

# Neues vom Urknall: Planck-Satellit misst die kosmische Hintergrundstrahlung

Georg Wolschin

Universität Heidelberg

Institut für Theoretische Physik

Philosophenweg 16

D-69120 Heidelberg

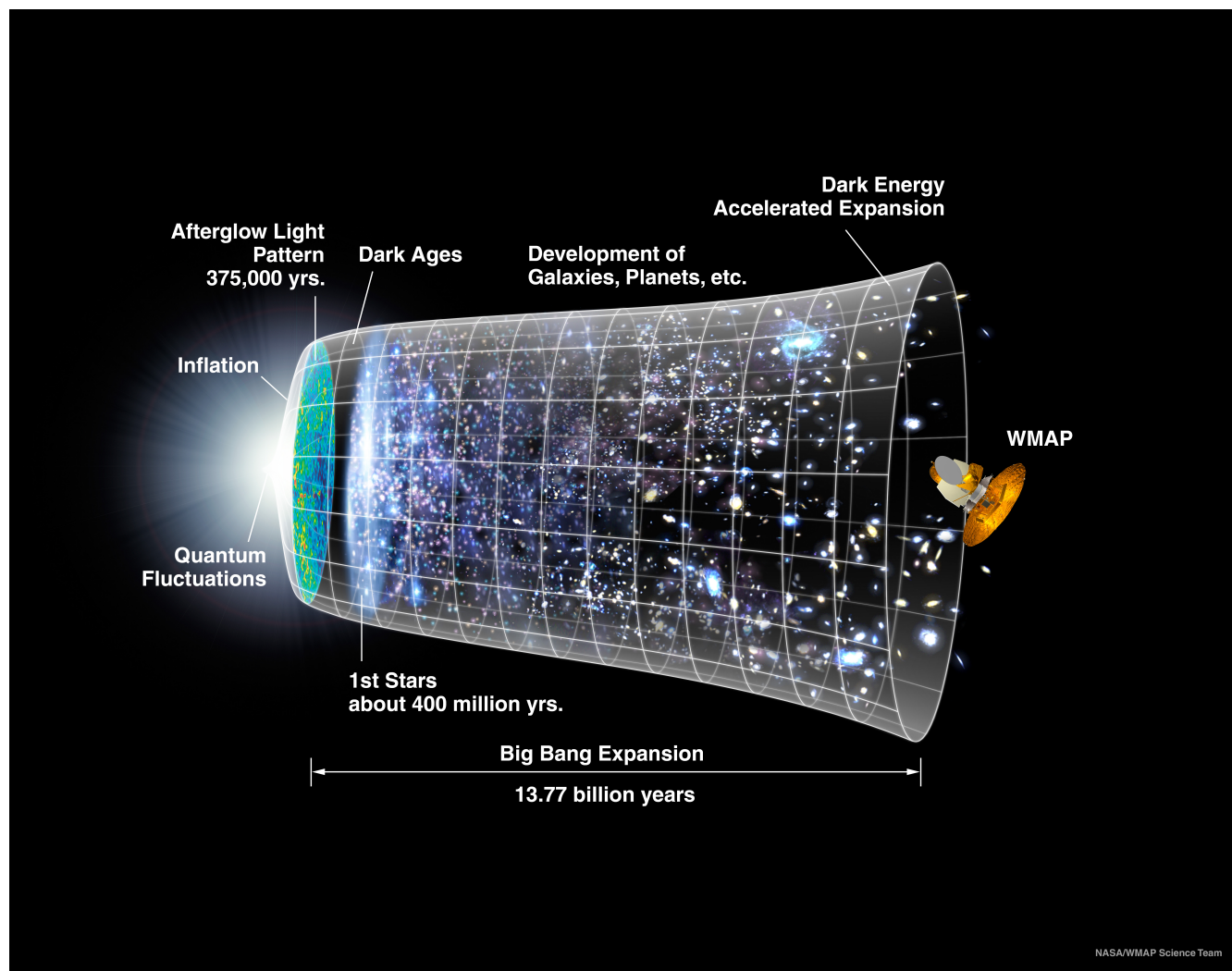


# Themen

1. Zeitentwicklung im Urknallmodell
2. Elementhäufigkeiten, Raumexpansion und kosmische Hintergrundstrahlung (CMB)
3. Planck-Weltraumteleskop, CMB-Fluktuationen und dunkle Energie
4. Strukturbildung und dunkle Materie
5. Endliches oder unendliches Universum?
6. CMB-Polarisation und primordiale Gravitationswellen
7. Ausblick

# 1. Zeitentwicklung im Urknall-Modell

- Alter des Universums: 13,8 Milliarden Jahre
- Inflationsepoche: rasche (exponentielle) Aufblähung des Universums  $10^{-35}$  s nach dem Urknall: Expansion um  $10^{50}$  in  $10^{-32}$  s. Dichtefluktuationen sind die Kristallisationskeime für die spätere Galaxienbildung
- Anschließend nahezu gleichförmige (leicht gebremste) Expansion
- Bildung von H-Atomen, Entkopplung von Strahlung und Materie: 380 000 Jahre nach dem Urknall
- Entstehung der ersten Sterne: 400 Millionen Jahre nach dem Urknall
- Erneut beschleunigte Expansion ab  $z \approx 1$



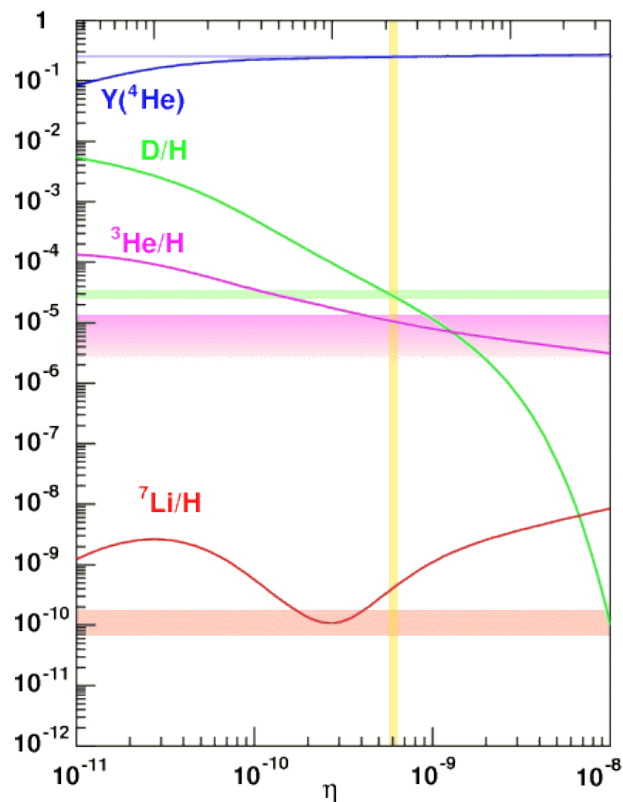
Quelle: WMAP-Collaboration

CMB\_Planck\_07.05.2015 HM

# Grundsteine des Urknall-Modells

- Die **primordialen Elementhäufigkeiten** von Wasserstoff, Deuterium, Helium und Lithium stimmen sehr gut mit der Vorhersage überein. (Schwerere Elemente werden durch Nukleosynthese in Sternen erzeugt).
- Die Entdeckung der **Raumexpansion** anhand der Rotverschiebungen durch Vesto Slipher (1913/17), Milton Humason und Edwin Hubble (bis 1929). Einstein eliminiert daraufhin die kosmologische Konstante aus seinen **Feldgleichungen**; die Friedman'schen Lösungen beschreiben die Raumexpansion.
- Die Entdeckung der **kosmischen Hintergrundstrahlung** 1964/5 durch Penzias und Wilson als Relikt der Urknall-Expansion, und ihre genaue Vermessung incl. der **Fluktuationen** (Ballons Boomerang, Maxima; Raumsonden Cobe, WMAP, Planck).

## 2. Elementhäufigkeiten, Raumexpansion und kosmische Hintergrundstrahlung



Quelle: E. Vangioni

Die primordialen Elementhäufigkeiten von **Wasserstoff**, **Deuterium**, **Helium** und **Lithium** stimmen gut mit der Vorhersage im Urknallmodell überein. (Schwerere Elemente werden durch Nukleosynthese in Sternen erzeugt).

\*\*\*\*

Diese Elemente werden 3 bis 20 Minuten nach dem Beginn der Urknall-Expansion erzeugt. Danach sind Temperatur und Dichte des jungen Universums unter die Werte gefallen, die zur Elementsynthese erforderlich sind.

Die für eine »primordiale« Synthese im Urknall vorhergesagten Elementhäufigkeiten sind 75 % Wasserstoff (Protonen), fast 25% Helium-4, 0,01 % Deuterium, sowie Spuren von Lithium und Beryllium - keine schwereren Elemente. Entscheidend für die Berechnung der Elementhäufigkeiten ist das Baryon - zu - Photon Verhältnis im frühen Universum ( $\eta \approx 6 \cdot 10^{-9}$ ).

# Rotverschiebung und Raumexpansion

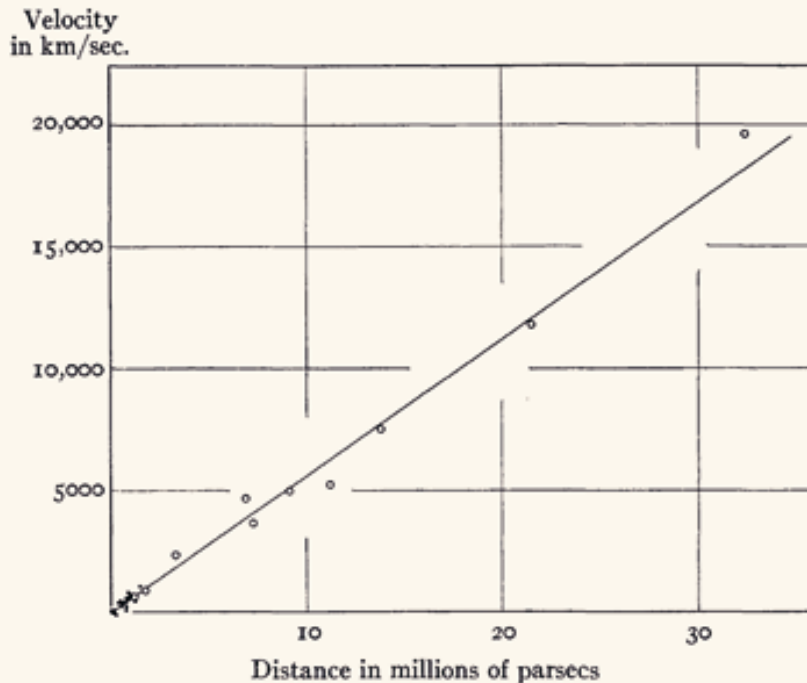


FIG. 5.—The velocity-distance relation. The circles represent mean values for clusters or groups of nebulae. The dots near the origin represent individual nebulae, which, together with the groups indicated by the lowest two circles, were used in the first formulation of the velocity-distance relation.

Quelle: E. Hubble and M. Humason,  
The Astrophysical Journal 74, Seite 43 (1931) :  
 $H \approx 500$  km/s/Mpc: ungenaue Entfernungsbestimmungen

Entdeckung der kosmologischen  
Rotverschiebung: **Vesto Slipher**  
(1913-17, Lowell Observatory, Arizona)

1929 **Edwin Hubble**:  $H = v/d$

Die Expansionsgeschwindigkeit  
wächst linear mit der Distanz zwischen  
Galaxien. **George Gamov** und andere  
formulierten auf dieser Basis das  
Urknall-Modell.

Der Wert des Hubble-Parameters  
 $H$  war lange Zeit schwer zu  
bestimmen; er schwankte zwischen  
50 km/s/Mpc (A. Sandage et al.)  
und 100 km/s/Mpc (G.DeVau-  
couleurs et al.).

