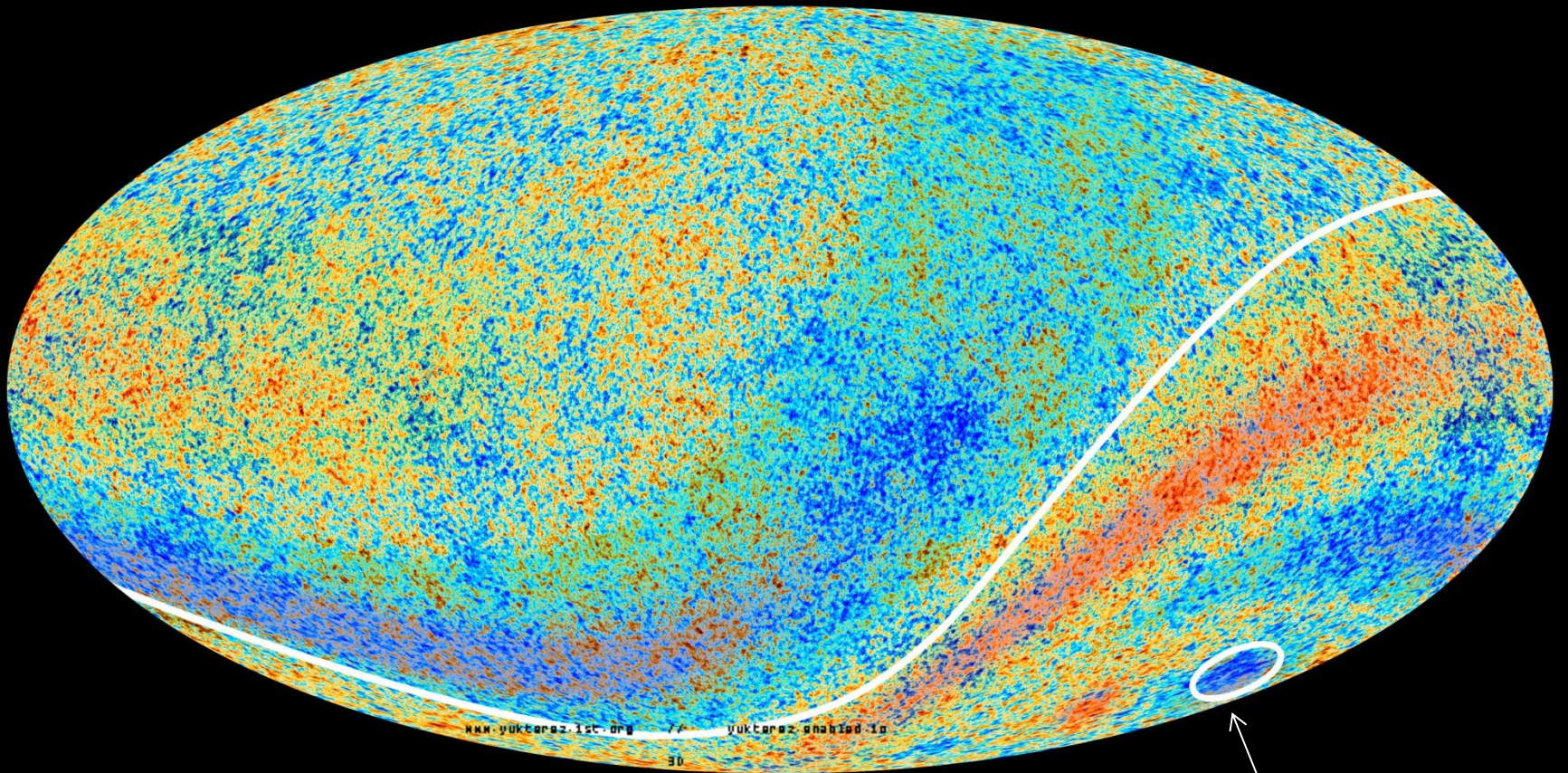
Offene Fragen

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

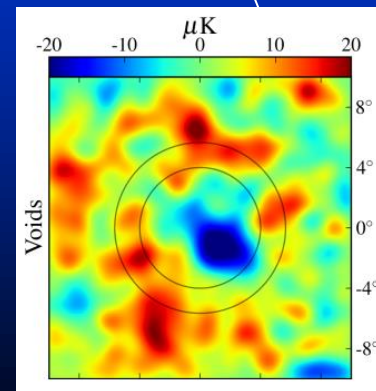
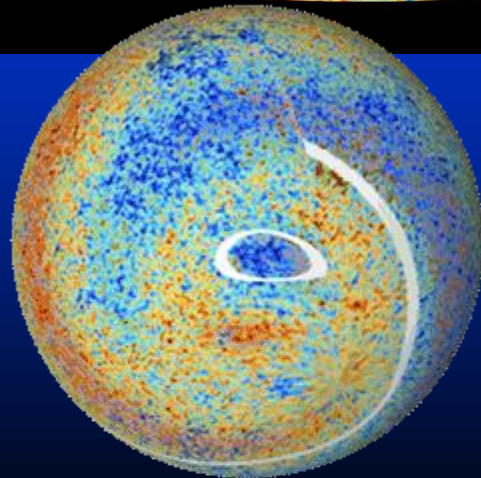


Nord-Süd-Asymmetrie





(4) Natur eines Cool spots



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

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)

