

Der kosmische Mikrowellenhintergrund - Experimente

Jonas Reubelt

Astro/Teilchen-Seminar SS2011
FAU Erlangen-Nürnberg

Mai 23, 2011

- 1 Einführung
- 2 Experimente
- 3 Messung und Interpretation
- 4 Ausblick

Eigenschaften

- Elektromagnetische Strahlung, stammt aus der Zeit kurz nach dem Urknall
- Strahlung wechselwirkt mit Materie durch Streuprozesse
- ca. 380000 Jahre nach dem Urknall bilden sich Atome und Strahlung und Materie entkoppeln
- Strahlung kühlt sich durch Expansion des Universums ab
- von ca. 3000K bei der Entkopplung bis 2.725K heute
- ca. 400 Photonen pro Kubikzentimeter
- CMB weitgehend isotrop
- Temperaturänderung über Himmelssphäre $\approx 10^{-5}$

Theorie

- theoretische Vorhersage
1946 von George Gamow

Experiment

- zufällige Entdeckung 1965
von Robert Wilson und
Arno Penzias
- u.a. 1978 Nobelpreis für
Physik
- experimentelle
Bestätigung der
Urknalltheorie



Abbildung: [wikipedia.org](https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Wilson) [wilson]

- Abstrahlcharakteristik eines schwarzen Körpers
- Schwarzer Körper steht im thermodynamischen Gleichgewicht mit dem Strahlungsfeld
- beschreibt Abstrahlungsintensität in Abhängigkeit der Frequenz/Wellenlänge
- $$I(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

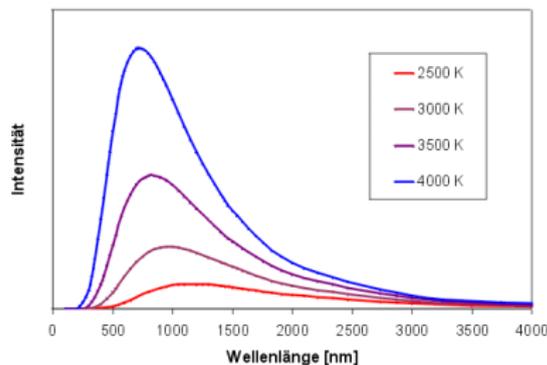


Abbildung:
didaktikchemie.uni-bayreuth.de
[plspect1]

- CMB = bestes bekanntes gemessenes Planckspektrum
- rechts: Spektrum gemessen von COBE
- Fehlerbalken kleiner als verwendete Linienbreite → Universum im Thermodynamischen Gleichgewicht bei der Entkopplung von Strahlung und Materie

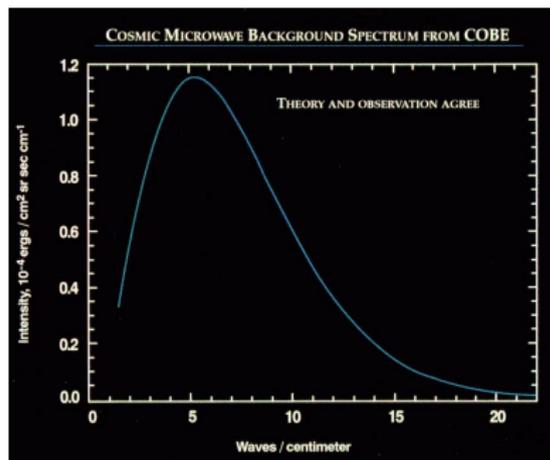


Abbildung: wikipedia.org [plspec2]

WMAP

- The Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
- Satellitenmission der NASA
- Nachfolgemission von COBE
- Start der Mission: 2001
- Ende der Datennahme: 2010
- Ziele: Fundamentale Messungen der Kosmologie

Planck

- Satellitenmission der ESA
- Start: Mai 2009
- Messung der Anisotropien der Kosmischen Hintergrundstrahlung mit erhöhter Messgenauigkeit und Auflösung gegenüber WMAP

- Messung des CMB durch Radiometer in fünf Frequenzbändern
- 23 GHz (K-Band), 33 GHz (Ka-Band), 41 GHz (Q-Band), 61 GHz (V-Band), 94 GHz (W-Band)
- Vorteil: Unterscheidung von Hintergrund- und Vordergrundstrahlung
- erreichbare Empfindlichkeit $\approx 35 \mu K$
- Auflösung: 0.93° (23 GHz) bis 0.23° (94 GHz)
- Polarisationsmessungen möglich

WMAP - Frequenzbänder

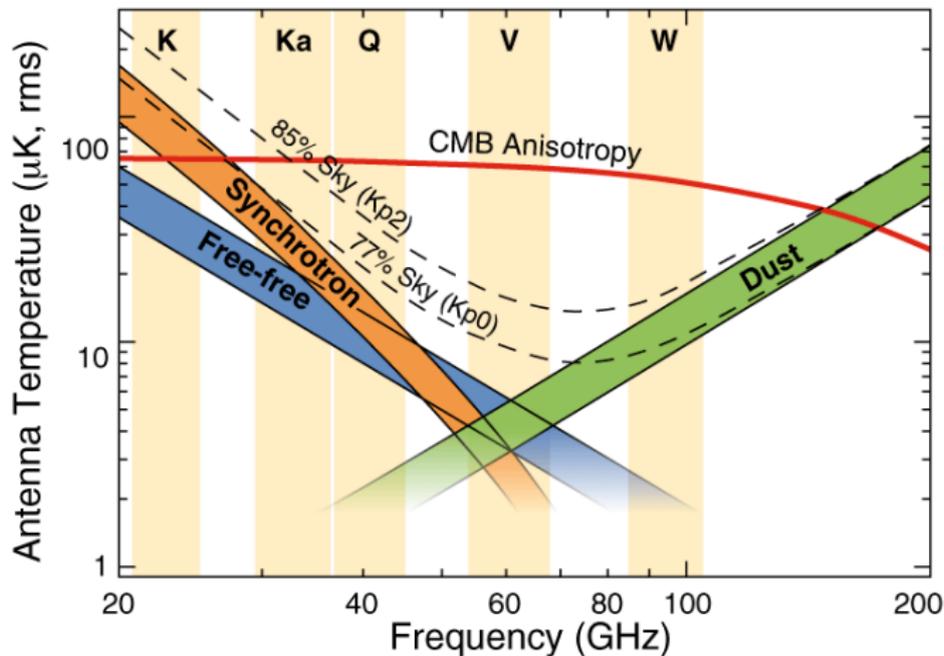


Abbildung: map.gsfc.nasa.gov [freq]

- zweiter Lagrangepunkt des Sonne - Erde Systems
- 1.5 Millionen *km* von Erde entfernt
- stabile Position durch Gleichgewichtspunkt der Gravitationskräfte
- außerhalb störender Strahlung von Sonne und Erde

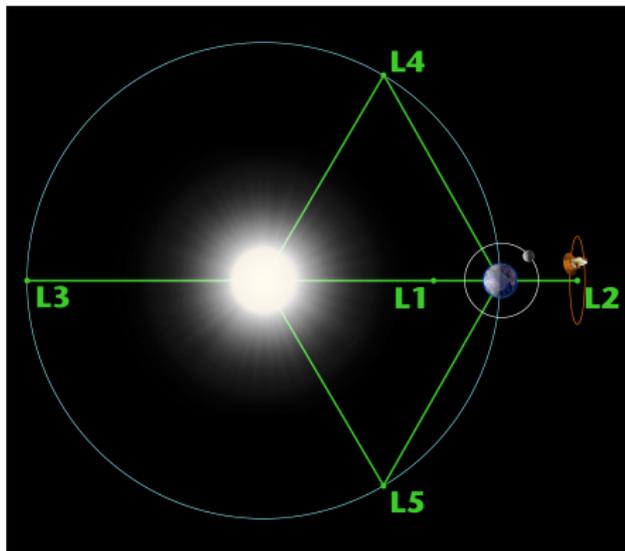


Abbildung: map.gsfc.nasa.gov [orbit]

- Sonnenkollektoren zeigen immer richtung Sonne
- d.h. Messinstrumente immer im Schatten
- primäre und sekundäre Reflektoren führen Radiowellen zur Brennebene
- passive Kühlung durch thermische Abstrahlung auf $< 90K$

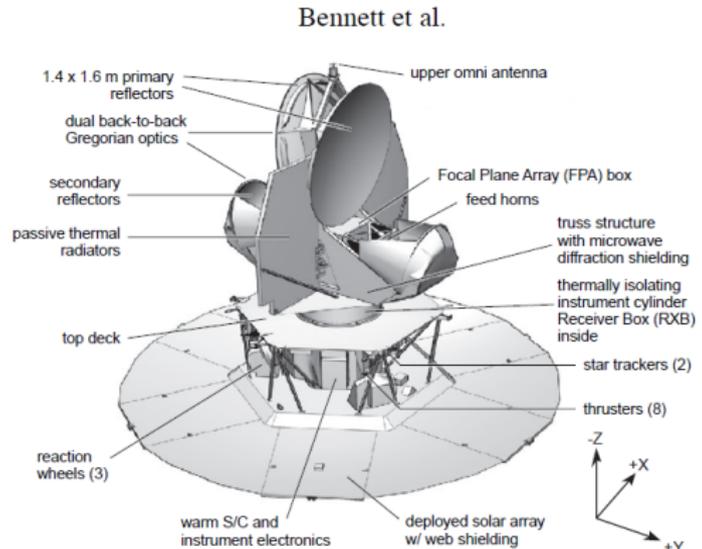


Abbildung: Bennett et al. 2003 [bennet03]

- 10 feed-horns auf beiden Seiten des Detektors mit jeweils mindestens zwei Radiometern
- feed-horns sammeln die von den Reflektoren auf die Brennebene gebündelten Radiowellen
- diese werden dann von den Radiometern gemessen

Bennett et al.