Der heutige Wert (Planck 2015) ist

$$H \approx (67,8 \pm 0,9) \text{ km/s/Mpc}$$

(Der Wert von  $H$  ändert sich zeitlich)

# Weltalter



Edwin Hubble

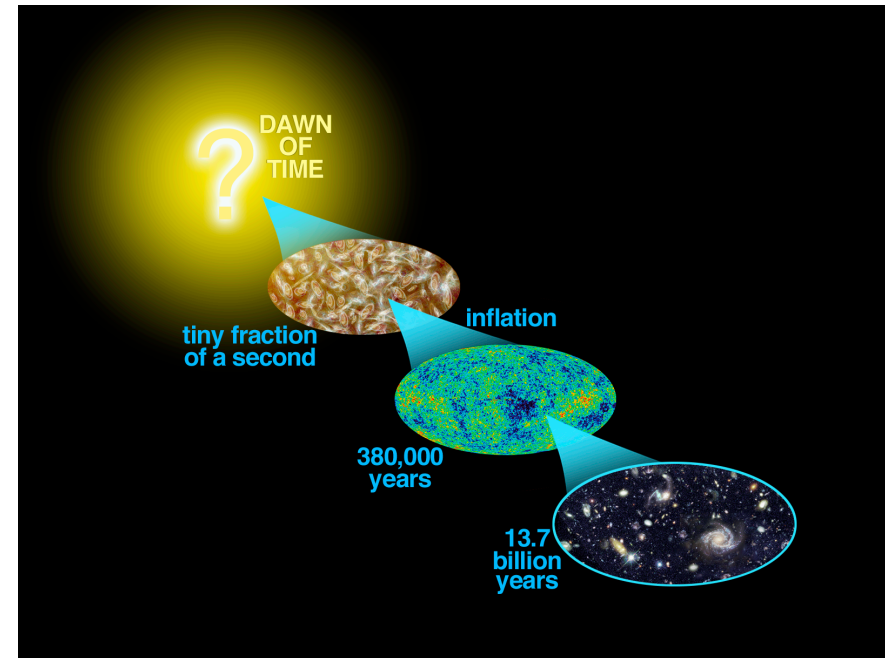
Der Kehrwert des Hubble-Parameters ist eine Zeit; sie gibt eine Abschätzung des Alters des Universums

(z.B. mit  $H \approx 72 \text{ km/s/Mpc}$ ,

$1 \text{ Mpc} \approx 3.09 \cdot 10^{19} \text{ km}$ ):

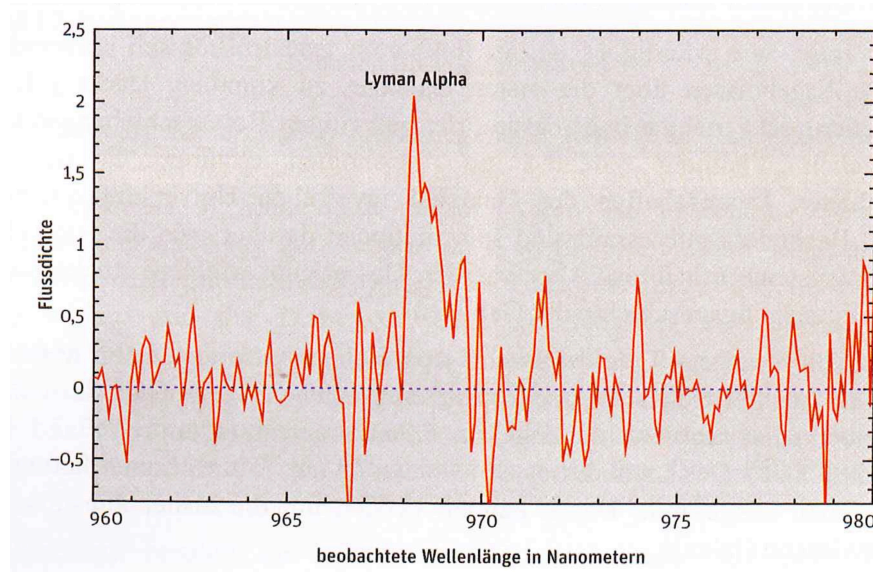
$1/H \approx 4,3 \cdot 10^{17} \text{ s} = 13,6$   
Milliarden Jahre.

Dies wäre exakt das Weltalter, wenn sich das Universum mit konstanter Rate ausgedehnt hätte. Der tatsächliche Wert ist etwas größer (13,8 Gy).



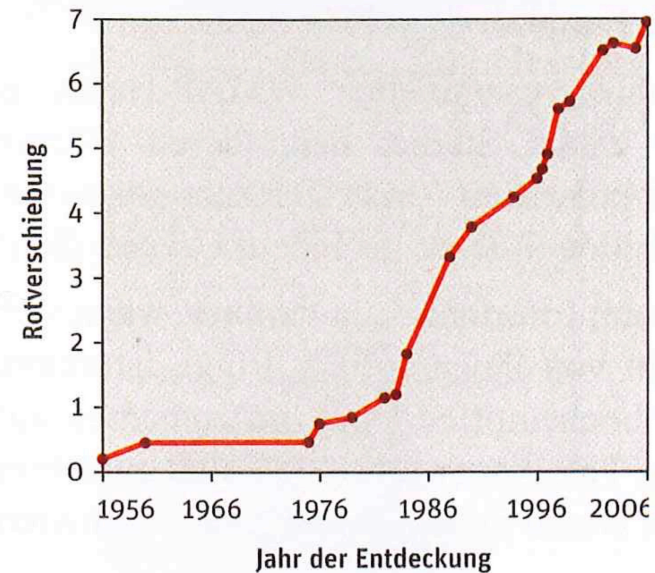
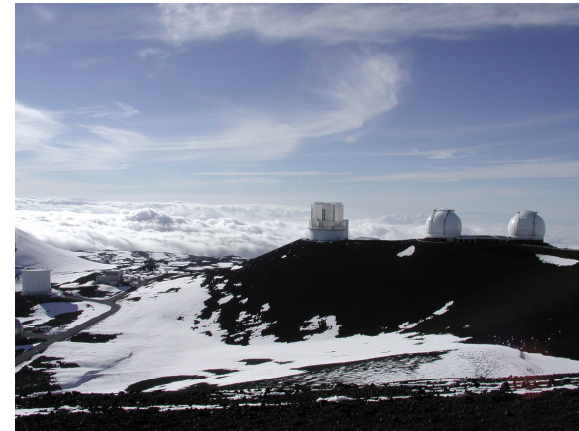
source: WMAP collaboration

# Rotverschiebung entfernter Galaxien



Im Spektrum der Galaxie IOK-1 mit einer Rotverschiebung von 6.96 (aufgenommen mit dem Subaru-Teleskop, Hawaii) lässt sich bei  $\lambda = 968.2$  Nanometern die Lyman-Alpha-Emissionslinie des Wasserstoffs erkennen. Diesem spektroskopischen Nachweis liegen elf jeweils halbstündige Belichtungen zu Grunde. (Laborwellenlänge:  $\lambda_0 = 121.6$  Nanometer).

$$\lambda = (1 + z) \lambda_0$$



In den vergangenen Jahrzehnten entdeckte man Galaxien mit immer größeren Rotverschiebungen.



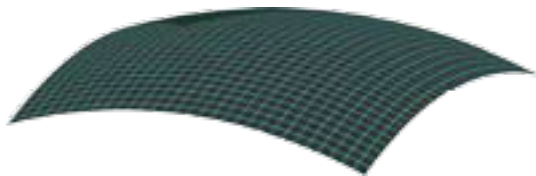
# Raumgeometrie



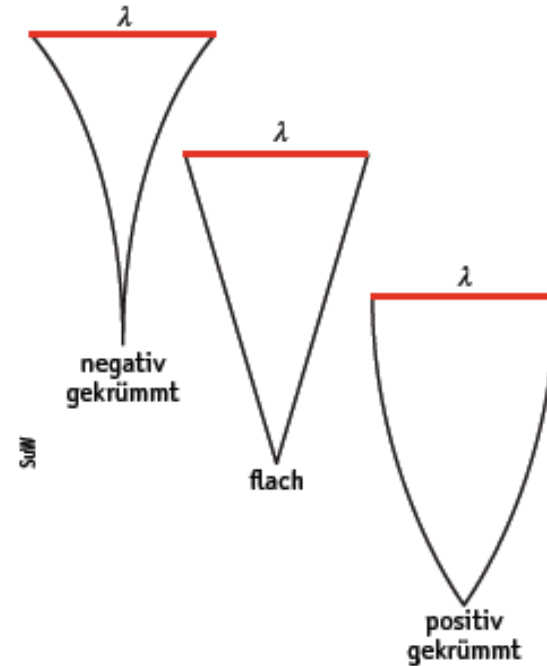
negativ gekrümmt,  $k = -1$



flach,  $k = 0$



positiv gekrümmt,  $k = 1$

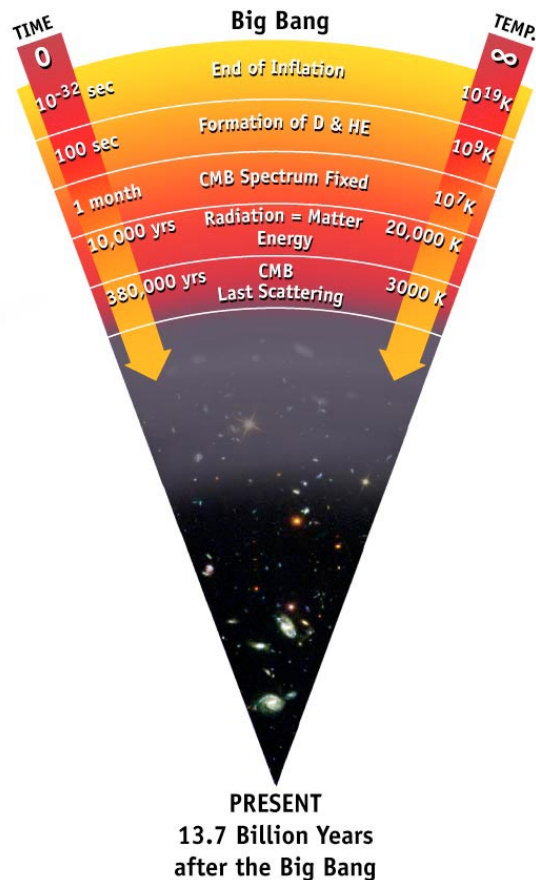


Die Raumkrümmung bestimmt den Winkel, unter dem eine gegebene Länge erscheint.

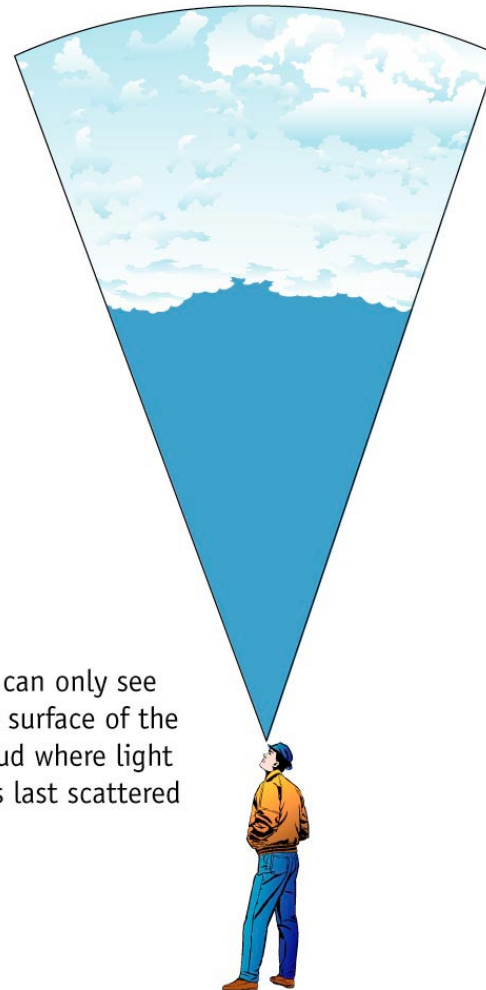
Quelle: WMAP-Collaboration, 2008/ SuW

Resultat der Satellitenmissionen:  
Der Raum ist flach – Krümmung nur in  
Gegenwart großer Massen

# Die kosmische Hintergrundstrahlung (CMB, cosmic microwave background)



The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.

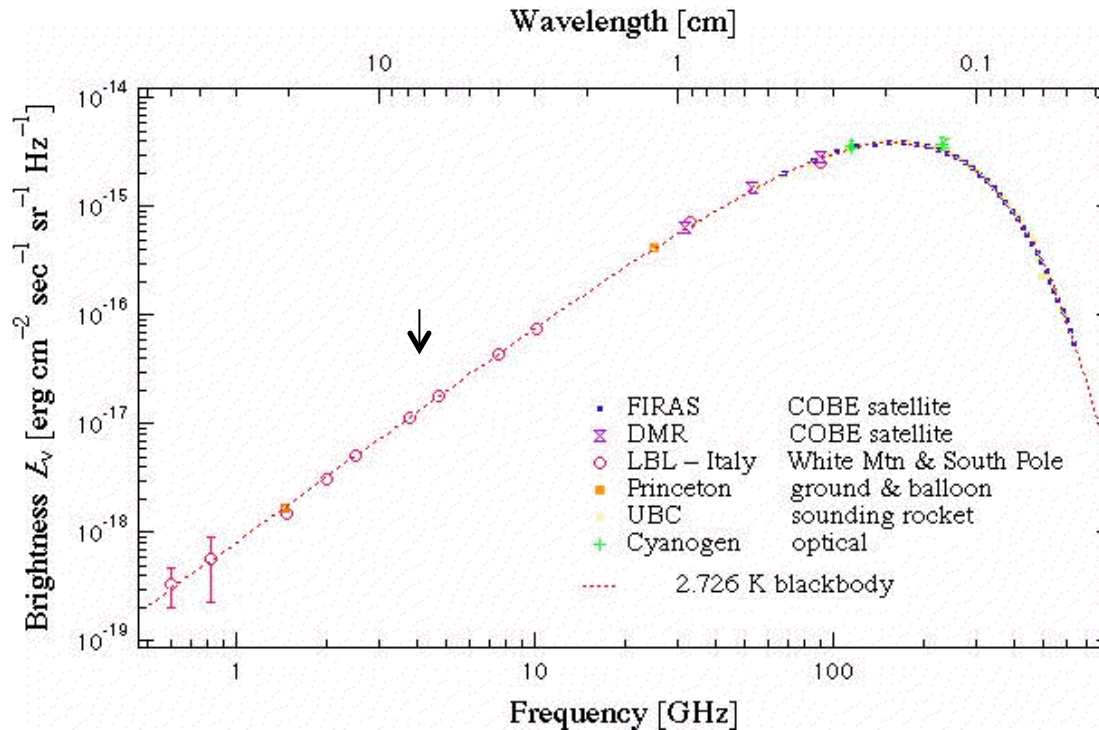


We can only see the surface of the cloud where light was last scattered

- Wurde etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall bei der Bildung von H-Atomen und der Entkopplung von Strahlung und Materie freigesetzt
- Damals betrug die Temperatur etwa 3000 Kelvin, heute 2.73 K

source: WMAP collaboration

# Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung

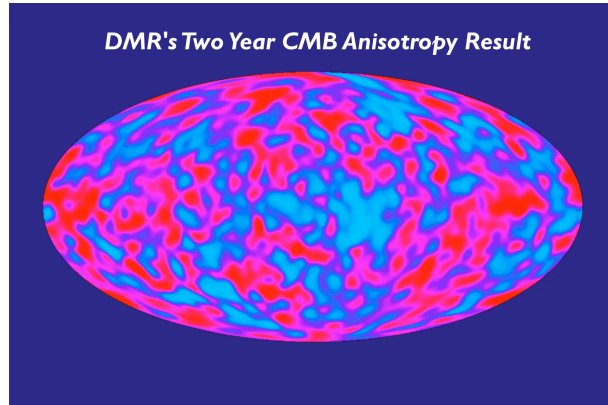


- Von Arno Penzias und Robert Wilson 1964/5 mit einer Hornantenne (eher zufällig, bei  $\approx 4.1$  GHz) entdeckt: Physik-Nobelpreis 1978
- Durch die Expansion des Universums ist die Temperatur auf inzwischen 2,73 Kelvin gefallen
- Das Energiespektrum ist ein Planck-Spektrum