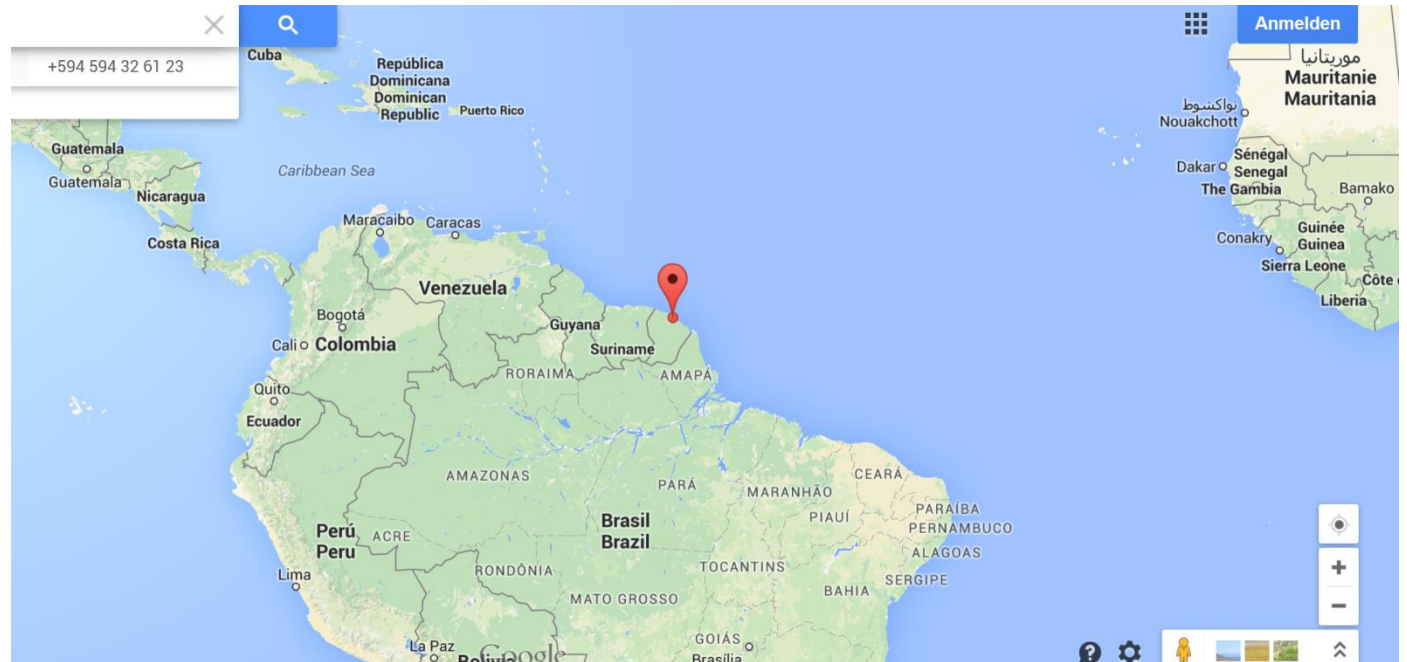
Gesamtkosten: 600 Mio. Euro



Das Planck Teleskop

Start 14. Mai 2009

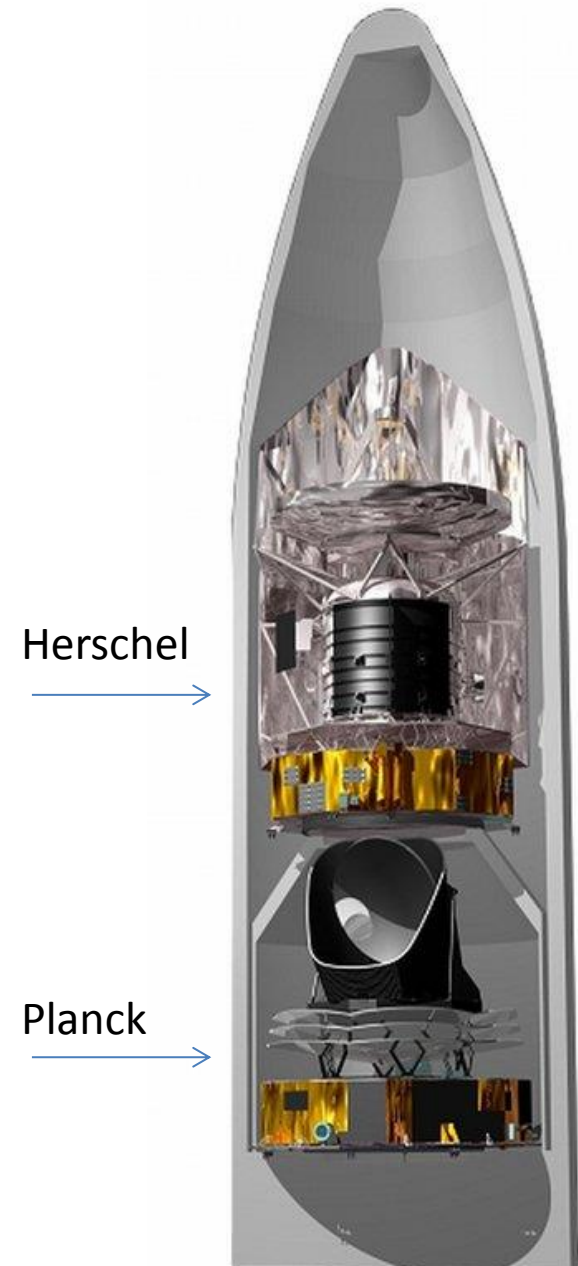
- Planck 1,921 t
- Trägerrakete Ariane 5 ECA
- Centre Spatial Guyanais bei Kourou