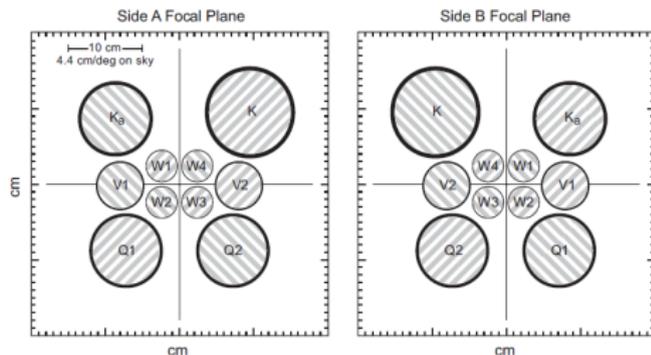


Abbildung: Bennett et al. 2003
[bennet03]

- OMTs (orthomode transducer) spalten Radiowelle in zwei senkrecht zueinander polarisierte Wellen auf → ermöglicht Messung der Polarisation
- Verstärkung des Signals durch HEMT (High Electron Mobility Transistor)

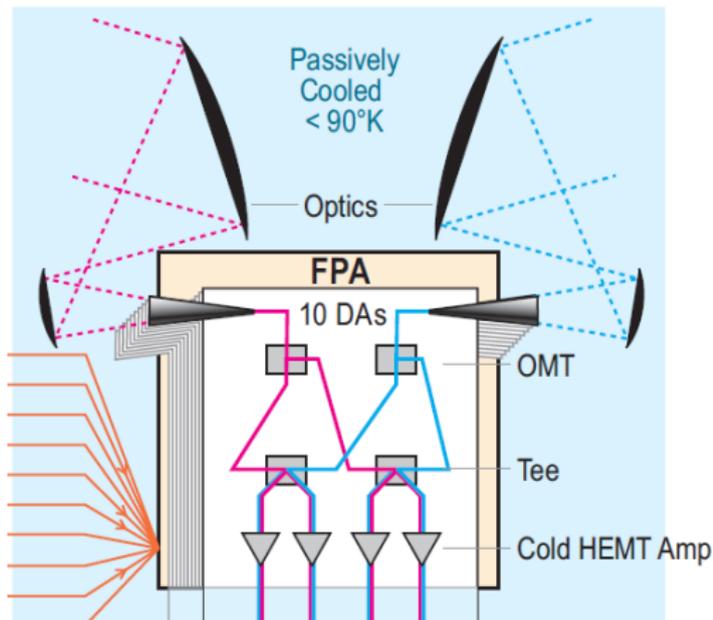


Abbildung: Bennett et al. 2003
[bennet03]

WMAP - Scanvorgang

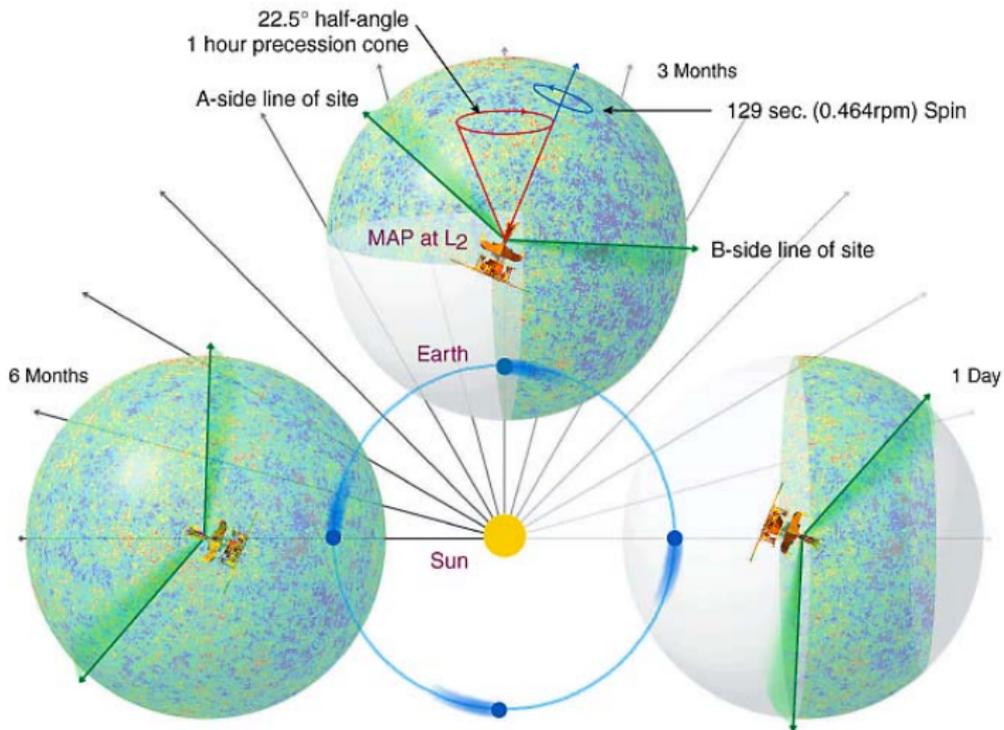


Abbildung: map.gsfc.nasa.gov [scan1]

WMAP - Sky-Coverage

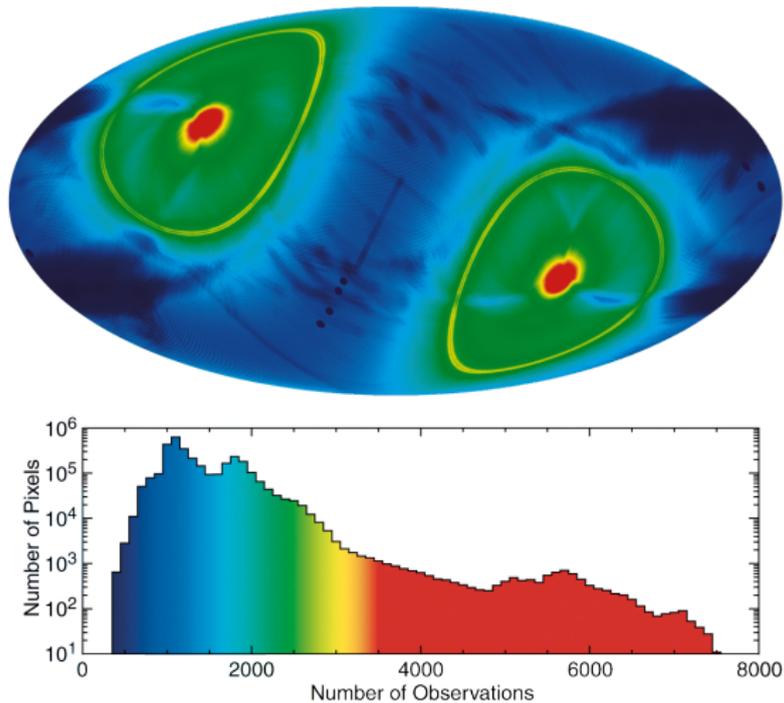


Abbildung: Bennet et al. 2003 [bennet03]

- Messungen mit einer Genauigkeit von $2\mu K$ und einer Auflösung von 5 Bogenminuten
- zwei Dektortypen:
 - LFI (Low Frequency Instrument) mit Radiometern ähnlich wie bei WMAP
 - HFI (High Frequency Instrument) mit Bolometern
- die hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit erfordern sehr niedrige Arbeitstemperaturen für die Detektoren
- passive (wie bei WMAP) und aktive Kühlung durch Kryostate erreichen:
 - $20K$ für LFI
 - $0.1K$ für HFI
- Polarisationsmessungen möglich

- Messinstrument an der Sonne abgewandten Seite
- Schrittweise Abkühlung durch V-grooves
- passive Kühlung durch thermische Abstrahlung (V-grooves, Telescope baffle)
- aktive Kühlung der FPU durch flüssigen Wasserstoff und Helium