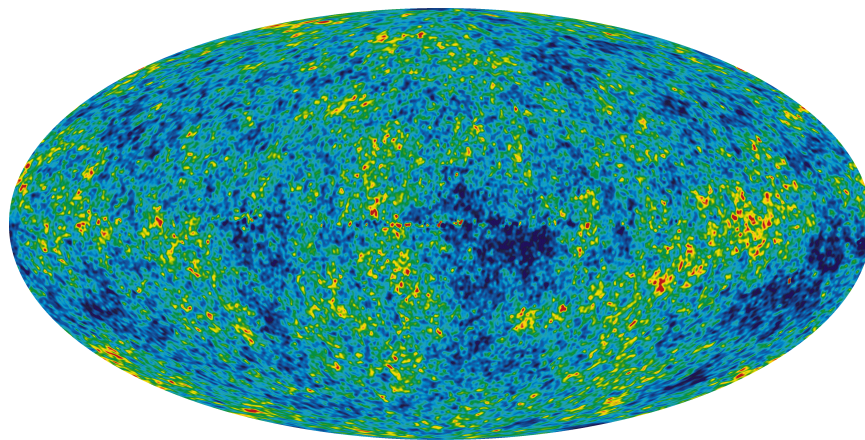
$$U_\nu^o(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} d\nu$$

Quelle: COBE-Collaboration, 1992

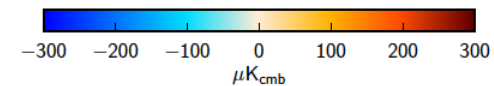
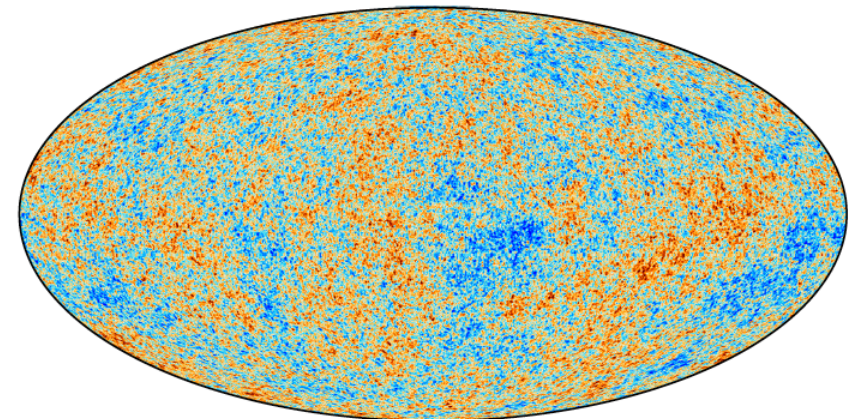
# Temperaturschwankungen am Mikrowellen-Himmel



COBE, 1992

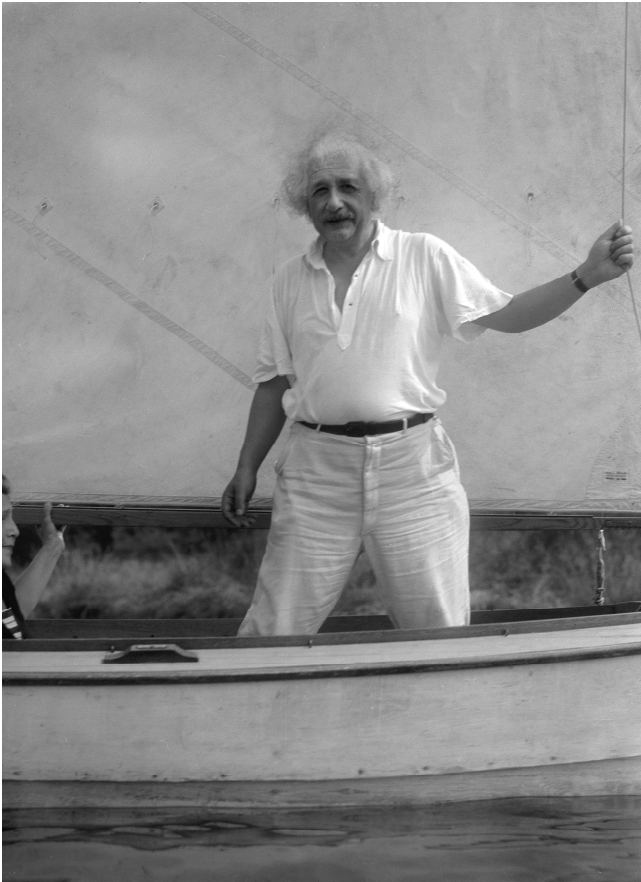


WMAP-Collaboration, 2008



- Bildung von H-Atomen, Entkopplung von Strahlung und Materie:  $\approx 380\,000$  Jahre nach dem Urknall
- Entstehung der ersten Sterne: 400 Millionen Jahre nach dem Urknall
- Erneut beschleunigte Expansion ab  $z \approx 1$

# Allgemeine Relativitätstheorie



- Die 1915/16 von Albert Einstein aufgestellten Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie und die Friedman'schen Lösungen dieser Gleichungen beschreiben das expandierende Universum

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$G$  die Gravitationskonstante,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit,  $R_{\mu\nu}$  der Ricci-Tensor,  $R$  der Krümmungsskalar,  $g_{\mu\nu}$  der metrische Tensor,  $T_{\mu\nu}$  der Energie-Impuls Tensor und  $\Lambda$  die kosmologische Konstante (entspricht einer konstanten Dichte der Dunklen Energie).

$\Lambda = 0$  ergibt bereits Friedman'sche Lösungen für den expandierenden Raum; für  $\Lambda > 0$  folgt eine beschleunigte Expansion

(ein durch die Vakuumenergie bestimmtes  $\Lambda$  ergibt jedoch eine falsche Größenordnung)

$$\rho_{(\text{vac})} := \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}$$

# Friedman'sche Gleichungen

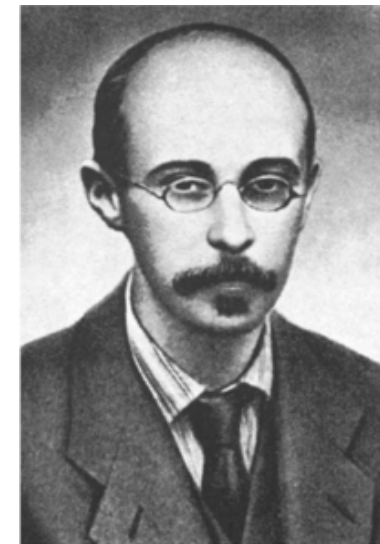
- Für ein räumlich homogenes und isotropes Universum lässt sich die »Metrik« (Abstandsquadrat zwischen zwei Raum-Zeit-Punkten) schreiben als

$$ds^2 = a(t)ds_3^2 - dt^2$$

- Durch die Feldgleichungen wird die zeitliche Entwicklung des »Skalenfaktors«  $a(t)$  über den Energie-Impuls Tensor bestimmt. Alexander Friedman hat daraus 1922 die Gleichungen abgeleitet

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$
$$\dot{H} + H^2 = \frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

Der Hubble-Parameter  $H(t)$  zur Jetztzeit bestimmt die Expansionsrate im Gesetz von Hubble,  $d = H \cdot v$



*A. Friedman*

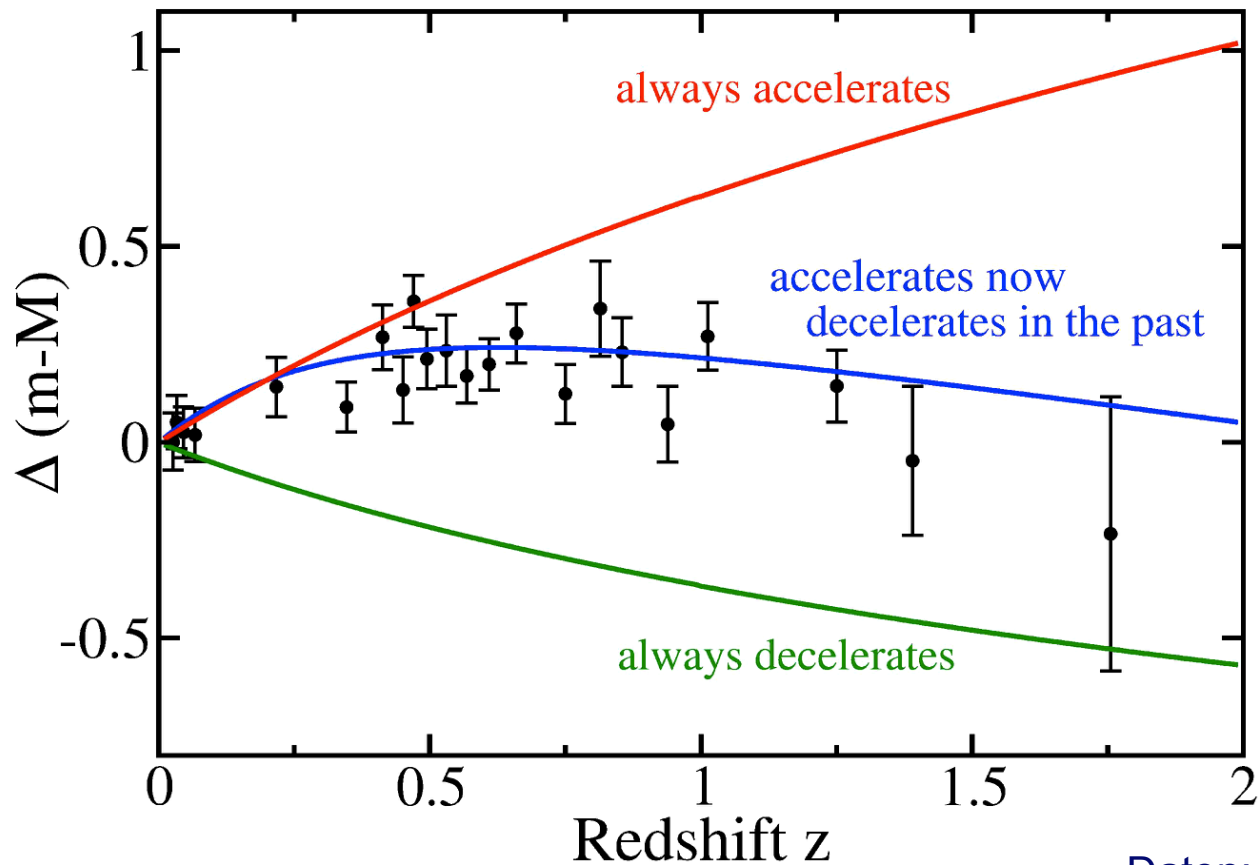
# Raumexpansion und SN Ia Daten

Effekt einer kosmologischen Konstanten  $\Lambda > 0$  / evtl. zeitabhängigen »dunklen Energie«:

Beschleunigung bei kleinen Rotverschiebungen  $z < 1$ ,

Abbremsung bei  $z > 1$  (entsprechend  $t > 9$  Milliarden Jahre).