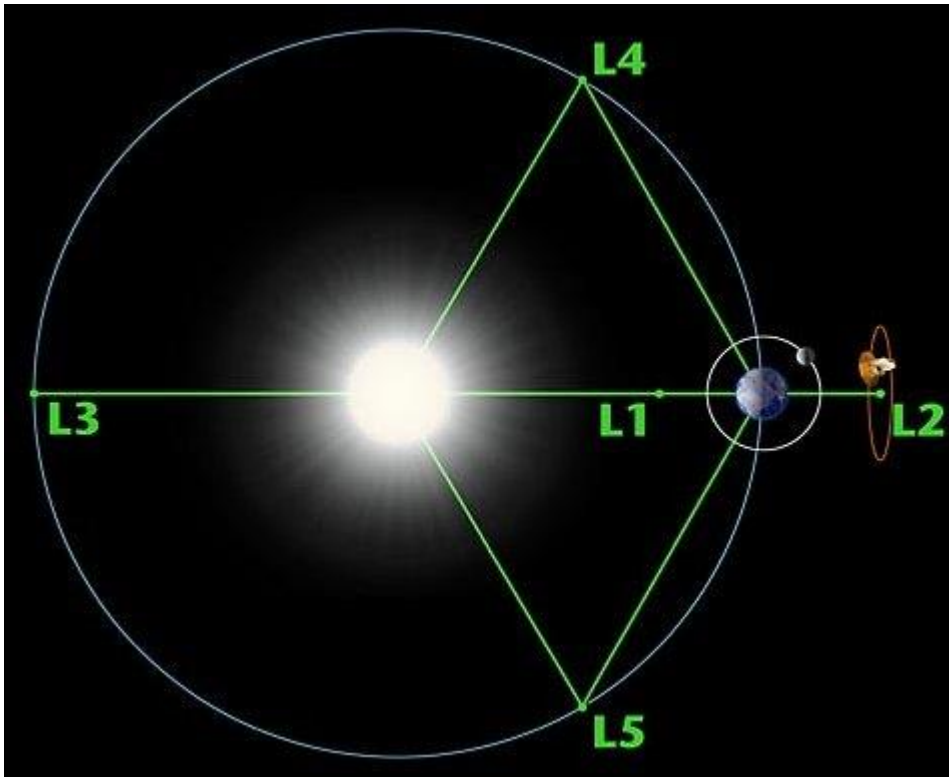
Das Planck Teleskop

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



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

Das Planck Teleskop

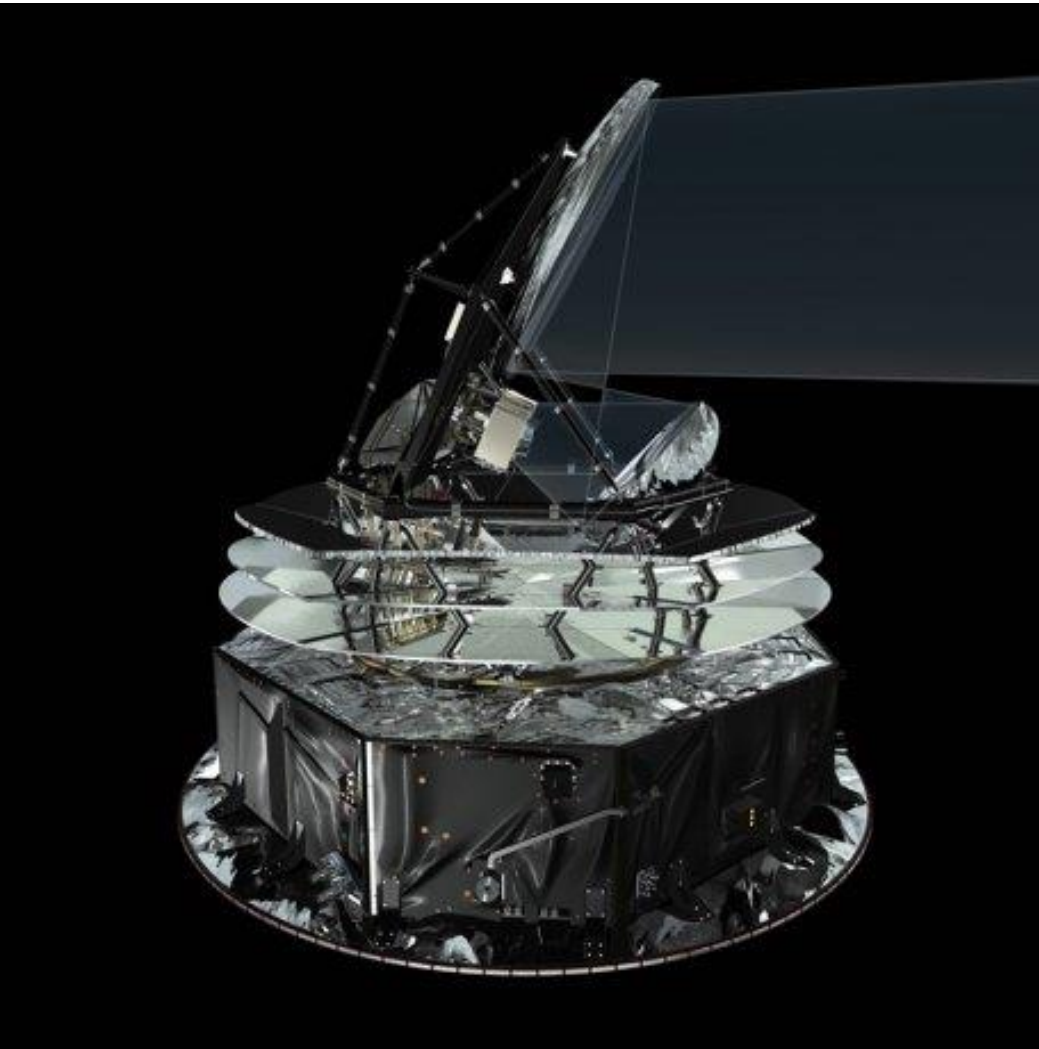


BILD: Der PLANCK-Satellit mit Strahlengang auf Primär- und Sekundärspiegel (Credit: ESA)

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 K erreichbar**

LFI: Kühlung mit Sorptionskühler in geschlossenen Wasserstoff-Kreislauf **auf 20 K**