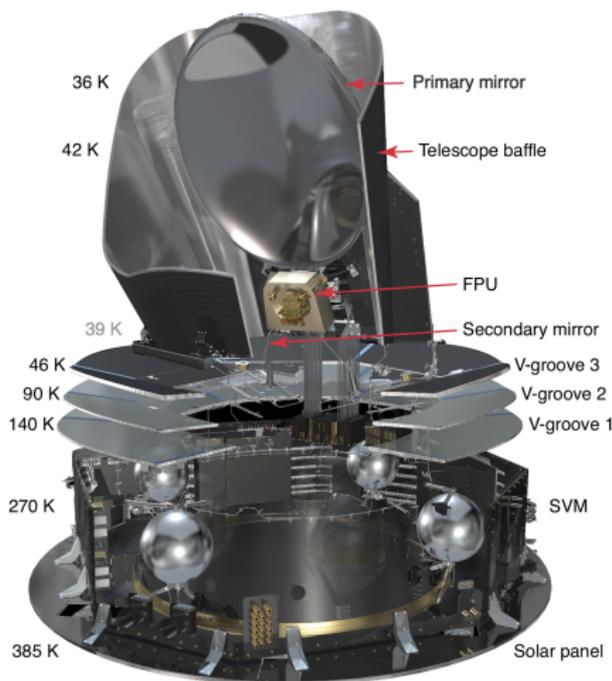


Abbildung: Planck Collaboration 2011
[planck10]

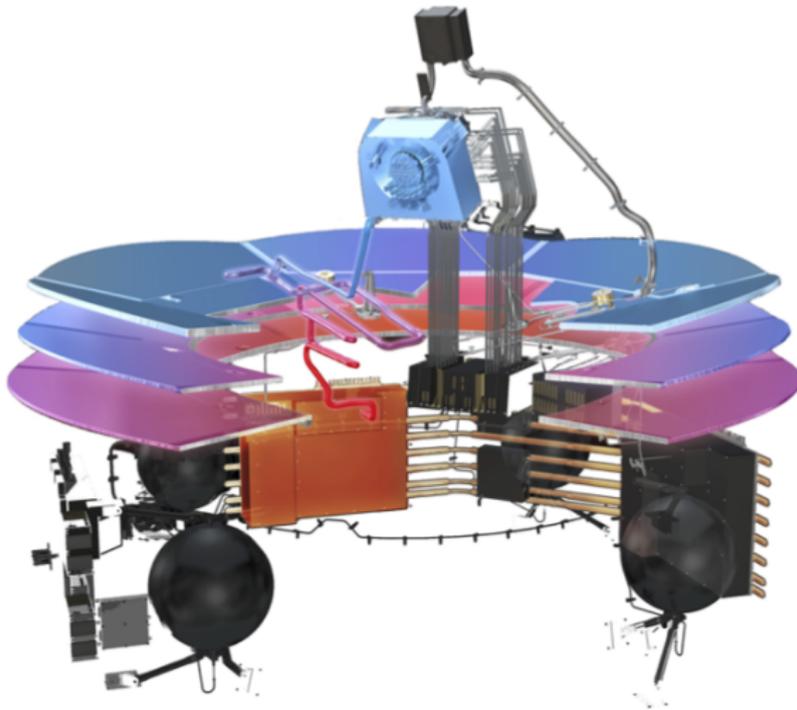


Abbildung: Planck Collaboration 2011 [planck10]

- Teil der FPU (Focal Plane Unit)
- 2 feed-horns bei 30GHz , 3 bei 44GHz , 6 bei 70GHz
- feed-horns leiten Radiowellen zu den Radiometern
- Radiometer gekühlt auf 20K



Abbildung: planck.caltech.edu [lfi]

- OMT hinter dem feed-horn ermöglicht Polarisationsmessung (ähnlich wie bei WMAP)
- reference-horns messen Strahlung von einer 4K Referenzprobe
- sky-signal wird mit Referenzsignal verglichen um Störeinflüsse zu unterdrücken

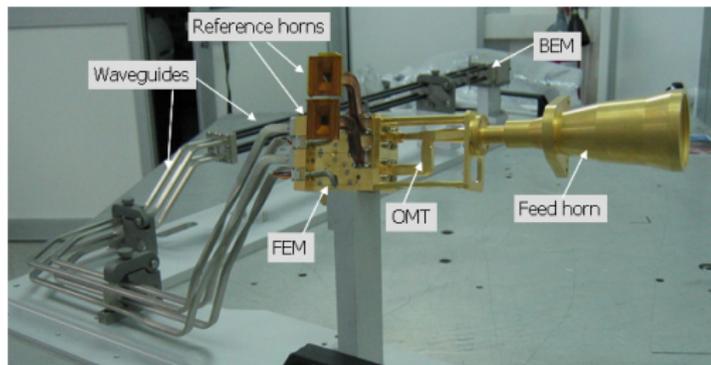


Abbildung: planck.caltech.edu [lfi]

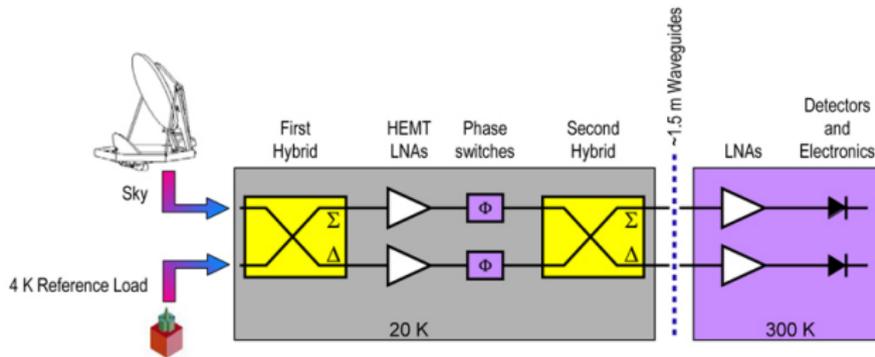


Abbildung: planck.caltech.edu [lfi]

- Detektor Dioden erhalten abwechselnd sky- und Referenzsignale (first, second Hybrid)
- Verstärkung durch LNA HEMPT (Low Noise Amplifier, High Electron Mobility Transistor)

- zweiter Teil der FPU
- 36 feed-horns mit Frequenzen von 100 – 857 GHz
- als Detektoren werden Bolometer benutzt
- Kühlung der Bolometer auf 0.1K

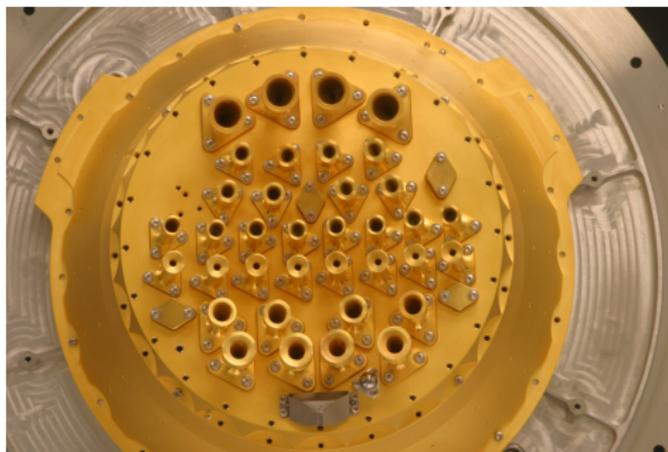


Abbildung: planck.caltech.edu [hfi]

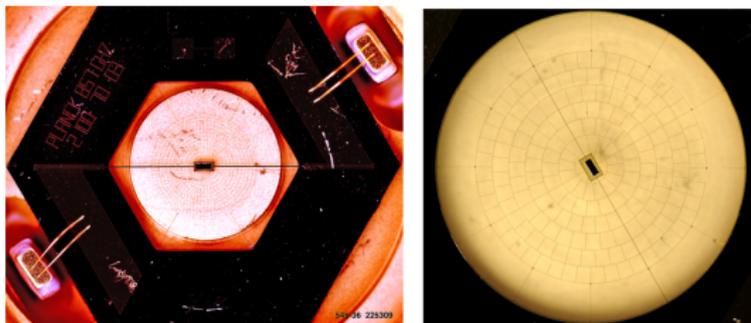


Abbildung: planck.caltech.edu [hfi]

- spiderweb-Bolometer
- Spinnennetzsystem erwärmt sich durch Absorption der Radiowellen
- Thermistor (Wärmewiderstand) in der Mitte verändert seinen Widerstand durch Temperaturänderung
→ messbares Signal

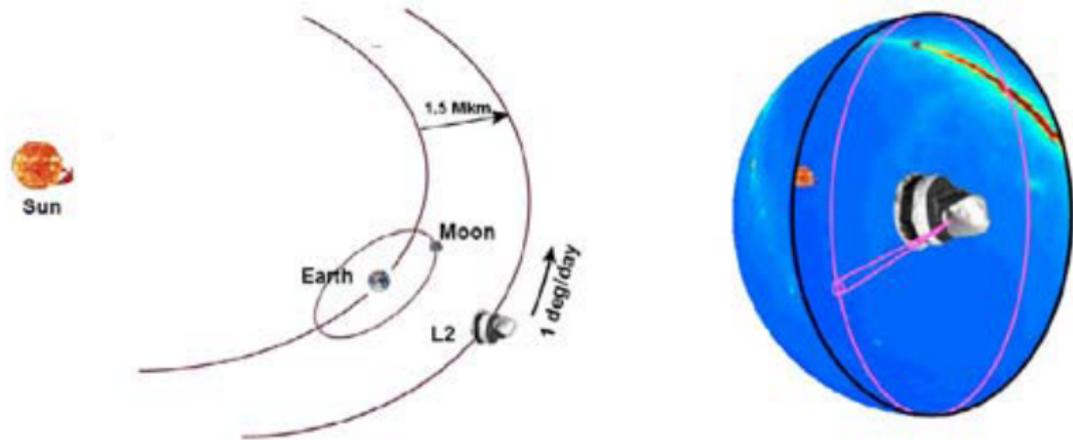


Abbildung: Dupac and Tauber 2005 [dupac05]