Daten vom Hubble-Weltraumteleskop bestätigen das tendenziell:

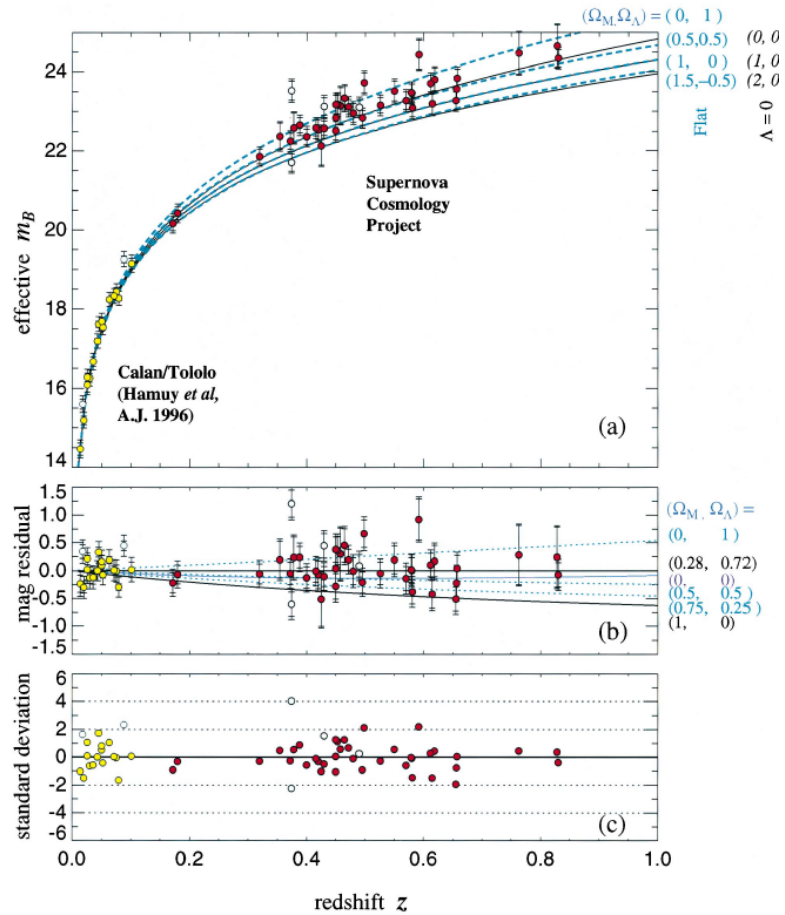


Daten: A. Riess et al.;

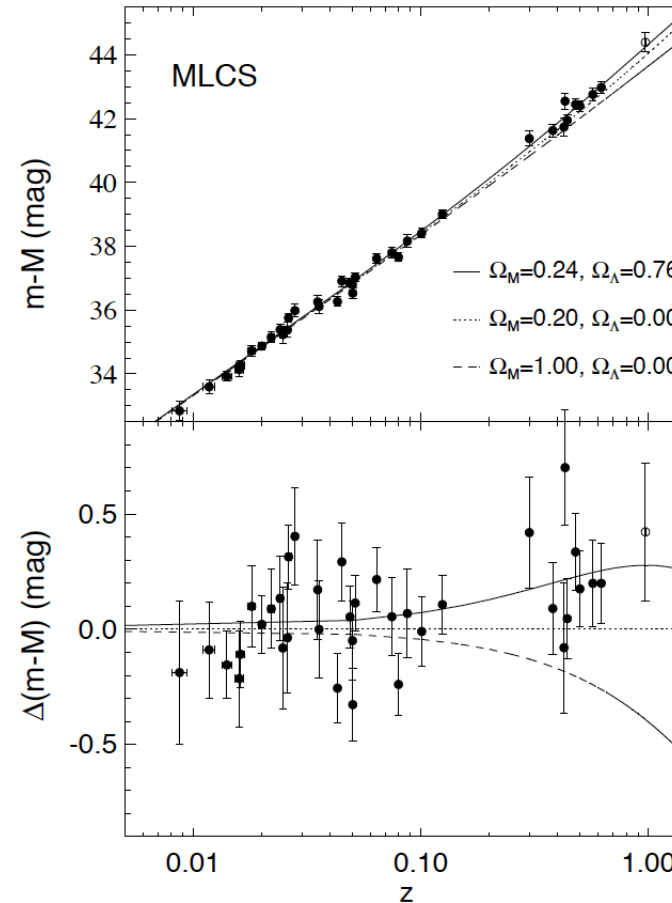
Grafik: M. Turner, D. Huterer

# Beschleunigte Expansion des Universums

Perlmutter et al. 1999



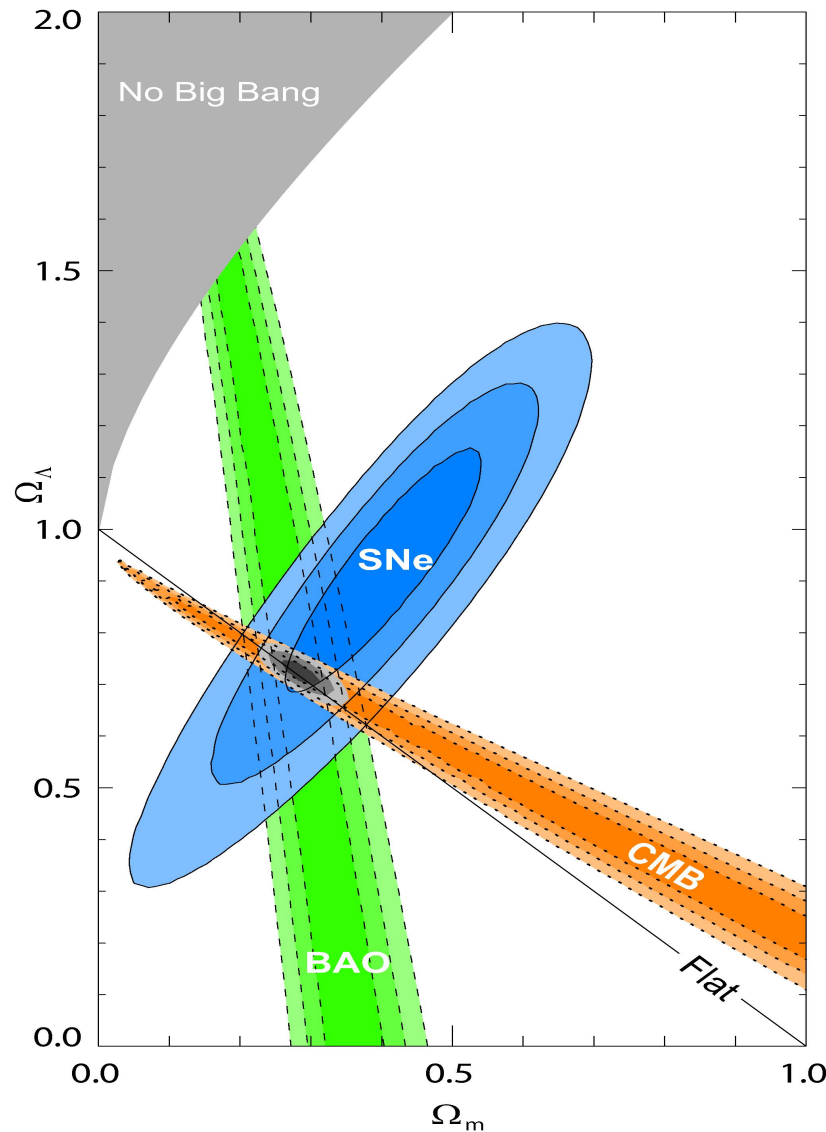
Riess, Schmidt et al. 1998



Die Differenz zwischen intrinsischer und scheinbarer Helligkeit  $\Delta$  ( $m-M$ ) ist größer als bei konstanter Expansionsrate erwartet: **die Raumexpansion ist beschleunigt.** (Daten aus den ursprünglichen Arbeiten 1998/99)



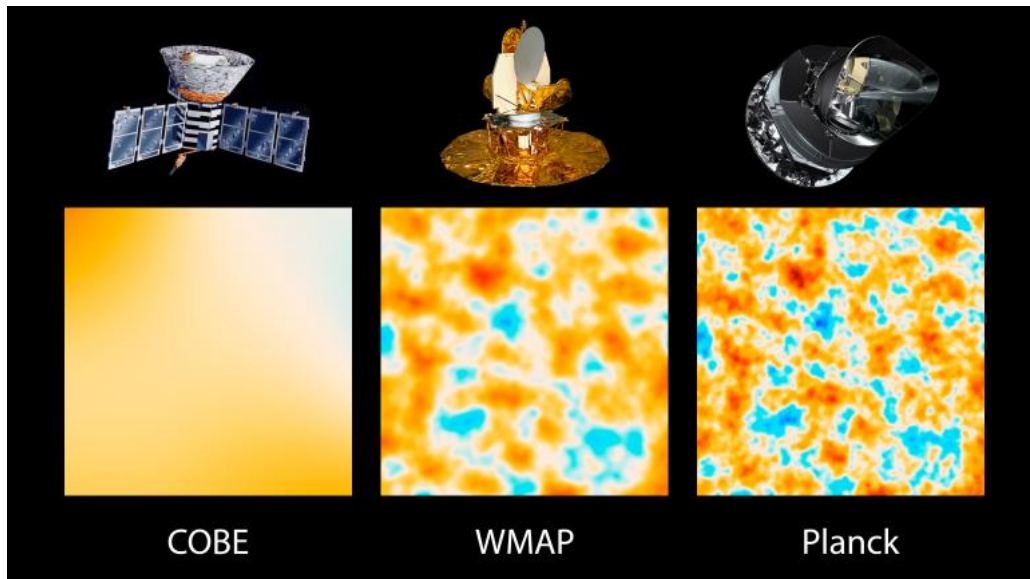
# Beschleunigte Expansion des Universums



Evidenz für die beschleunigte Expansion des Universums aus Beobachtungen

- von **Supernovae** vom Typ Ia
- der Fluktuationen (Temperaturschwankungen) der **kosmischen Hintergrundstrahlung**
- von sog. »**baryonischen akustischen Oszillationen**« in der Galaxienverteilung auf großen Skalen (entstehen durch das Wechselspiel von Gravitationsanziehung und Gasdruck im primordialen Plasma)

# 3. Planck-Weltraumteleskop, CMB-Fluktuationen und dunkle Energie



## Planck-Satellit (ESA) Missionsdaten

Masse: 1921 kg (Startmasse)

Größe: Höhe 4,2 m, Durchmesser  
max. 4,2 m

Start: 14. Mai 2009, 13:12:02 UTC

Startplatz: Centre Spatial Guyanais,  
Französisch-Guyana

Trägerrakete: Ariane 5 ECA

Flugdauer: 4 Jahre, 5 Monate und 9 Tage

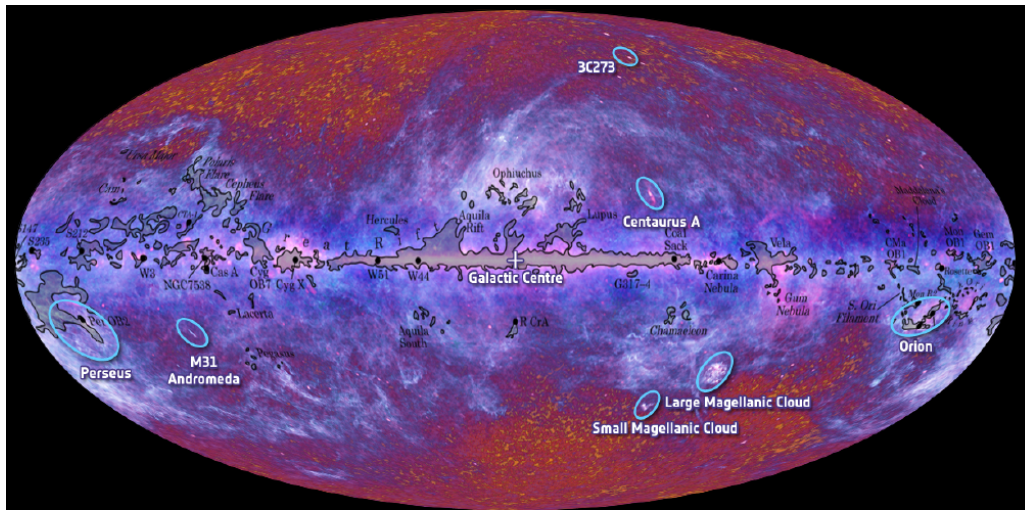
Status: a.D.: 23. Oktober 2013

## **Bahndaten**

Bahnhöhe: 1,5 Millionen km

Lissajous-Bahn um den Lagrange-Punkt  
L2 des Erde-Sonne-Systems

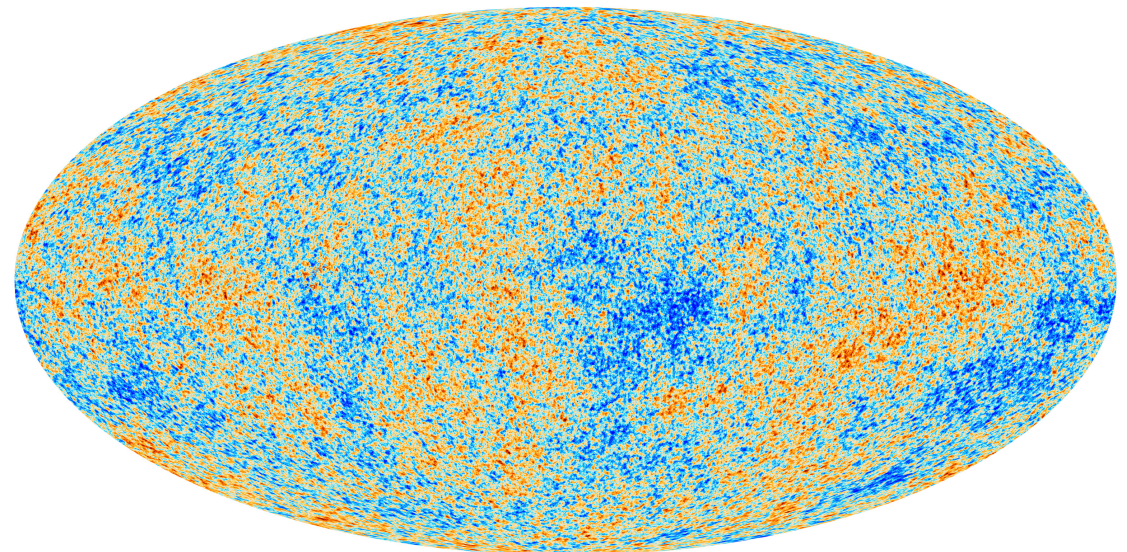
# Temperaturschwankungen im CMB: Planck Resultate