HFI: zusätzlich geschlossener Helium-Kreislauf auf **4 K**

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

Das Planck Teleskop

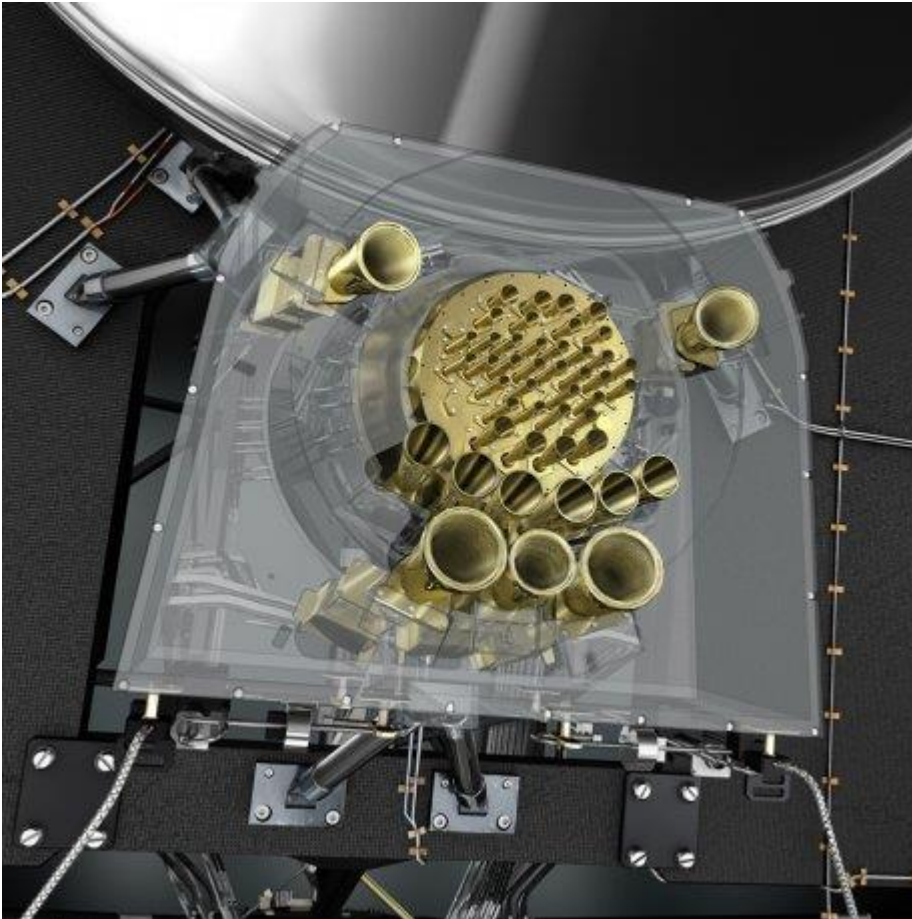
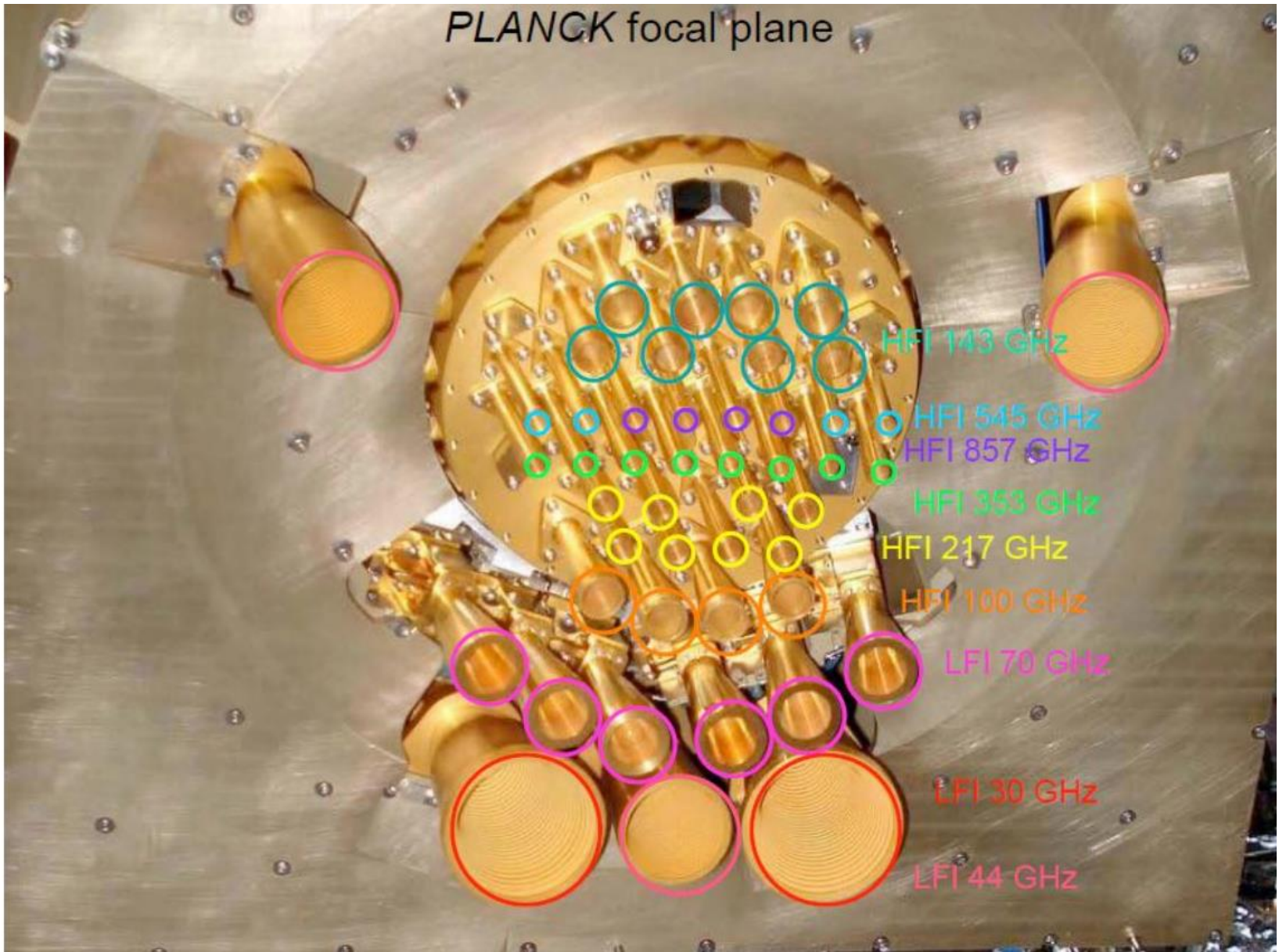


BILD: Ein durchsichtiges Modell des Horn- und Empfängersystems. Die röhrenförmigen Gebilde sind Hornantennen, die für unterschiedliche Frequenzen empfindlich sind. Die großen Hörner gehören zum LFI, die kleinen zum HFI.
(Credit: ESA/AOES Medialab)