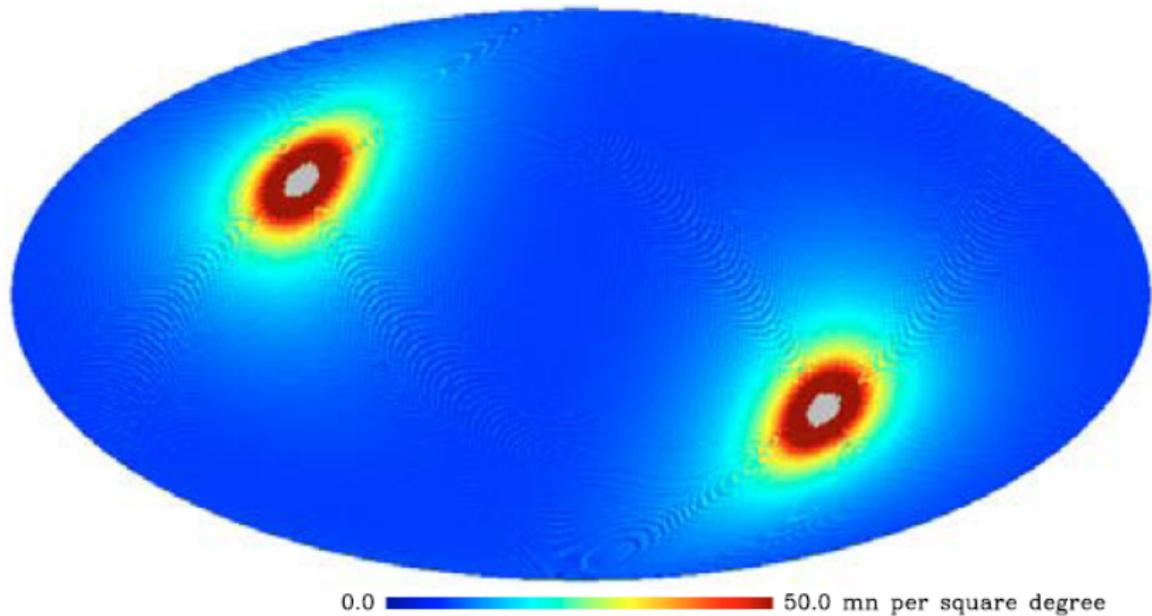


Abbildung: Dupac and Tauber 2005 [dupac05]

- Instrumentelles Rauschen wurde in früheren Messungen am Boden bestimmt
- Signalspitzen z.B. durch Einschläge von kosmischer Strahlung werden durch Mittelungen und Vergleich von mehreren Zyklen minimiert
- Temperaturfluktuationen werden vom Signal getrennt indem es mit dem Signal von dunkel-Bolometern verglichen wird (Planck)
- gain non-linearity wird korrigiert
- Für jeden Messpunkt wird Temperatur bestimmt
→ kombiniere Daten zu kompletten Sky-Maps

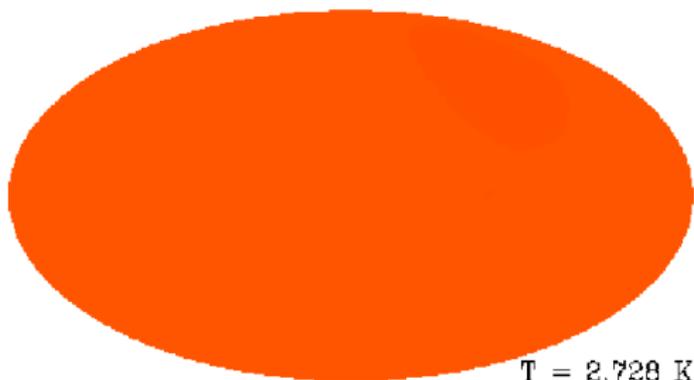


Abbildung: aether.lbl.gov [aether]

- Ergebnis der COBE Mission
- Skala von 0-4K
- Zeigt dass die Kosmische Hintergrundstrahlung fast isotrop ist
- Setze Nullpunkt bei gemessener mittlerer Temperatur, um Anisotropien besser zu erkennen

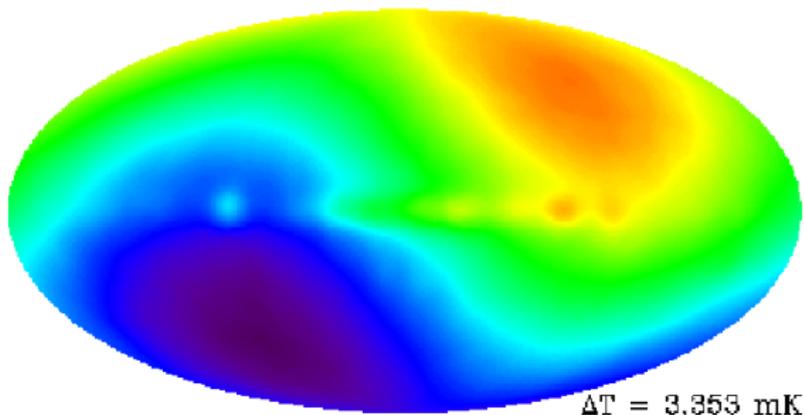


Abbildung: aether.lbl.gov [aether]

- Sky-Map zeigt Doppler-Verschiebung der Frequenz der Strahlung aufgrund der Bewegung des Sonnensystems relativ zum CMB
- Rot \rightarrow wärmer, Blau \rightarrow kälter
- $\Delta T = 3,353 \text{ mK}$

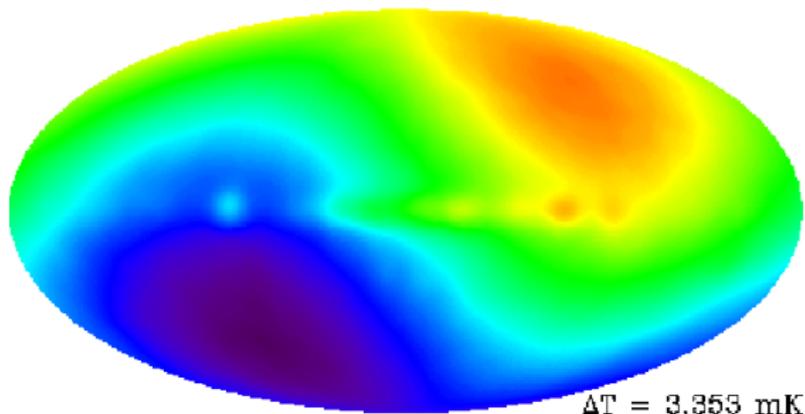


Abbildung: aether.lbl.gov [aether]

- Beobachter bewegt sich in Richtung roter Region relativ zum CMB
 - Zusätzlich: Lokale Gruppe bewegt sich mit etwa 600 km/s in Richtung Hydra Centaurus
- Bereinigung der Daten von diesem Effekt

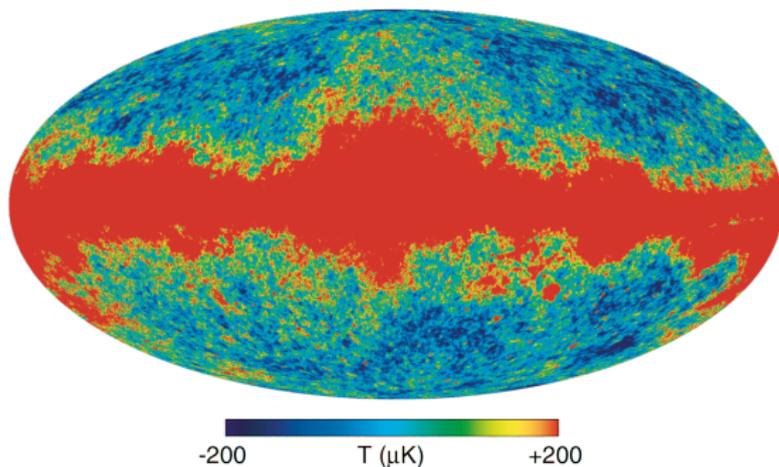


Abbildung: Bennet et al. 2003 [bennet03]

- Ergebnis von WMAP: gemessen mit K-Band Radiometer (23GHz)
- Auffällig: Vordergrundstrahlung auf der galaktischen Ebene