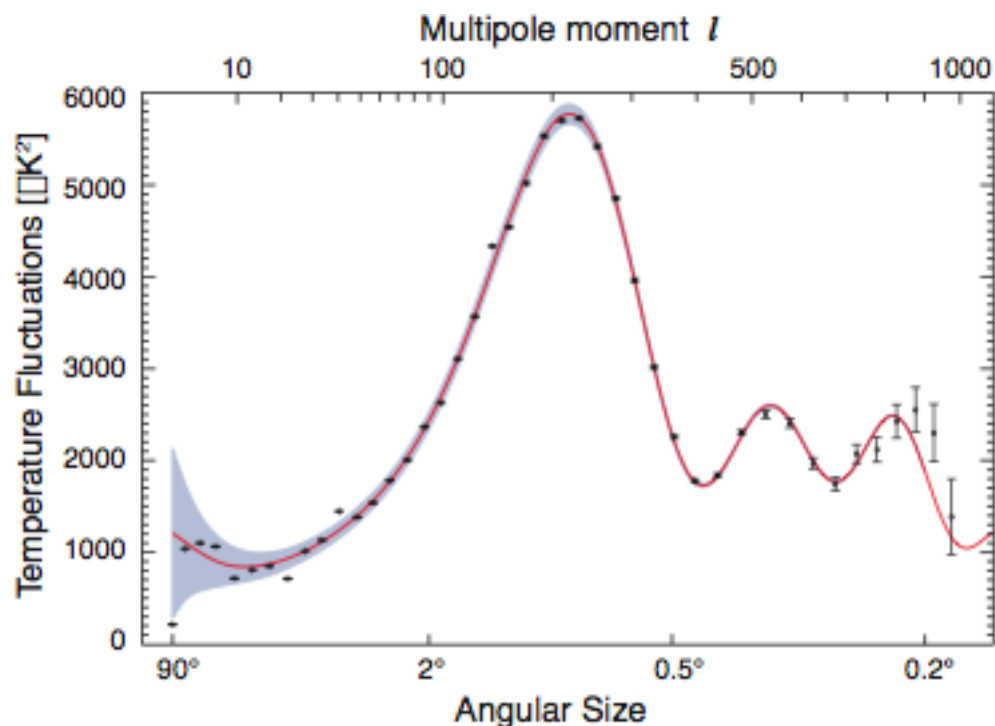
Rohdaten mit Vordergrundemissionen durch Staub, der Sternlicht absorbiert und im Mikrowellenbereich re-emittiert. (1 yr full sky all frequencies)

Messungen bei 9 Frequenzen (30-857 GHz)

Kosmologisches Signal nach Bereinigung der Daten (das Staubsignal ist frequenzabhängig!)



# Das Spektrum der Fluktuationen: WMAP



Fit mit 6 Parametern im  $\Lambda$ CDM Modell:

$$\Omega_B, \Omega_{\text{CDM}}, \Omega_{\Lambda}, H_0, \tau, n_S$$

[http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb\\_tool/cmb\\_plot.swf](http://map.gsfc.nasa.gov/resources/camb_tool/cmb_plot.swf)

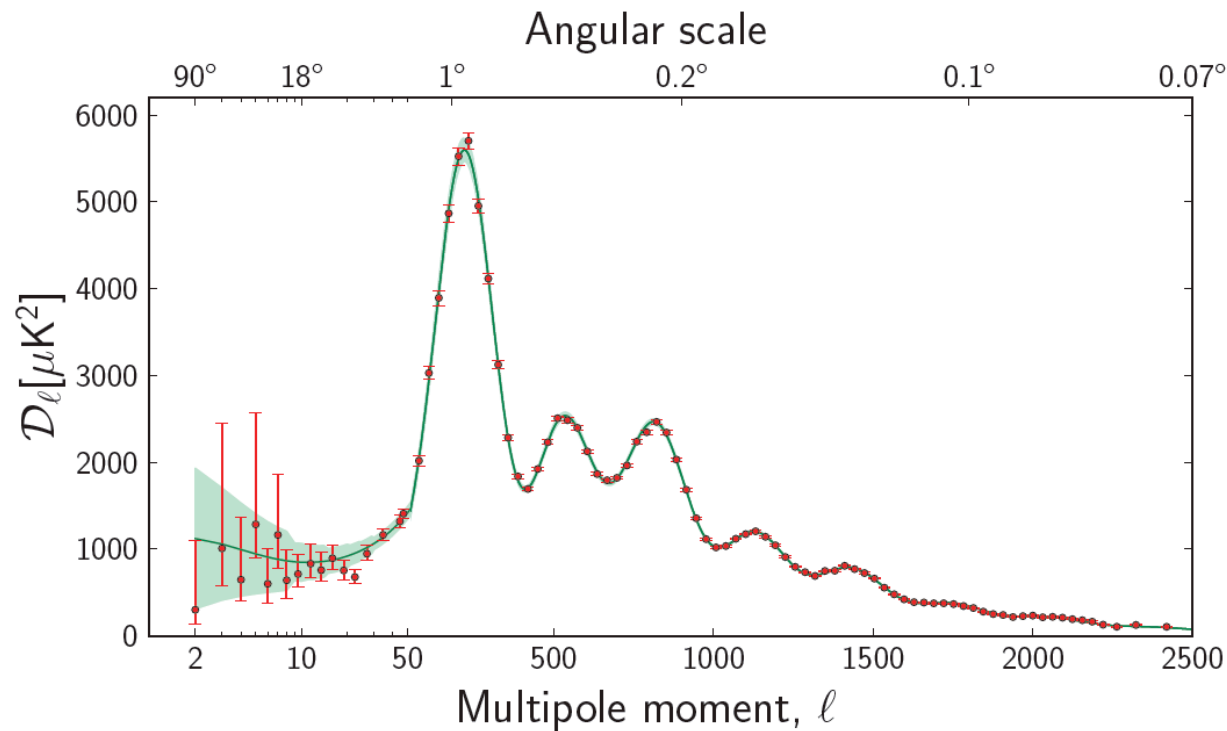
Quelle: WMAP-Collaboration

- Winkelabstände  $\theta = 180^\circ / \ell$
- Multipolmomente  $\ell$

## Schlussfolgerungen WMAP:

- Flache Raumgeometrie
- Alter des Universums 13.7 Milliarden Jahre
- Entkopplung von Strahlung und Materie vor 378 000 Jahren
- Heutiger Anteil Dunkler Materie: 22.7 % der Energiedichte, Dunkle Energie 72.8 %, Atome 4.5 %

# Das Spektrum der Fluktuationen: Planck 2013



Quelle: Planck-Collaboration, 2013

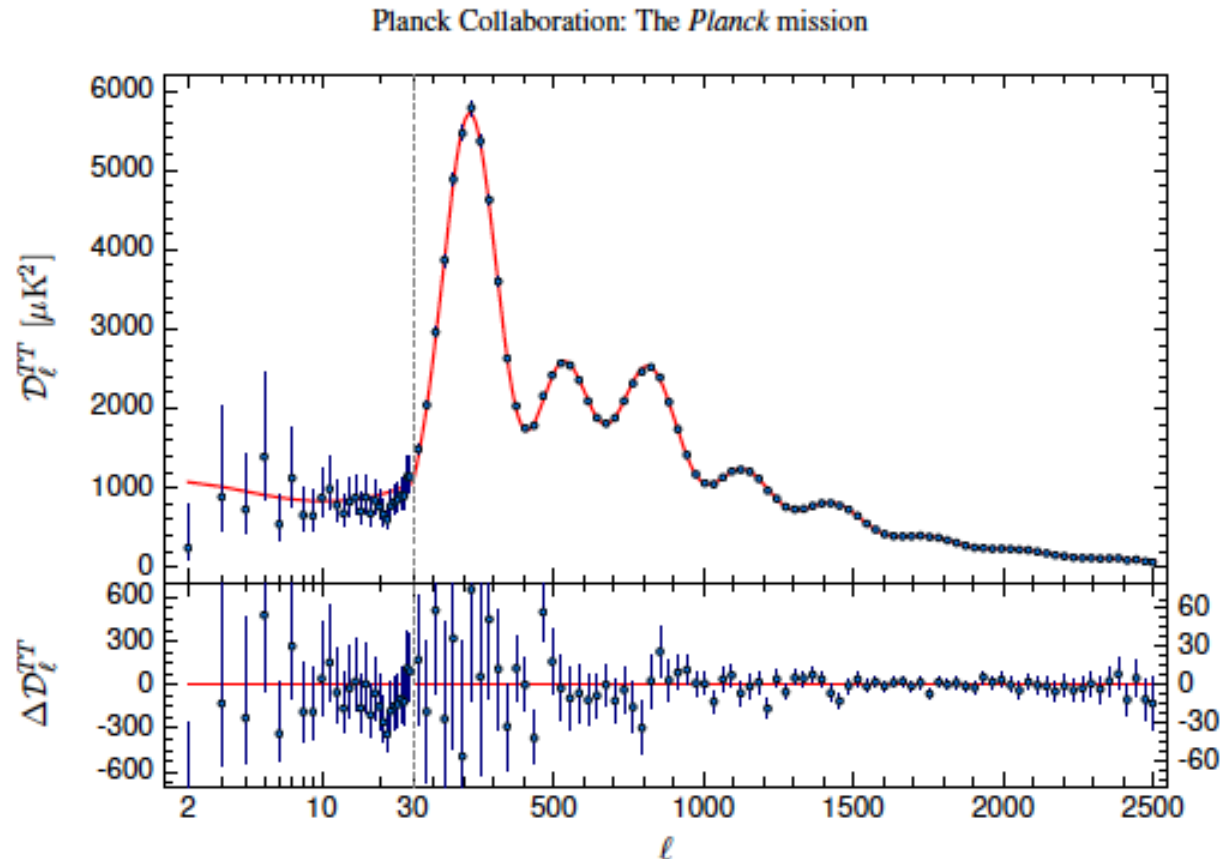
CMB\_Planck\_07.05.2015 HM

- Winkelabstände  $\theta = 180^\circ / \ell$
- Multipolmomente  $\ell$
- Auflösung: 5 arcmin

## Schlussfolgerungen Planck 2013:

- Flache Raumgeometrie
- Alter des Universums  
13.82 Milliarden Jahre
- Heutiger Anteil Dunkler  
Materie: 26.8 % der  
Energiedichte, Dunkle  
Energie 68.3 %, Atome  
4.9 %

# Das Spektrum der Fluktuationen: Planck 2015



Quelle: Planck-Kollaboration, 2015

CMB\_Planck\_07.05.2015 HM

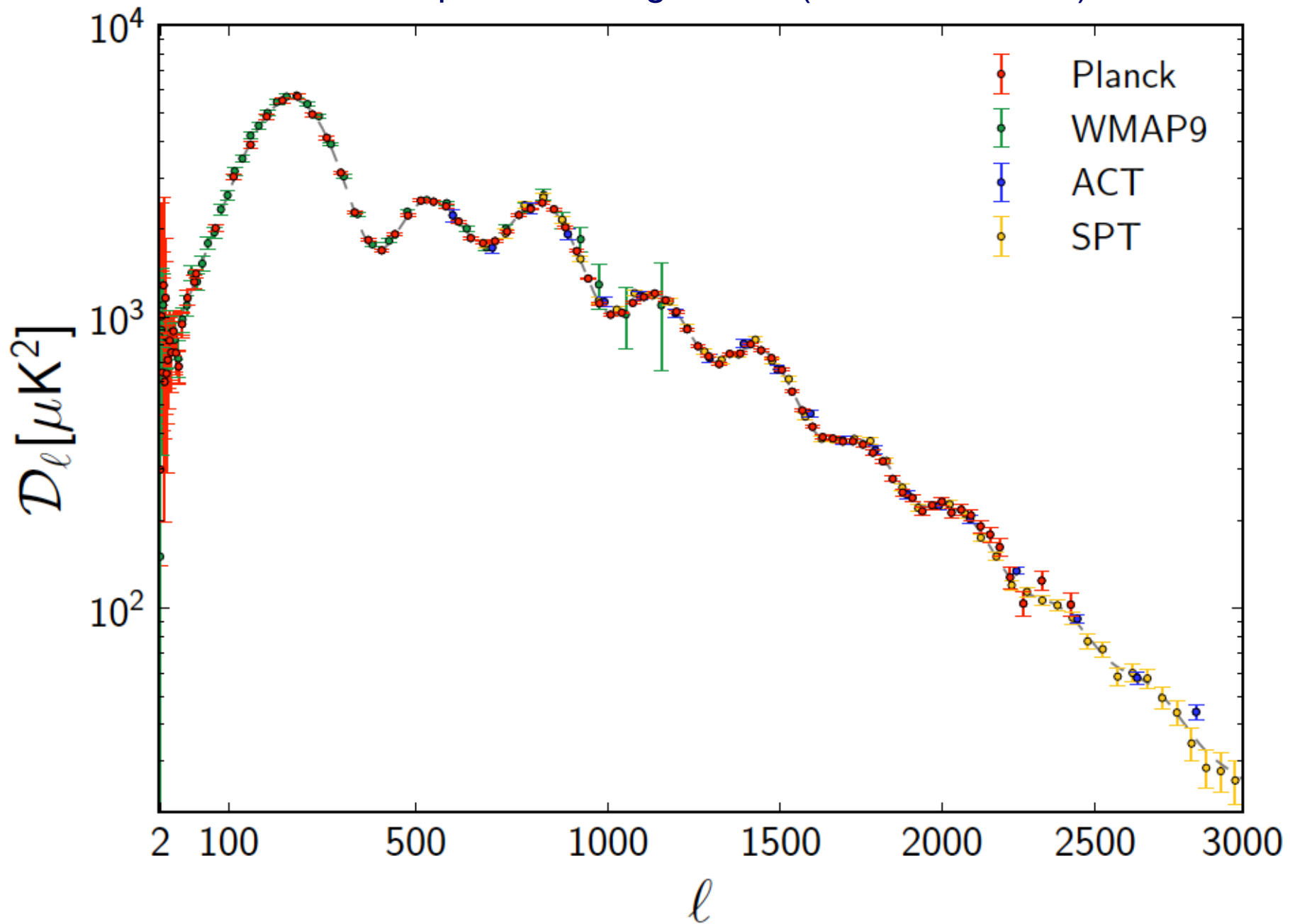
- Winkelabstände  $\theta = 180^\circ / \ell$
- Multipolmomente  $\ell$