- 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

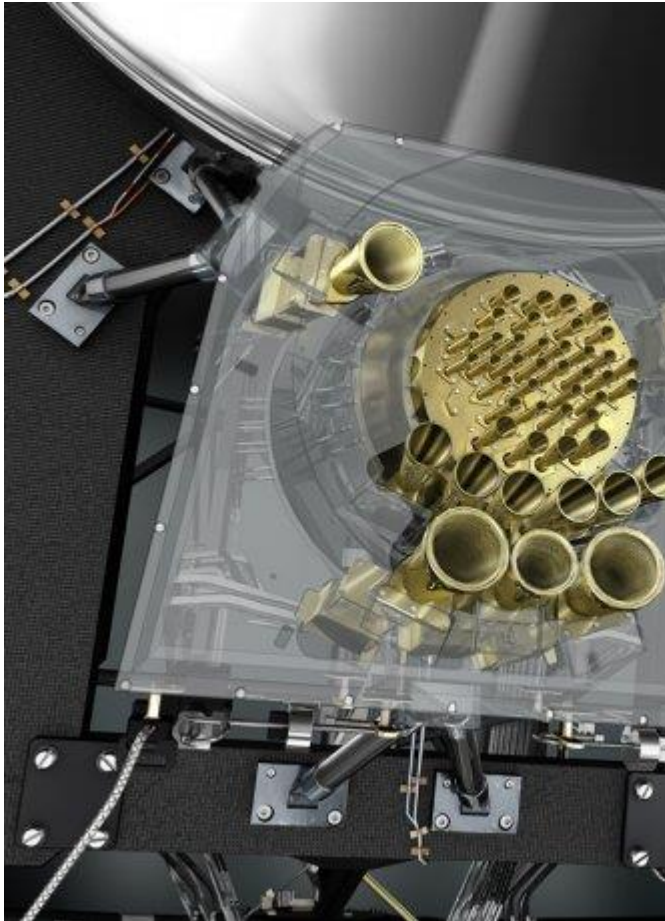
HFI 100 GHz

LFI 70 GHz

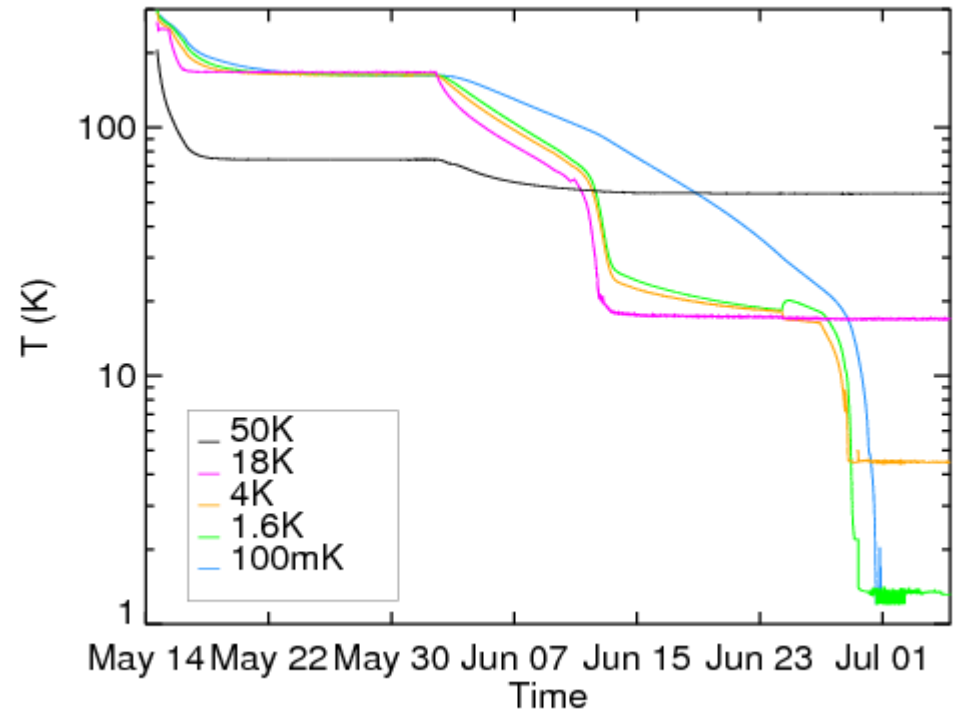
LFI 30 GHz

LFI 44 GHz

Das Planck Teleskop



Kühlkurven



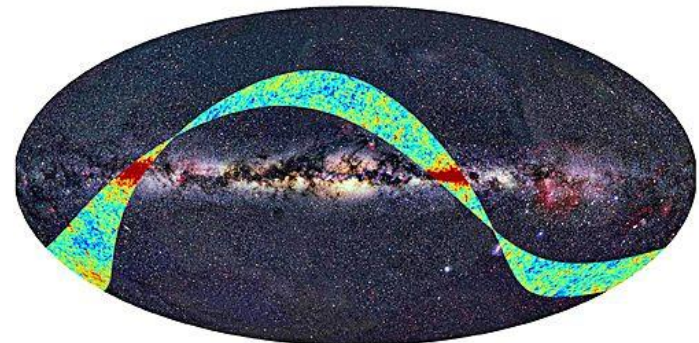
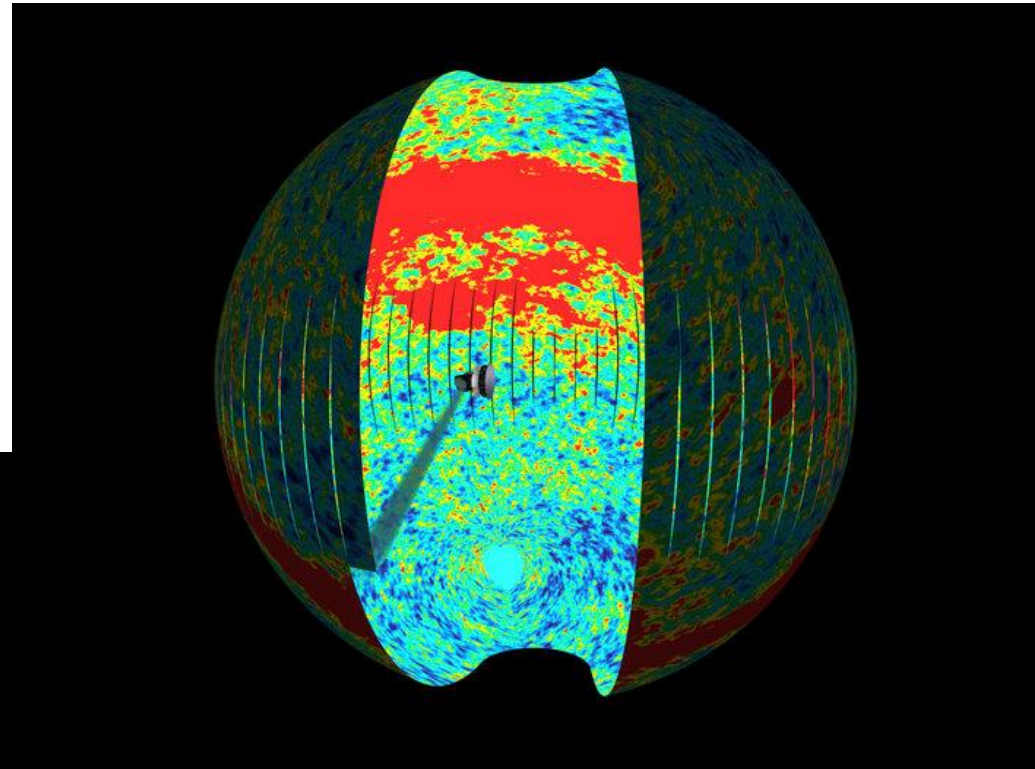
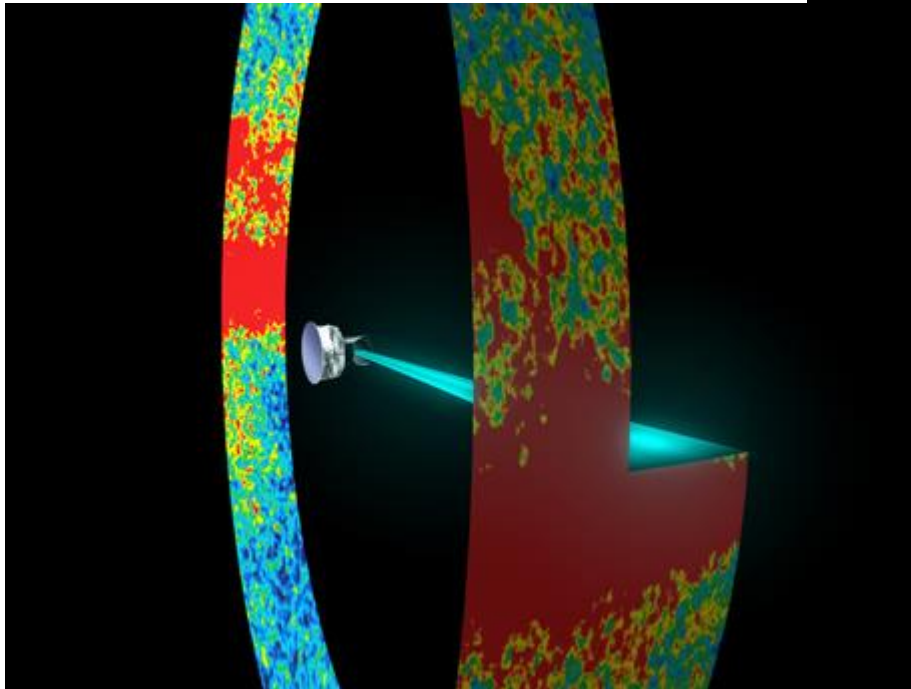
Institut d'Astrophysique Spatiale