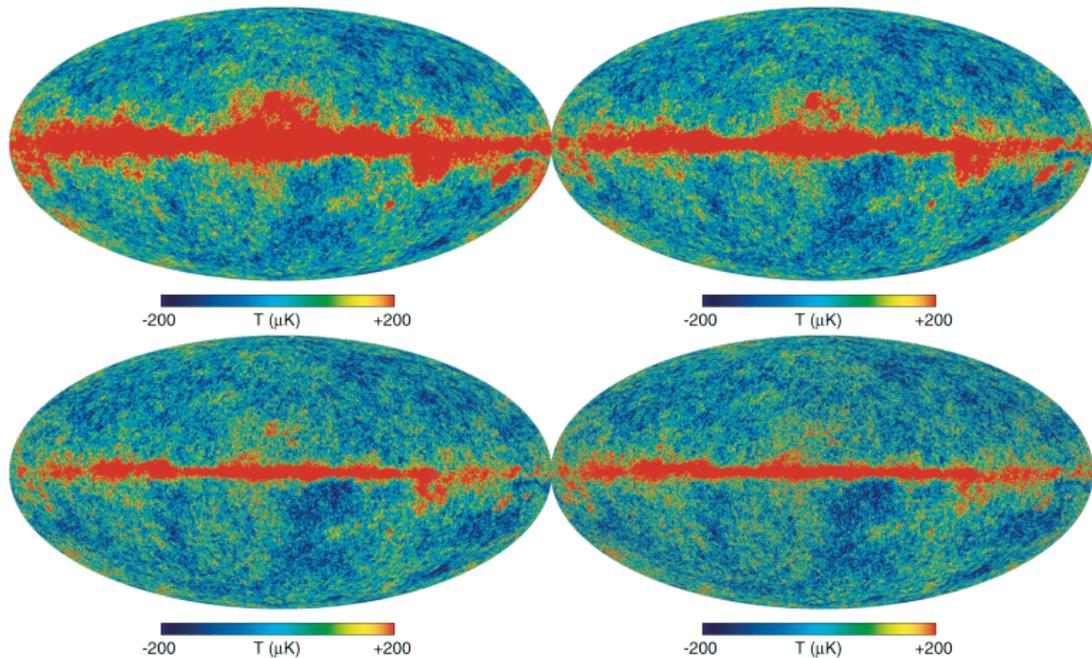


Abbildung: Bennet et al. 2003 [bennet03]

Von l.o. nach r.u.: 33 GHz (Ka), 41 GHz (Q), 61 GHz (V), 94 GHz (W)

Mechanismen

- Synchrotronstrahlung durch galaktische Magnetfelder
- Bremsstrahlung
- thermische Strahlung von Staub

Bereinigung

- galaktischer Vordergrund unterscheidbar vom Kosmischen Hintergrund aufgrund der unterschiedlichen spektralen Verteilung
- Messung in verschiedenen Frequenzbändern zeigt:
Galaktische Emissionen variieren stark mit der Frequenz, während die CMB Anisotropien weitgehend gleich bleiben
→ WMAP Design mit fünf Frequenzbändern kann Vordergrund eliminieren

Map-Making - Frequenzbänder

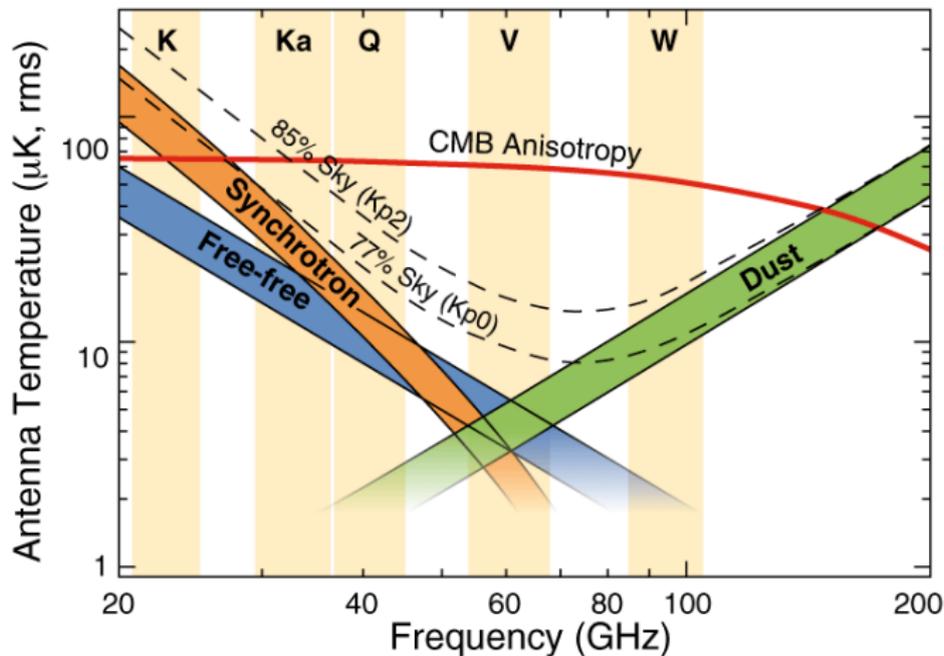


Abbildung: map.gsfc.nasa.gov [freq]

Map-Making - Vordergrundstrahlung

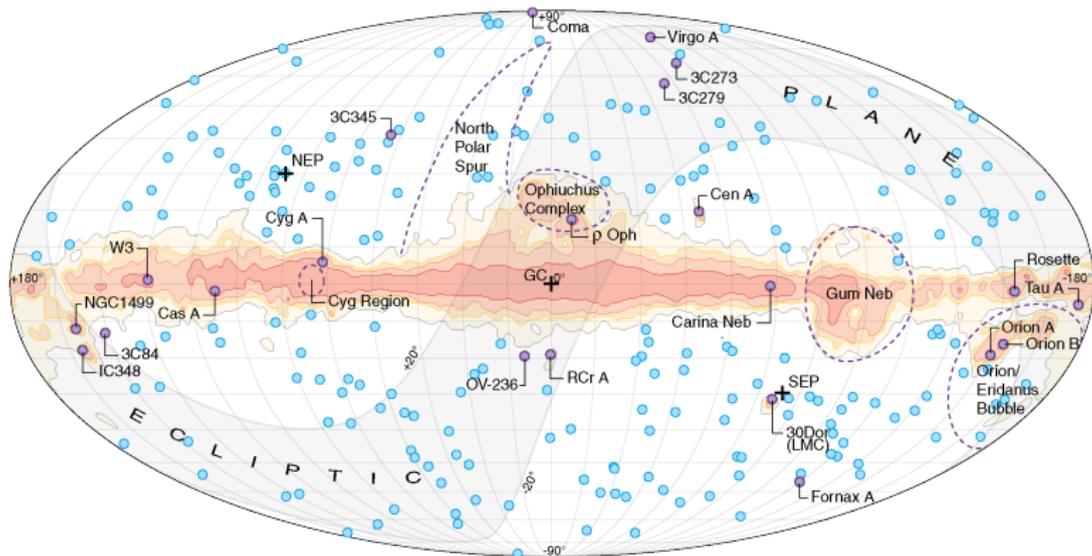


Abbildung: Bennet et al. 2003 [bennet03]

- Galaktische Mikrowellenemission
- Punktquellen

- Sky-Maps zeigen nur Galaktische Vordergrundstrahlung (ohne CMB)
- Oben: Synchrotronstrahlung durch Galaktische Magnetfelder
- Mitte: Bremsstrahlung
- Unten: thermische Strahlung von Staub in der Milchstraße
- logarithmische Skalen in μK

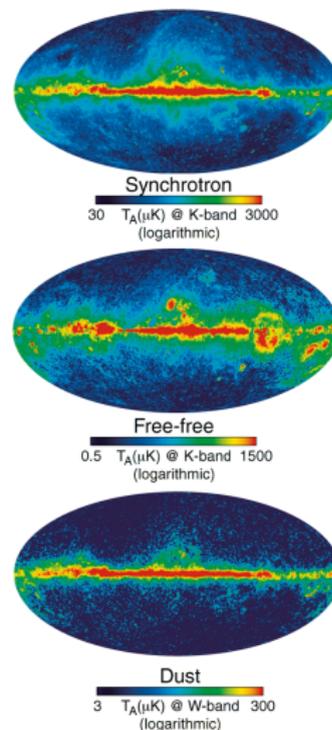


Abbildung: Hinshaw et al. 2007

[hinshaw07]

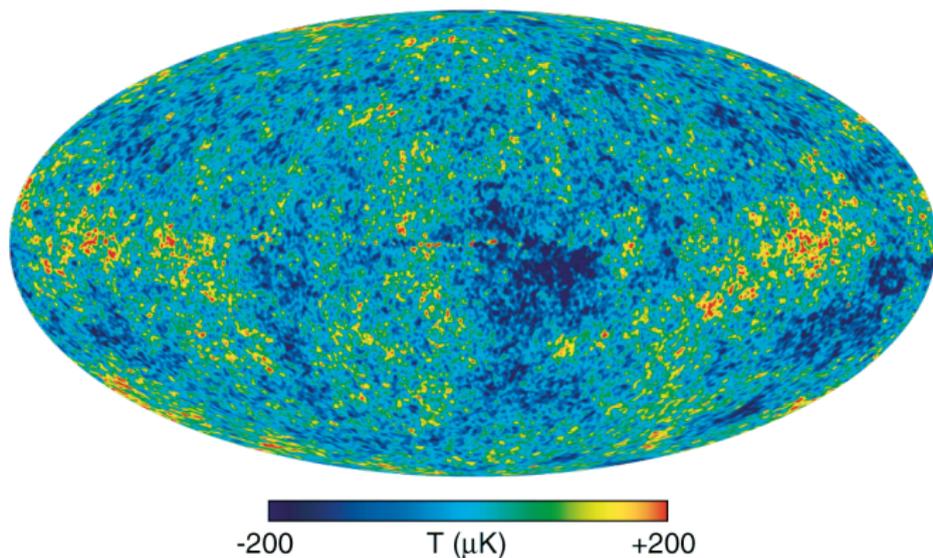


Abbildung: Bennet et al. 2003 [bennet03]