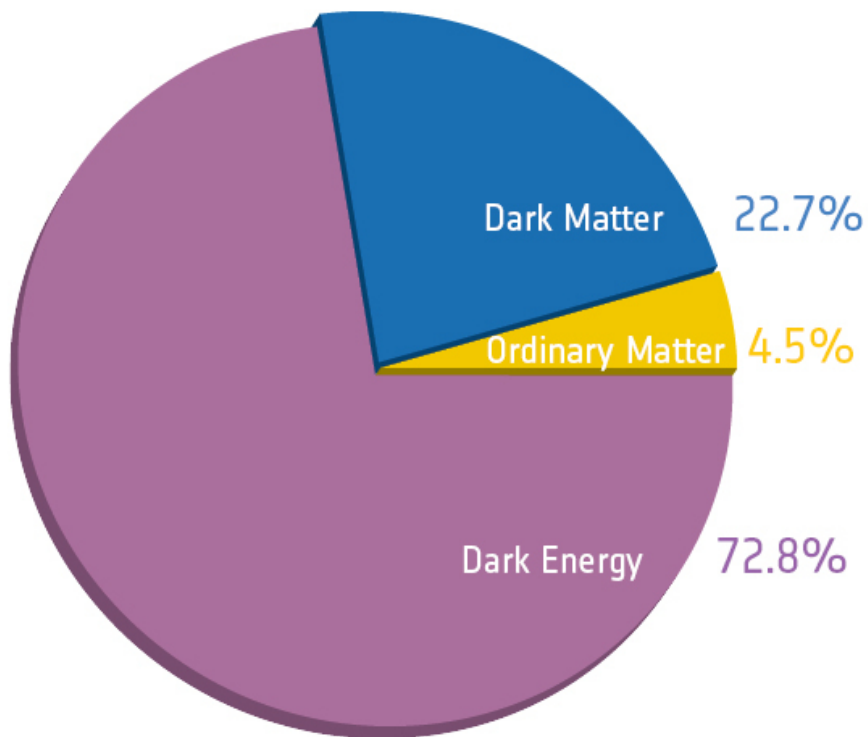
## Schlussfolgerungen

### Planck 2015:

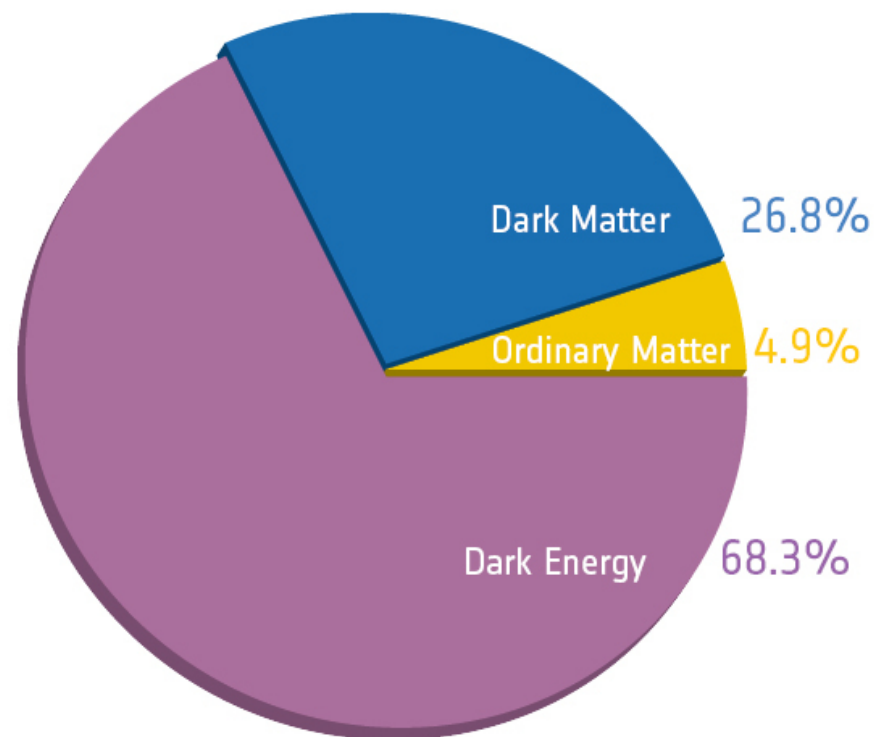
- Flache Raumgeometrie
- Alter des Universums 13.799 Milliarden Jahre,  $H_0 = (67.8 \pm 0.038) \text{ km/s/Mpc}$
- Heutiger Anteil Dunkler Materie: 26.2 % der Energiedichte, Dunkle Energie 69.2 %, Atome 4.6 %
- Polarisationsdaten

Fluktuationsspektrum bei großen  $\ell$  (kleinen Winkeln)





Before Planck (WMAP)

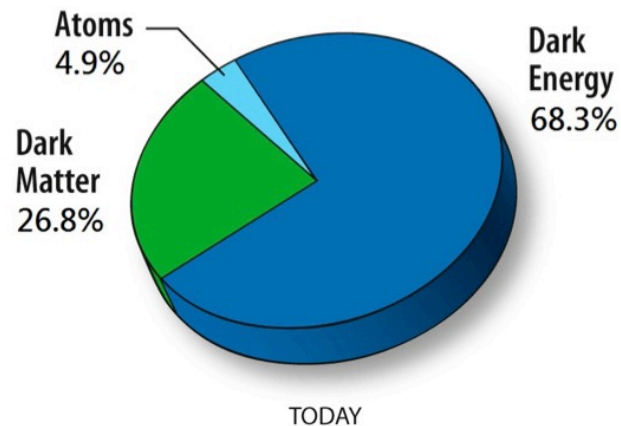


After Planck (2013)

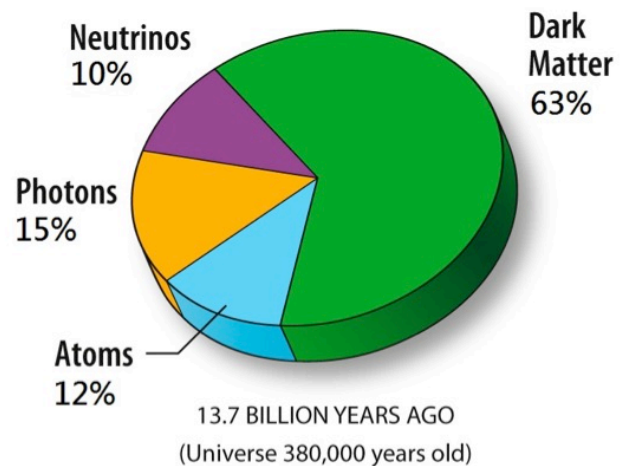
Planck 2015:  $\Omega_m = (30.8 \pm 0.12) \%$



# Dunkle Materie und Dunkle Energie



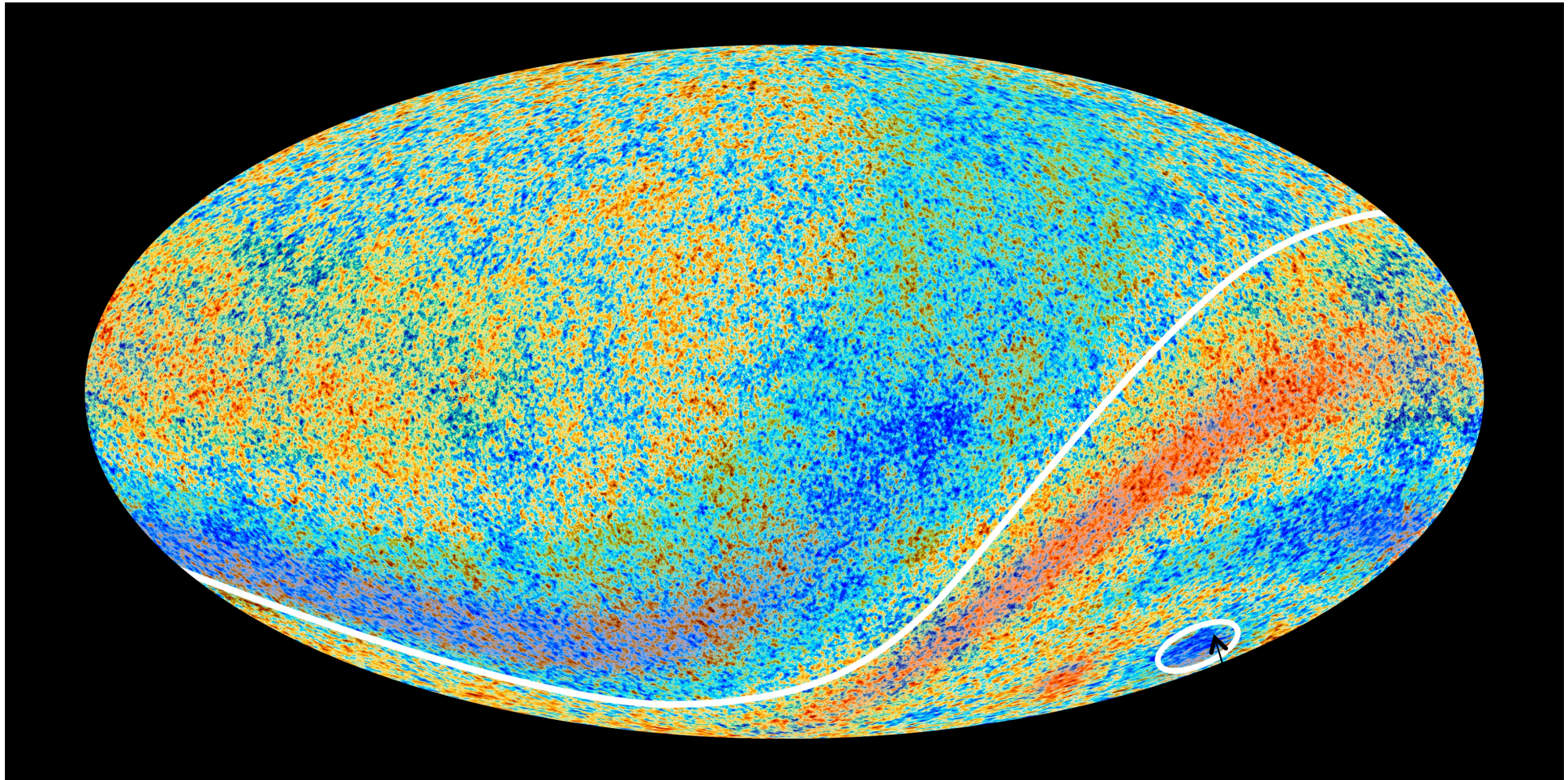
heute



380 000 Jahre nach dem Urknall

- Der relative Anteil dunkler und baryonischer Materie hat abgenommen, der Anteil dunkler Energie zugenommen.
- Neutrinos und Photonen bilden heute nur einen verschwindend geringen Teil der Energiedichte, während sie bei der Entkopplung von Strahlung und Materie noch ein Viertel ausmachten.

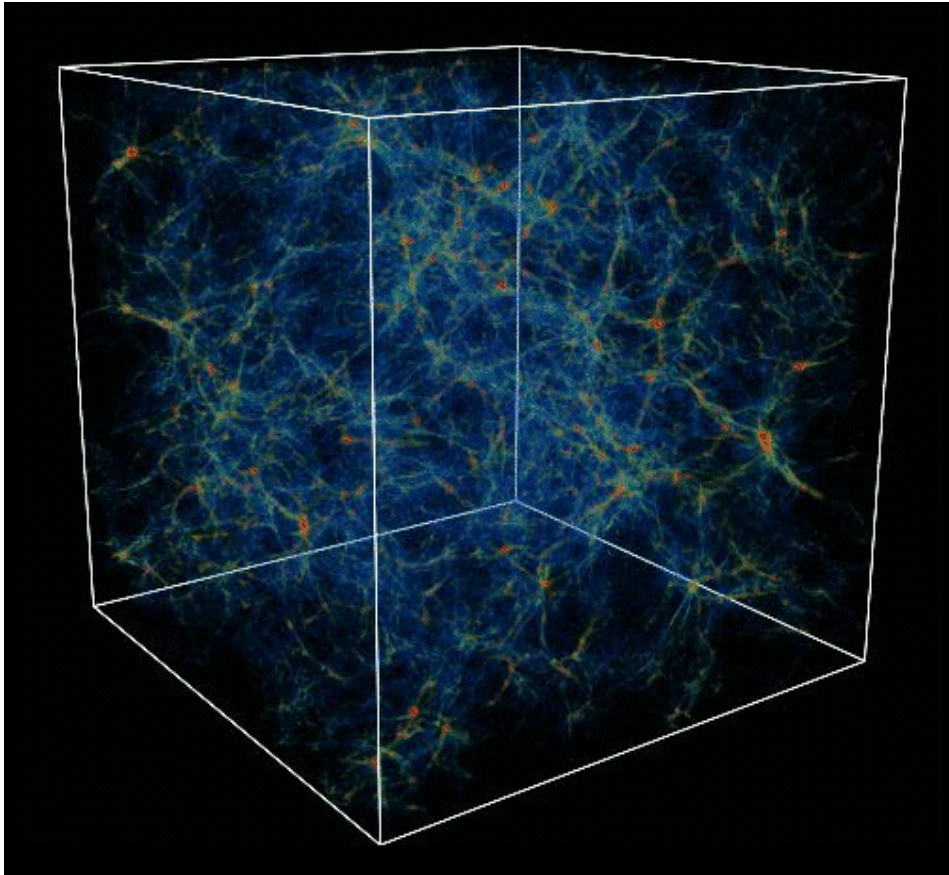
# Anisotropien der Hintergrundstrahlung



Der Ursprung der Anisotropien liegt in der Inflationsphase,  
die offenbar nicht isotrop verlief

»Cold spot«

## 4. Strukturbildung und dunkle Materie



- Dichtefluktuationen im frühen Universum sind die »Keime« der Bildung von Galaxien und Galaxienhaufen.
- Baryonische Materie sammelt sich an Filamenten aus dunkler Materie:
- Da dunkle Materie nur gravitativ und schwach (nicht elektromagnetisch) wechselwirkt, wird sie durch den Strahlungsdruck nicht homogen verteilt.