1.5 Monate

Das Planck Teleskop

Messverfahren:

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



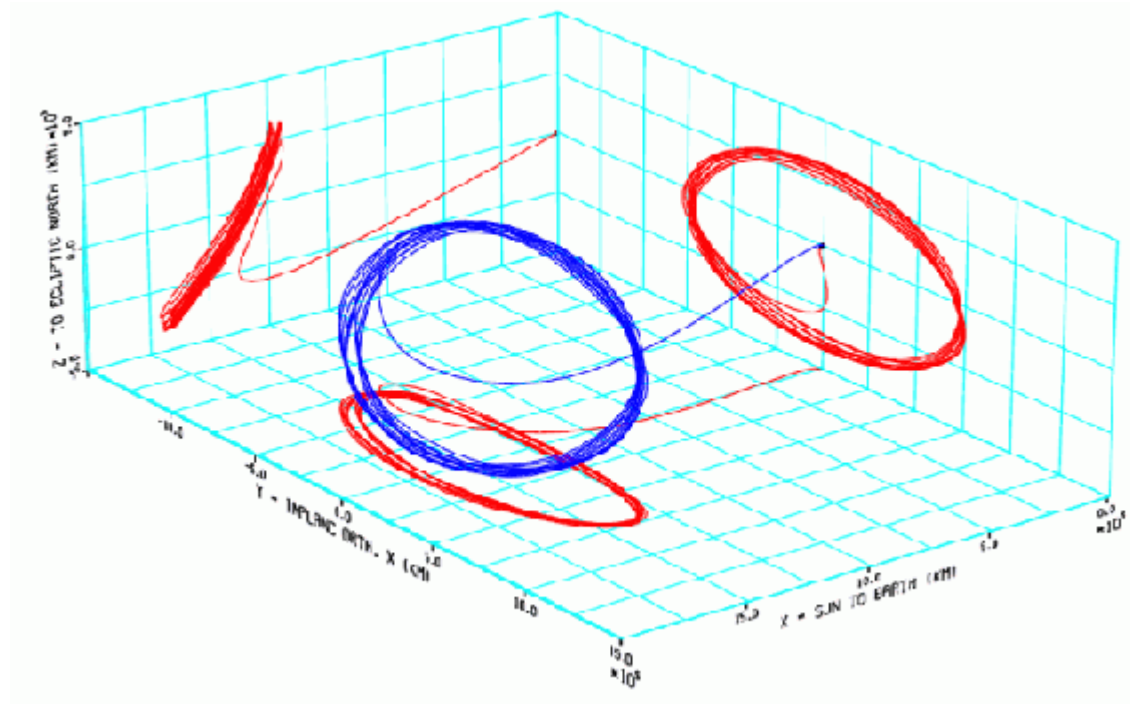
B4: Das Planck Teleskop

„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

Zusatzinformationen

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

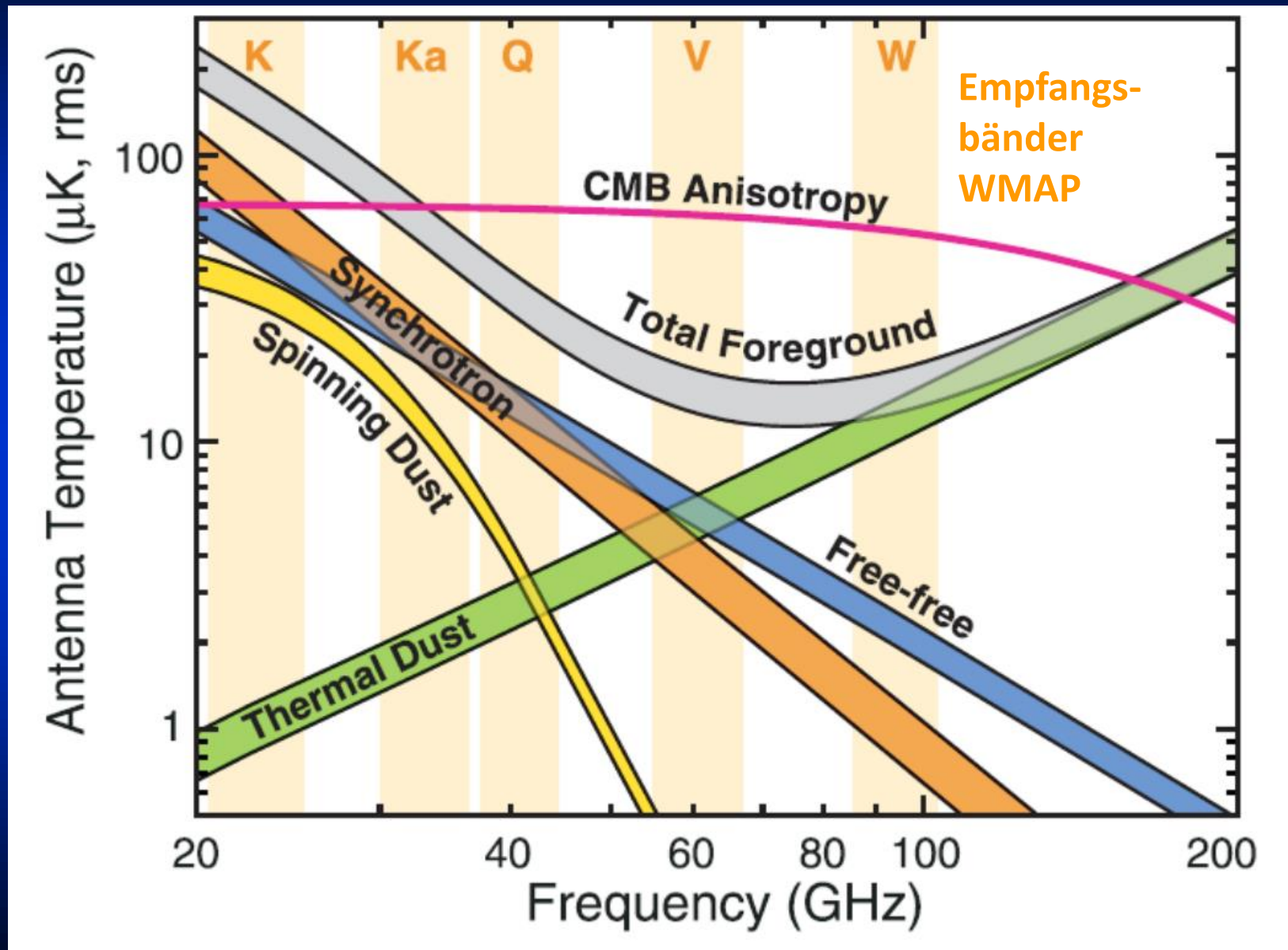
Nachteil:

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

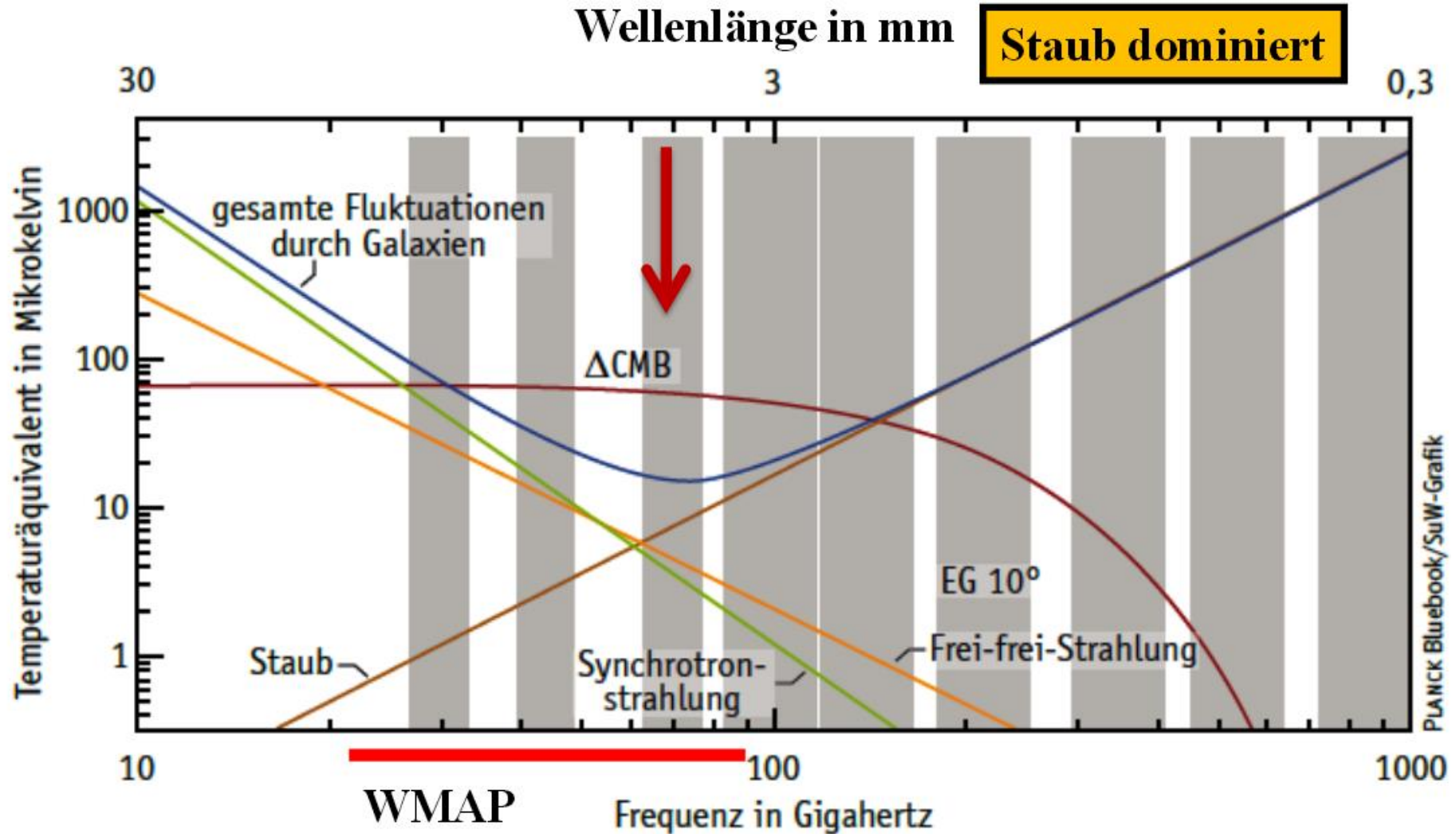
Table 1
 Planck instrument characteristics. The sensitivities (1σ) are goal values for 12 months of integration and for square pixels whose sides are given in the row ‘Angular Resolution’. Polarization measurement at 100 GHz on HFI is waiting for approval (the sensitivity level without polarization measurement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