- Linearkombination aller fünf Frequenzbänder
- Gewichtung:
 $0,109(K), -0,684(Ka), -0,096(Q), 1,921(V), -0,250(W)$

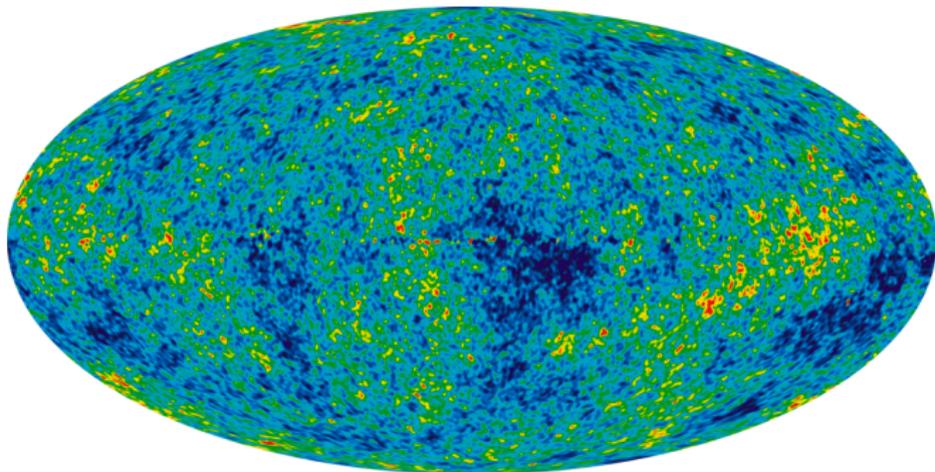


Abbildung: lambda.gsfc.nasa.gov [7year]

- WMAP 7-Year result
- Sky-Map aus 7 Jahren Datennahme

Zur genaueren Untersuchung der Anisotropien:
Messung in beliebiger Himmelsrichtung:

$$\frac{\Delta T}{T_0}(\theta, \phi) = \frac{T(\theta, \phi) - T_0}{T_0} \quad (1)$$

T_0 : mittlere Temperatur des CMB

$\Delta T(\theta, \phi)$: Abweichung abhängig von der Position auf der
Himmelskugel

Entwicklung der Temperaturanisotropien in Kugelflächenfunktionen:

$$\frac{\Delta T}{T_0}(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^{m=+l} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (2)$$

$l = 0$ entspricht der mittleren Temperatur des CMB (wird Null gesetzt)

$l = 1$: Dipolterm beschreibt die Bewegung des Beobachters relativ zum CMB

$l \geq 2$: intrinsische Anisotropien

Angular Power Spectrum:

$$C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle \quad (3)$$

Temperaturfluktuationen der Kosmischen Hintergrundstrahlung:

$$\Delta T = \sqrt{C_l \frac{l(l+1)}{2\pi}} \quad (4)$$

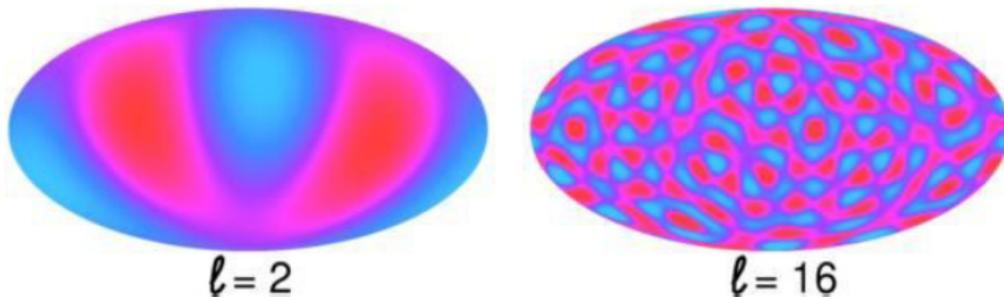


Abbildung: mpa-garching.mpg.de [multipol]

- Veranschaulicht: Schwankungs-Amplituden für $l = 2$ und $l = 16$

Multipolentwicklung - Angular Power Spectrum

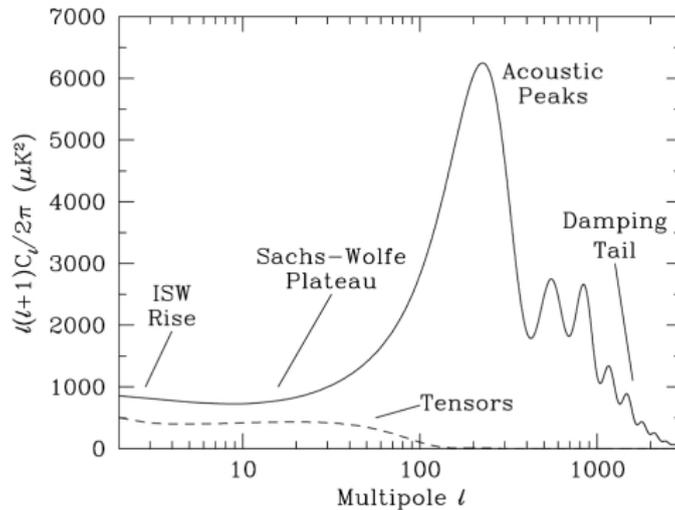


Abbildung: e15.physik.tu-muenchen.de [powerspec1]

- theoretisches Angular Power Spectrum

Multipolentwicklung - Angular Power Spectrum

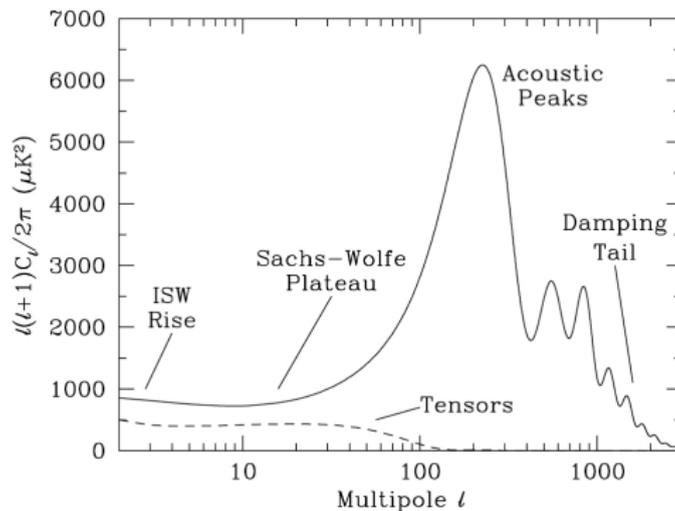


Abbildung: e15.physik.tu-muenchen.de [powerspec1]

- Sachs-Wolfe-Effekt: Energiegewinn der Photonen durch Gravitationspotentiale zum Zeitpunkt der Rekombination
- Sachs-Wolfe-Effekt dominiert auf großen Skalen

Multipolentwicklung - Angular Power Spectrum

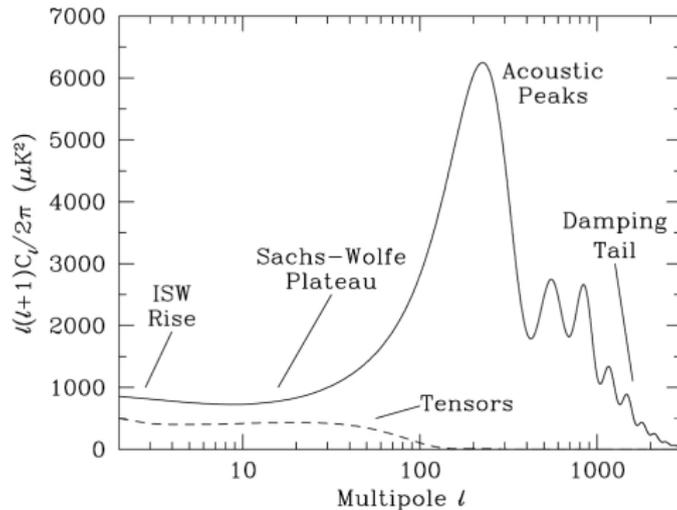


Abbildung: e15.physik.tu-muenchen.de [powerspec1]

- Akustische Oszillationen der Photonen durch Wechselspiel von Gravitation und Strahlungsdruck
- Akustischer Peak bei $l \approx 200$