Quelle: Greg L. Bryan and Michael L. Norman, [Grand Challenge Cosmology Consortium](#)

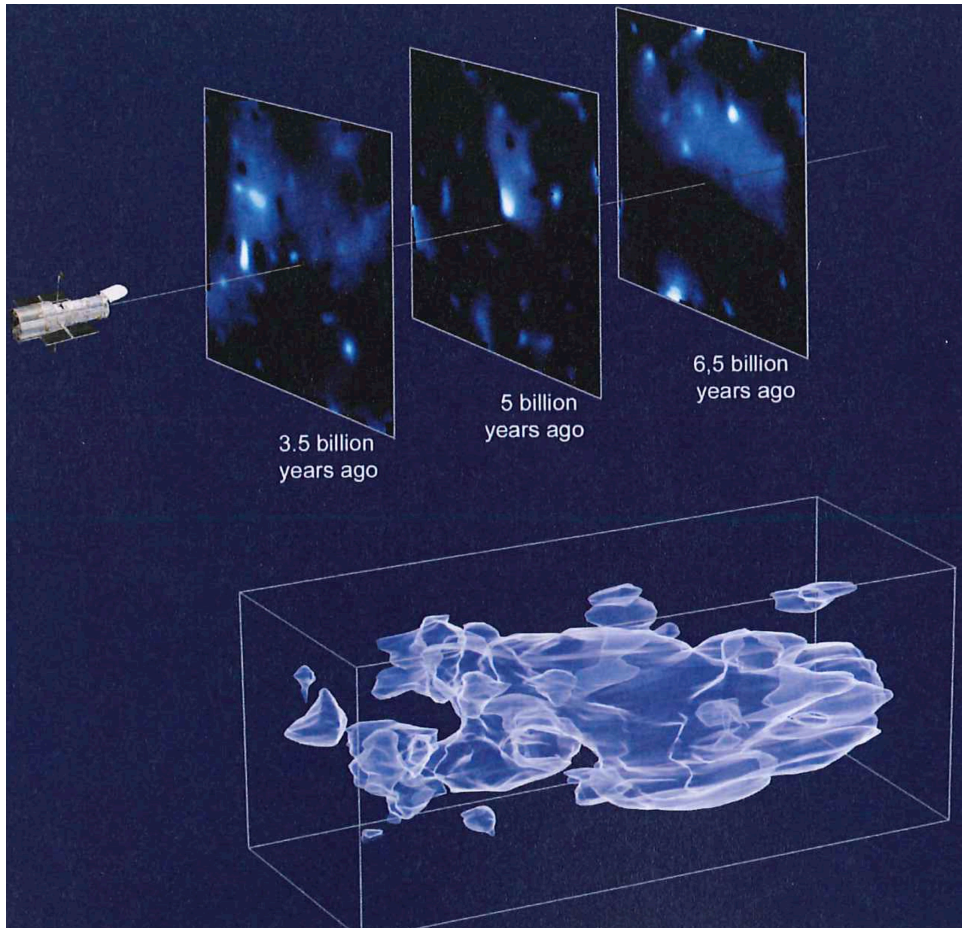
CMB\_Planck\_07.05.2015 HM

# Strukturbildung



Das Universum entwickelt Strukturen in mehreren Schritten. Auf Grund räumlicher Temperaturschwankungen, wie sie WMAP und Planck gemessen haben (links), kondensiert Materie unter dem Einfluss der Gravitation zu filamentartigen Strukturen (halblinks). Durch Zündung von Kernfusionsprozessen entstanden etwa 400 Millionen Jahre nach dem Urknall die ersten Sterne (Mitte). Weitere kamen hinzu (halbrechts), und längs der Filamente bildeten sich die Galaxien und Galaxienhaufen des jetzigen Universums (rechts).

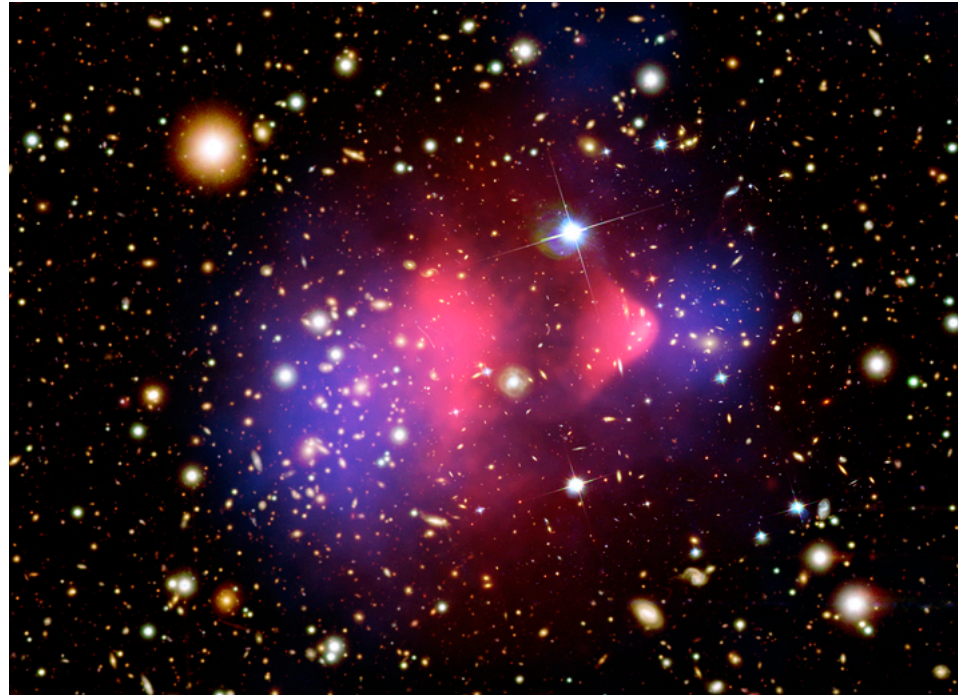
# Großräumige Strukturen



- Die dreidimensionale Karte zeigt die Verteilung der dunklen Materie in einem Ausschnitt des Universums mit einer Kantenlänge von 1,6 Winkelgraden.
- Der Abstand zur Erde nimmt von links nach rechts zu. Die drei Schnitte (oben) geben das Verteilungsmuster vor 3.5, 5 und 6.5 Milliarden Jahren wieder, was 10.2, 8.7 und 7.2 Milliarden Jahren nach der Entstehung des Universums entspricht.

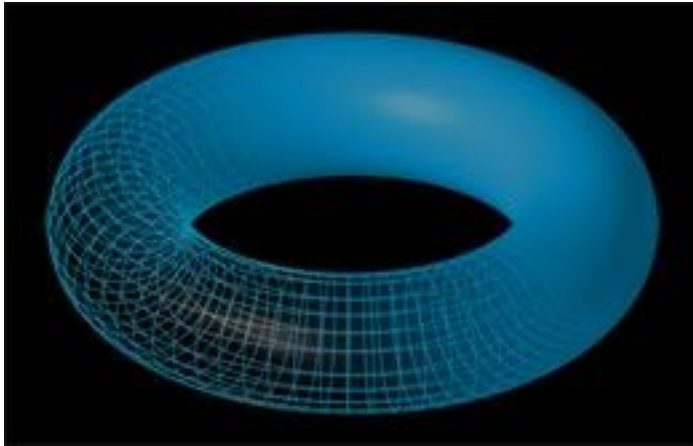
Quelle: COSMOS-collaboration (Results from the Hubble space telescope cp. with weak-lensing simulations)

# Dunkle Materie



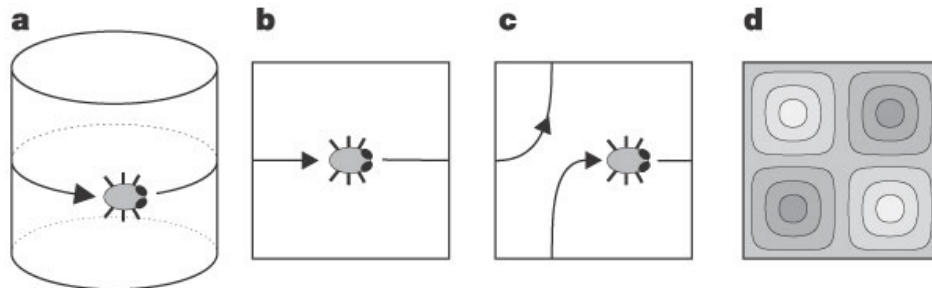
Dieses Komposit aus optischen und Röntgenaufnahmen zeigt den »Bullet Cluster«. Rot: heißes Gas (Chandra), gelb/weiß: Galaxien (Magellan, HST), blau: Simulation der dunklen Materie anhand des Gravitationslinseneffekts.

## 5. Topologie: endliches oder unendliches Universum?



Die Feldgleichungen gelten lokal, machen demnach keine Aussage über die Topologie

Ein endliches Universum könnte die Topologie eines 3-Torus haben, dem dreidimensionalen Analogon zum im Bild gezeigten bekannten 2-Torus.

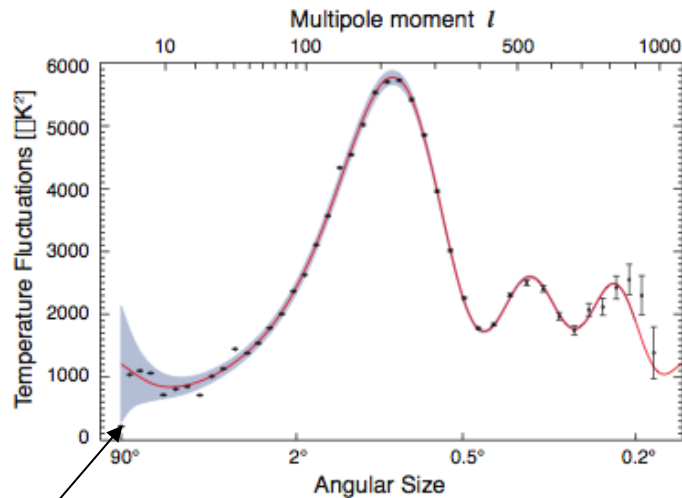


Ein Torus hat eine flache Raumgeometrie. Wellenlängen können nicht größer sein als die Seitenlänge des Quadrats, beim 3-Torus des Würfels oder Polyeders.

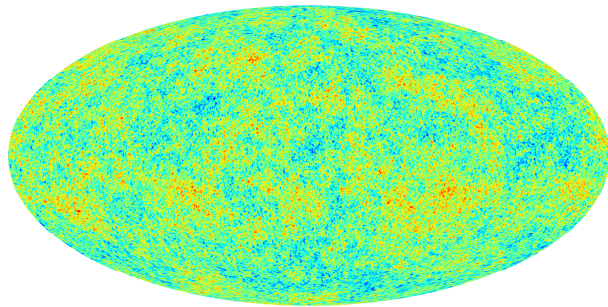
Quelle: COSMOS-collaboration

CMB\_Planck\_07.05.2015 HM

Bei endlicher Raumgeometrie sind die langen Wellen unterdrückt. COBE, WMAP und Planck haben eine solche Unterdrückung insbesondere beim Quadrupol ( $l = 2, 90^\circ$ ) gefunden.