3 K – Strahlung



3 K – Strahlung



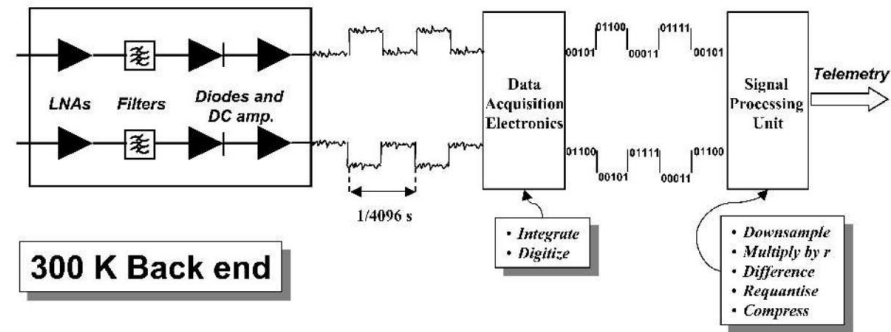
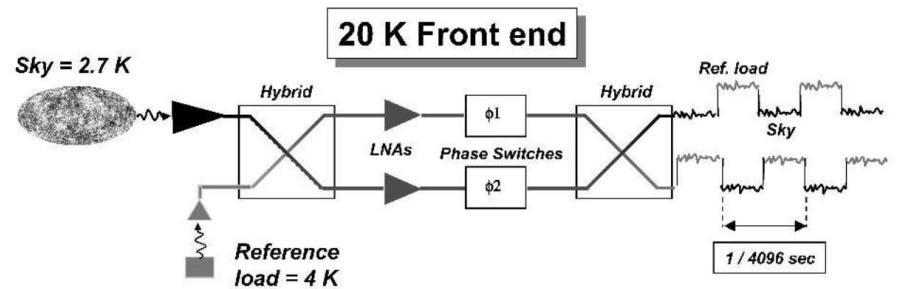
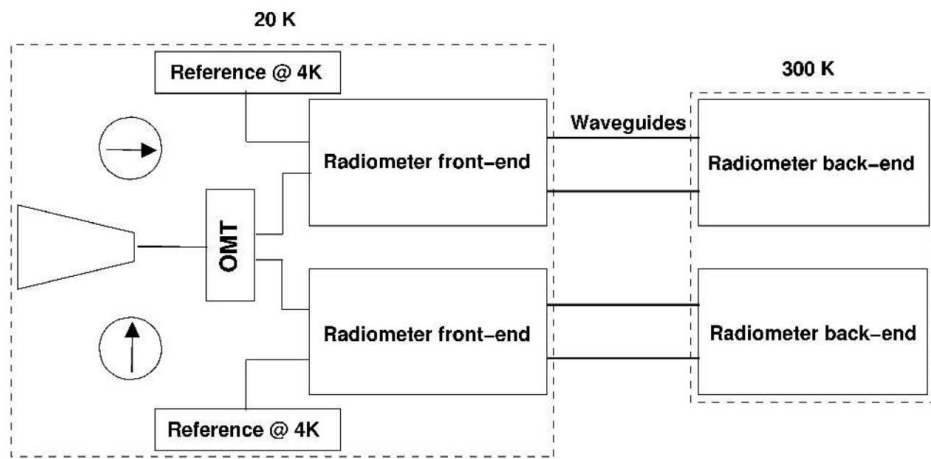
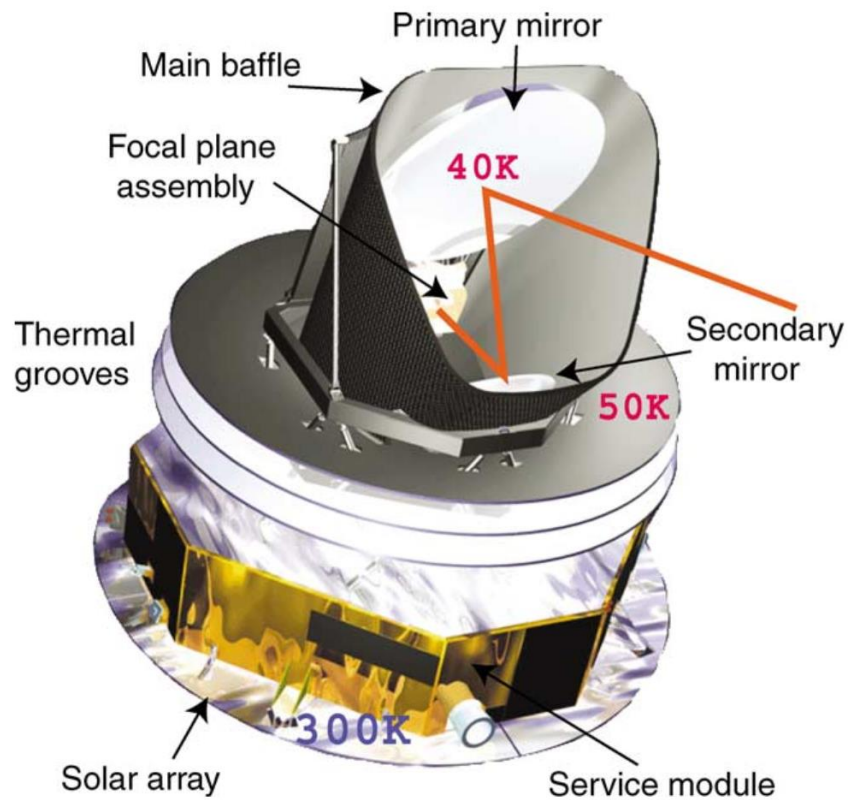


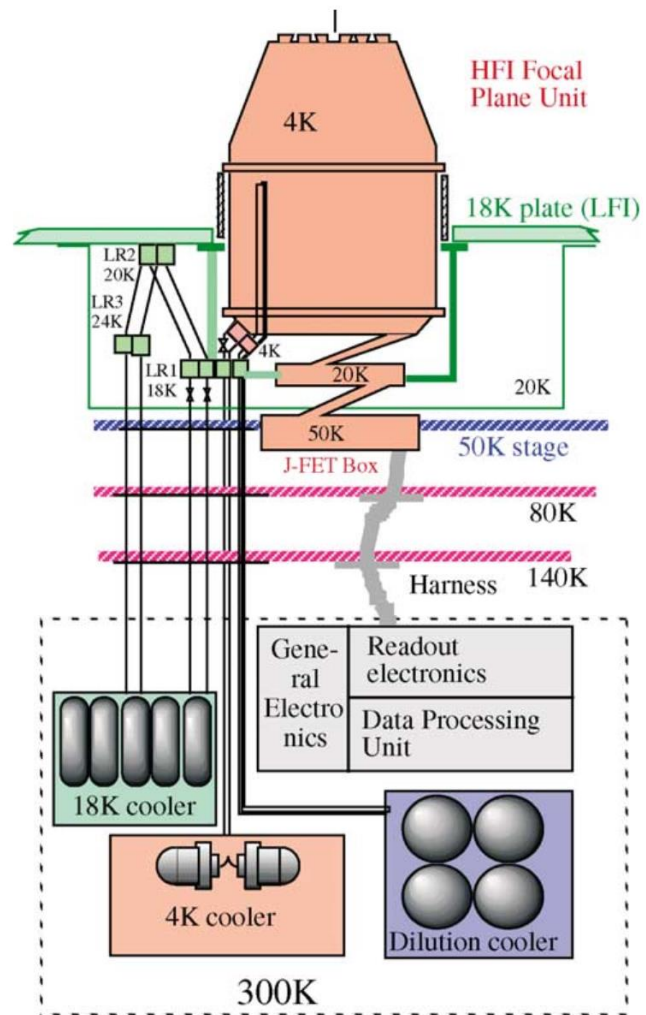
Fig. 1 - *Left*: schematic of the Planck LFI radiometer design. *Right*: detailed view of the front- and back-ends of the LFI receivers

Table 1. Typical values of the susceptibility of LFI radiometers to the major expected systematic effects.

	30 GHz	44 GHz	70 GHz
Susceptibility to front-end thermal fluctuations	0.062 K/K	0.046 K/K	0.03 K/K
Susceptibility to back-end thermal fluctuations	~ 0.003 K/K		
Susceptibility to front-end bias fluctuations	~ 0.009 K/mV		



(a)



(b)