Multipolentwicklung - Angular Power Spectrum

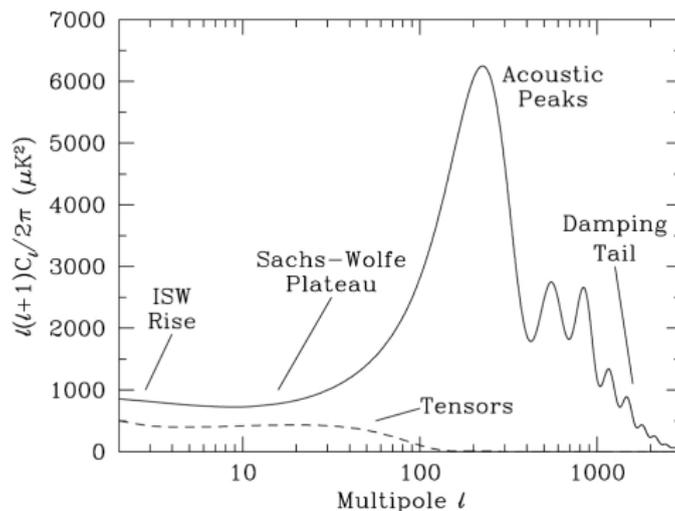


Abbildung: e15.physik.tu-muenchen.de [powerspec1]

- Silk-Dämpfung führt zur Homogenisierung der Kosmischen Hintergrundstrahlung
- Photonen Strahlungsdruck verhindert Klumpenbildung der Baryonischen Materie

Multipolentwicklung - Angular Power Spectrum

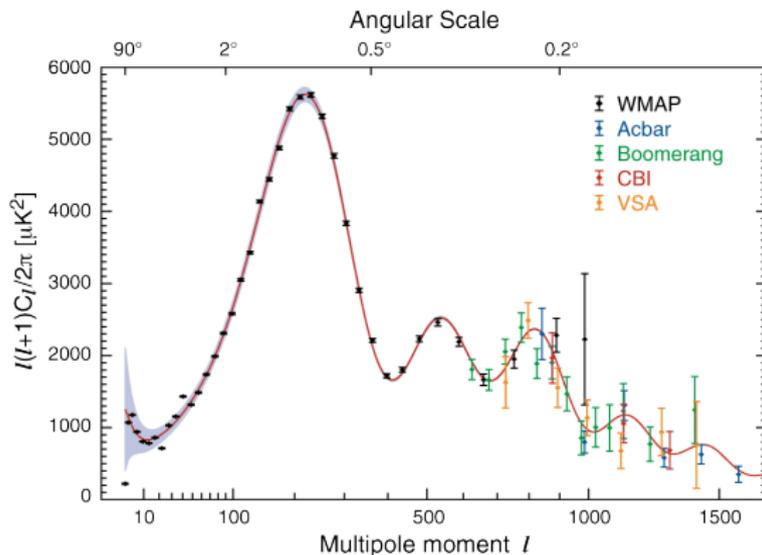


Abbildung: Hinshaw et al. 2007 [hinshaw07]

- Kurve Hängt ab von Kosmologischen Parametern
- Bestimmung der Parameter durch Fit der Kurve an Messdaten

Entstehung der Polarisation

- Quadrupol-Anisotropie verursacht Netto-Polarisation der Strahlung

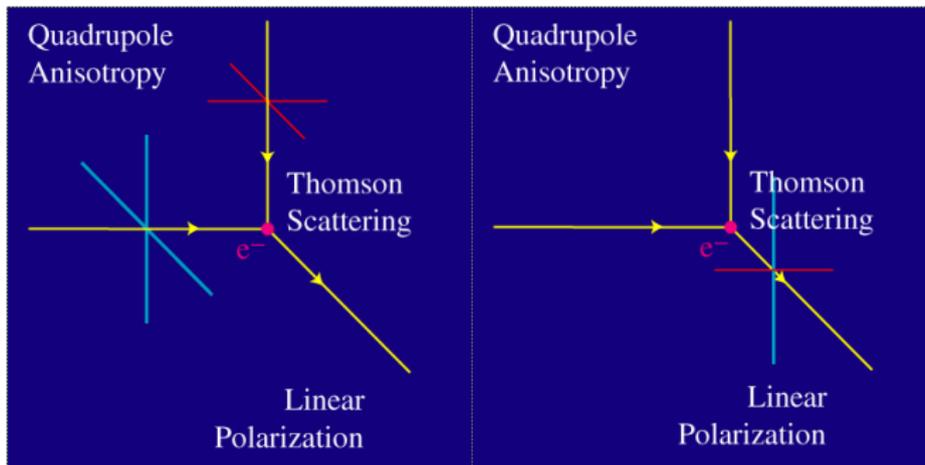


Abbildung: cosmology.berkeley.edu [berkeley]

Mechanismen

- Dichteschwankungen erzeugen wärmere und kältere Regionen
→ Plasma fließt von warm nach kalt und erzeugt Blauverschiebung der Strahlung
- Verwirbelungen im Plasma verursachen Doppler Verschiebungen
- Gravitationswellen dehnen und quetschen den Raum in orthogonaler Richtung
→ Wellenlängen der Photonen verändern sich in gleicher Weise

Polarisationsarten

- E-Mode: Dichteschwankungen und Gravitationswellen
- B-Mode: Verwirbelungen und Gravitationswellen

Polarisationsgrad

- Plasma musste optisch dünn werden um Photonen aus Regionen mit unterschiedlicher Temperatur mit dem gleichen Elektron wechselwirken zu lassen
- aber: es musste noch genügend freie Elektronen geben
- Polarisation der Strahlung nur in kurzem Zeitraum während der Rekombinationsphase möglich
- Nur etwa 5% der Kosmischen Hintergrundstrahlung polarisiert

Messung

- Messung der Polarisation durch Orthomode Transducer
- Signal besteht aus drei Stokes Parametern

$I_t = \langle E_x^2 + E_y^2 \rangle$: Intensität

$Q_t = \langle E_x^2 - E_y^2 \rangle$, $U_t = \langle 2E_x E_y \cos(\delta) \rangle$: Polarisation

δ : Phase zwischen E_x und E_y

Polarisation - Sky-Maps

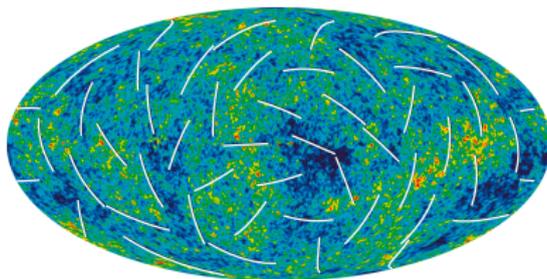
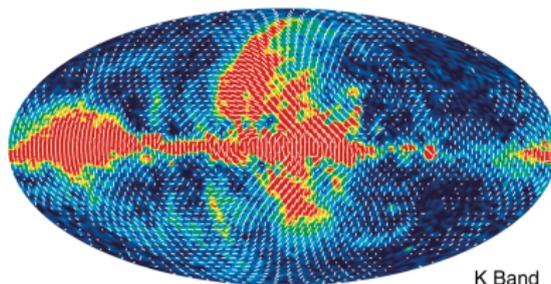


Abbildung: map.gsfc.nasa.gov [pol]



0 T(μ K) 50

Abbildung: Page et al. 2007 [page07]

Polarisation - Angular Power Spectrum

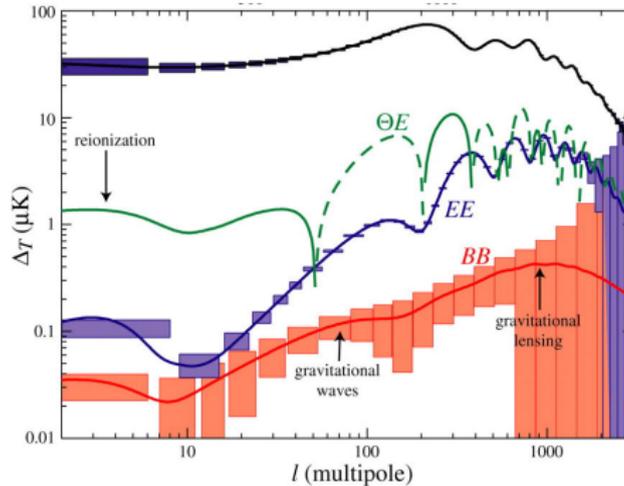


Abbildung: cosmology.berkeley.edu [berkeley]

- theoretisches Angular Power Spectrum

Polarisation - Angular Power Spectrum

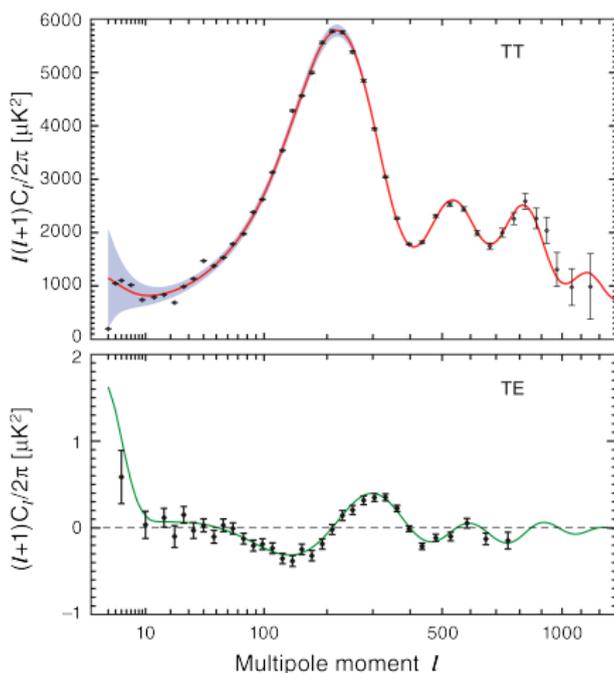


Abbildung: Jarosik et al. 2011 [jarosik11]

$$C_l^{TT} \delta_{ll'} \delta_{mm'} = \langle T_{lm}^* T_{l'm'} \rangle, C_l^{TE} \delta_{ll'} \delta_{mm'} = \langle T_{lm}^* E_{l'm'} \rangle$$

Auflösung und Sensitivität

- WMAP: Auflösung: $\approx 0,5^\circ$, Sensitivität: $\approx 35\mu K$
- Planck: Auflösung: ≈ 5 Bogenminuten, Sensitivität: $\approx 2\mu K$
→ 6-fach verbesserte Auflösung und 17,5-fache Sensitivität
→ detailliertere Messung der Anisotropien auf höher aufgelösten Sky-Maps

Verbesserte Kühlung

- WMAP Betriebstemperatur: $\approx 90K$
- Planck Betriebstemperatur: $\approx 20K$ (LFI), $\approx 0,1K$ (HFI)
→ starke Verringerung des thermischen Rauschens

Vordergrund Eliminierung

- Planck: größere Anzahl von Frequenzbändern (insbesondere bis 800GHz) zur besseren Charakterisierung der Galaktischen Emission und Punktquellen

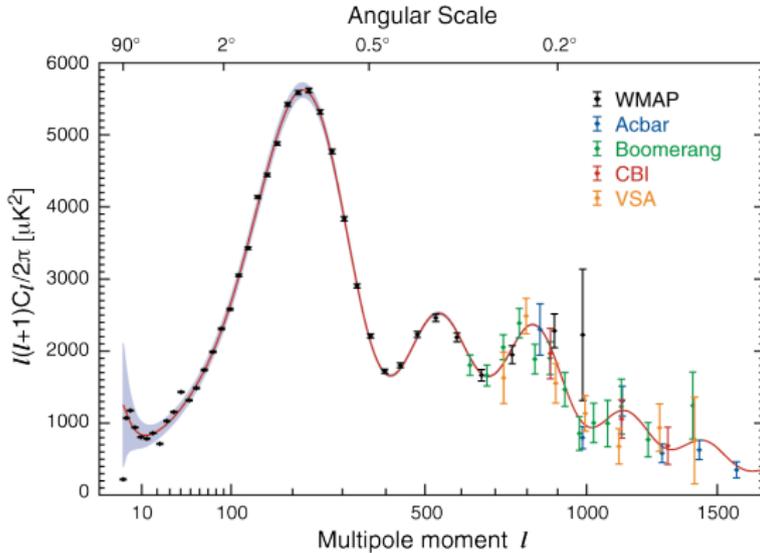


Abbildung: Hinshaw et al. 2007 [hinshaw07]

Erwartungen an Planck: Messungen der Anisotropien bei großen Multipolmomenten mit relativ geringen Fehlern

A Tribute to Stephen Hawking

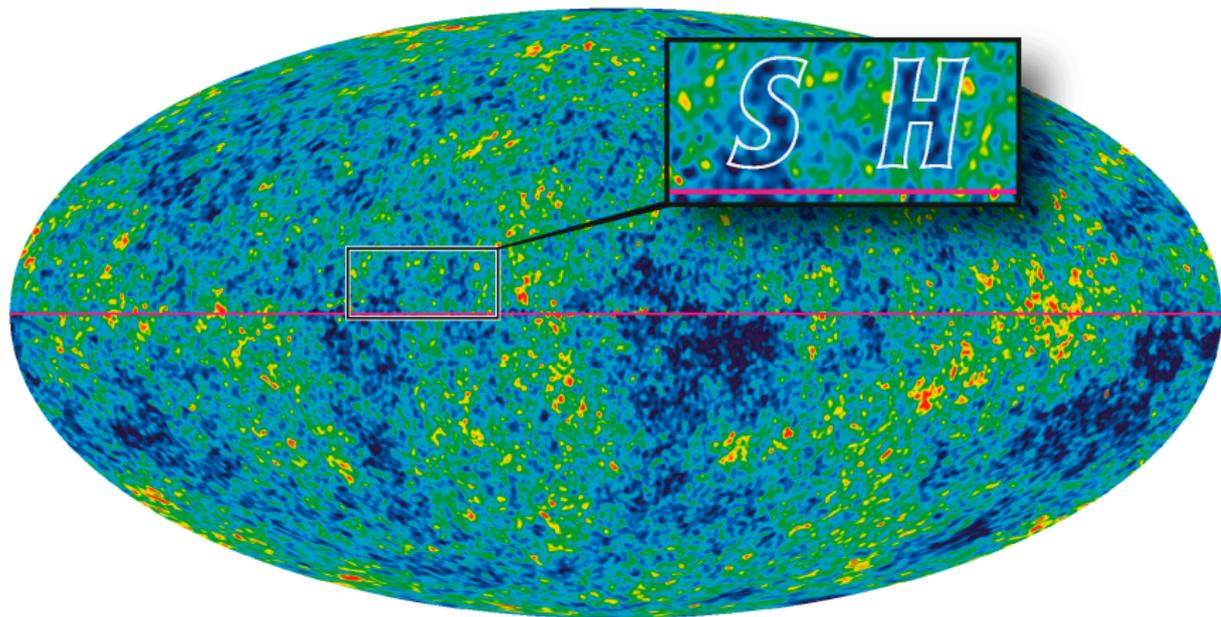


Abbildung: lambda.gsfc.nasa.gov [sh]

- <http://map.gsfc.nasa.gov/>
- <http://lambda.gsfc.nasa.gov>
- <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=planck>
- <http://planck.caltech.edu>
- http://www.mpifr-bonn.mpg.de/public/Dir_Bjoern/CMB1.html
- <http://eeh06.physik.hu-berlin.de>
- <http://www.mpa-garching.mpg.de/lectures/EinfuehrungAW/LargeScale.pdf>
- http://astro.uni-frankfurt.de/pre2009_files/AstroTage2006/Der_CMB.pdf
- <http://web.physik.rwth-aachen.de/cmsmgr/analysis/talks/literaturseminar1inn.pdf>
- <http://cosmology.berkeley.edu/yuki/CMBpol/CMBpol.htm>
- <http://background.uchicago.edu/whu/araa/node4.html>
- http://www.wissenschaft-online.de/astrowissen/lexdt_h04.html
- WMAP Science Team Publications
- Planck Early Results Papers

- [wilson] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wilson_penzias200.jpg
[plspec1] <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/gluehlampen/planck2.gif>
[plspec2] http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Firas_spectrum.jpg&filetimestamp=20070104154124
[freq] <http://map.gsfc.nasa.gov/media/070961/070961Ab.png>
[orbit] <http://map.gsfc.nasa.gov/media/990528/index.html>
[bennet03] Bennet et al. 2003: First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basic Results
[scan1] <http://map.gsfc.nasa.gov/media/ContentMedia/990159b.jpg>
[planck10] Planck Collaboration 2011: Planck Early Results: The thermal performance of Planck
[lfi] <http://planck.caltech.edu/lfi.html>
[hfi] <http://planck.caltech.edu/hfi.html>
[dupac05] Dupac & Tauber 2005: Scanning strategy for mapping the Cosmic Microwave Background anisotropies with Planck
[aether] http://aether.lbl.gov/www/projects/cobe/COBE_Home/m_d_53s_1111.gif
[hinshaw07] Hinshaw et al. 2007: Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Temperature Analysis

[7year] [http :](http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/map_images/ilc7yr_gal_moll1024.png)

[//lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/map_images/ilc7yr_gal_moll1024.png](http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/map_images/ilc7yr_gal_moll1024.png)

[multipol]

[http : //www.mpa – garching.mpg.de/lectures/EinfuehrungAW/LargeScale.pdf](http://www.mpa-garching.mpg.de/lectures/EinfuehrungAW/LargeScale.pdf)

[powerspec1] [http : //www.e15.physik.tu –](http://www.e15.physik.tu-muenchen.de/fileadmin/downloads/seminars/0708astroteilchen/cmb.pdf)

[muenchen.de/fileadmin/downloads/seminars/0708astroteilchen/cmb.pdf](http://www.e15.physik.tu-muenchen.de/fileadmin/downloads/seminars/0708astroteilchen/cmb.pdf)

[berkeley] [http : //cosmology.berkeley.edu/ yuki/CMBpol/CMBpol.htm](http://cosmology.berkeley.edu/yuki/CMBpol/CMBpol.htm)

[pol] [http : //map.gsfc.nasa.gov/media/060917/index.html](http://map.gsfc.nasa.gov/media/060917/index.html)

[page07] Page et al. 2007: Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

(WMAP) Observations: Polarization Analysis

[jarosik11] Jarosik et al. 2011: Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy

Probe (WMAP) Observations: Sky Maps, Systematic Errors, and Basic Results

[sh] [http :](http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/pub_papers/sevenyear/anomalies/images/)

[//lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/pub_papers/sevenyear/anomalies/images/](http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/pub_papers/sevenyear/anomalies/images/)