Quadrupol:  $\approx 1/7$  des  $\Lambda$ CDM-Wertes



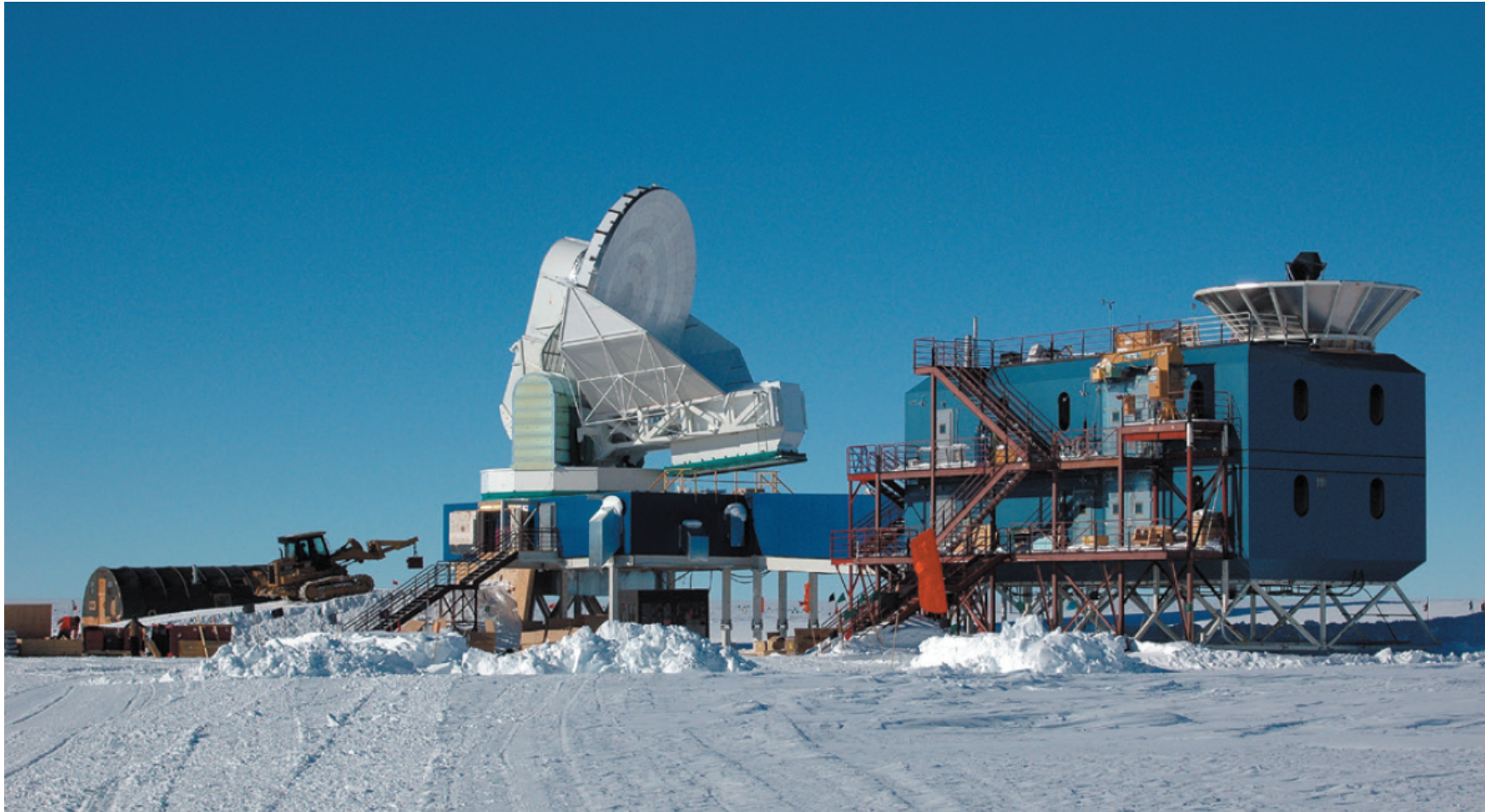
Torus-Geometrien des Universums sind immer wieder diskutiert worden (seit K. Schwarzschild 1900, Y.B. Zel'dovich 1973)

2007/08 F. Steiner, R. Aurich et al.: Präziser Vergleich mit den WMAP-Daten:

- Seitenlänge der kosmischen Einheitszelle 55,6 Milliarden Lichtjahre; gute Übereinstimmung mit dem Spektrum incl. Unterdrückung der langen Wellen. Links ist die numerische Simulation für den endlichen flachen Raum gezeigt.



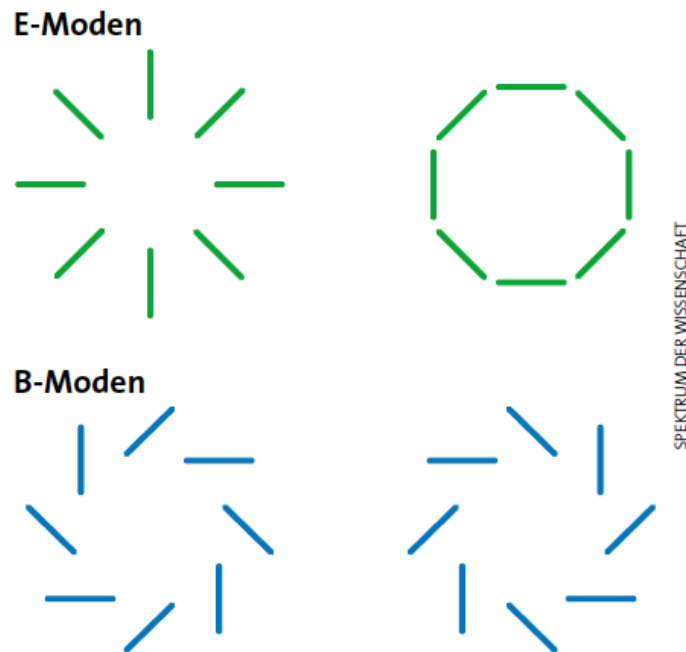
## 6. Polarisation: Primordiale Gravitationswellen?



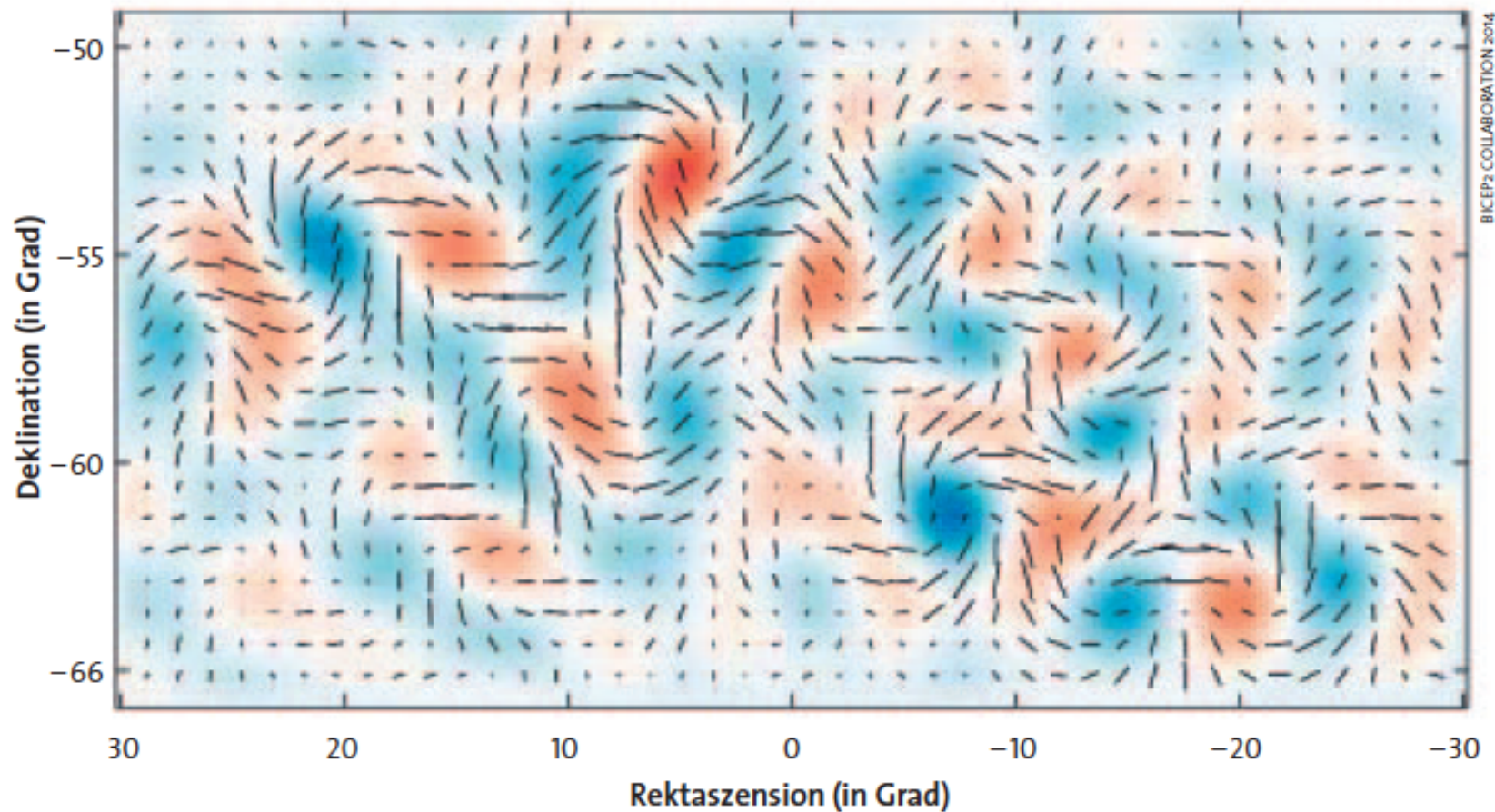
Südpolteleskop (links) und BICEP2 Instrument am Südpol

- Primordiale, in der Inflationsphase erzeugte Gravitationswellen modifizieren die kosmische Hintergrundstrahlung und prägen ihr eine charakteristische Polarisation auf, sogenannte B-Moden.
- Dieses Polarisationsmuster ist im Prinzip im Multipolbereich zwischen  $\ell = 30$  und 200 nachweisbar, jedoch haben bisherige Messungen keine eindeutigen Ergebnisse ergeben.
- Das BICEP2-Experiment am Südpol hat im März 2014 Messergebnisse bekanntgegeben; dabei wurde das durch kosmischen Staub verursachte Vordergrundsignal abgeschätzt.
- Die Vordergrundabschätzung benutzte vorläufige Ergebnisse der Planck-Kollaboration, die später korrigiert wurden.

# Polarisationsmuster in der Hintergrundstrahlung

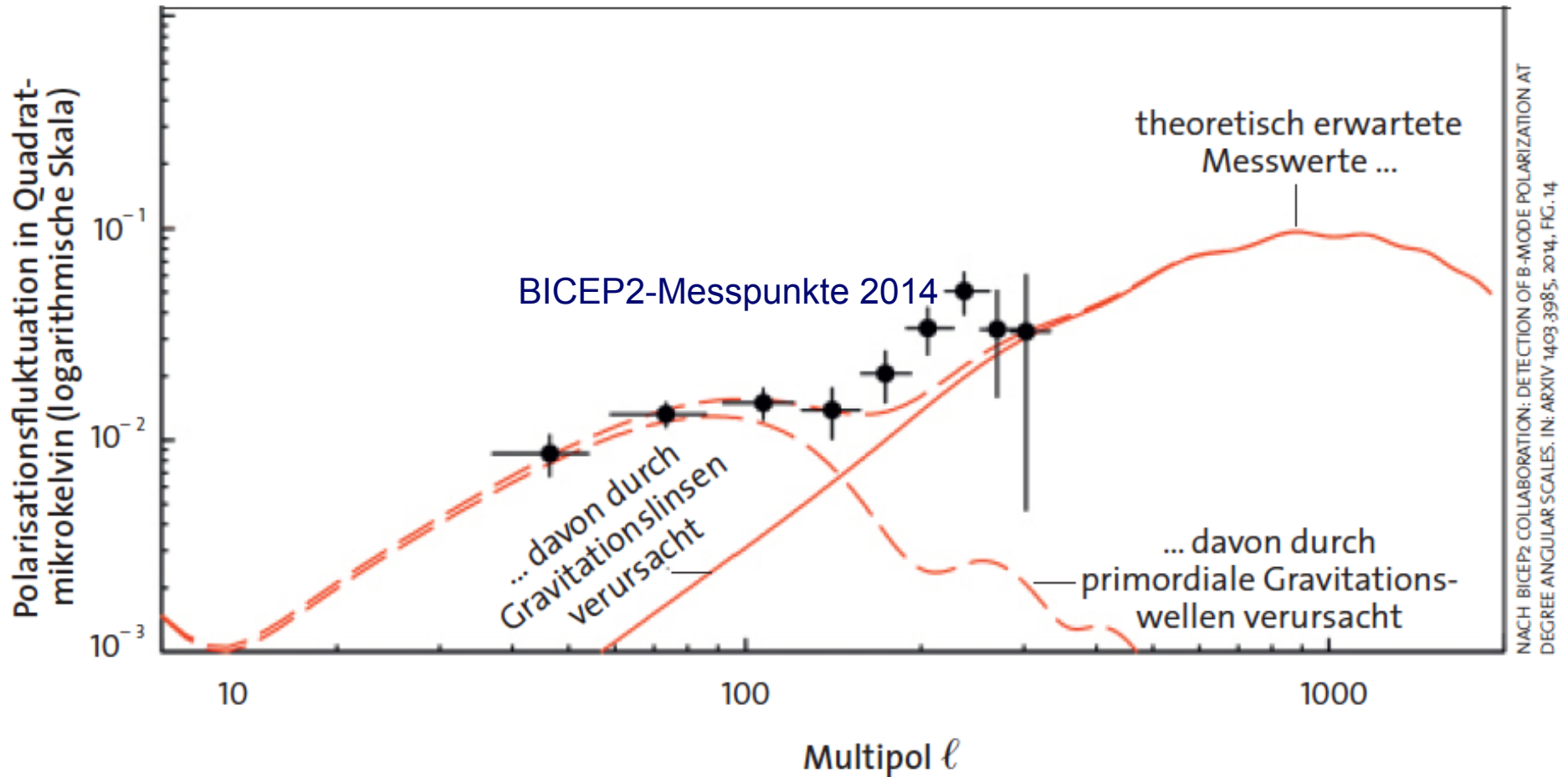


E- und B-Moden in der Polarisation der Hintergrundstrahlung lassen sich bildlich als Striche darstellen, die angeben, in welcher Richtung das Licht an einer bestimmten Stelle des Himmels polarisiert ist. Bei E-Moden zeigen sich radiale oder kreisförmige Muster der Polarisation (oben), bei B-Moden (unten) wirbelförmige, die in unterschiedliche Richtung zeigen können. E-Moden rühren von Dichteschwankungen im primordialen Universum her. B-Moden können von primordialen Gravitationswellen stammen, aber auch von Vordergrundeffekten, zum Beispiel von Gravitationslinsen oder von Staub in der Sichtlinie.



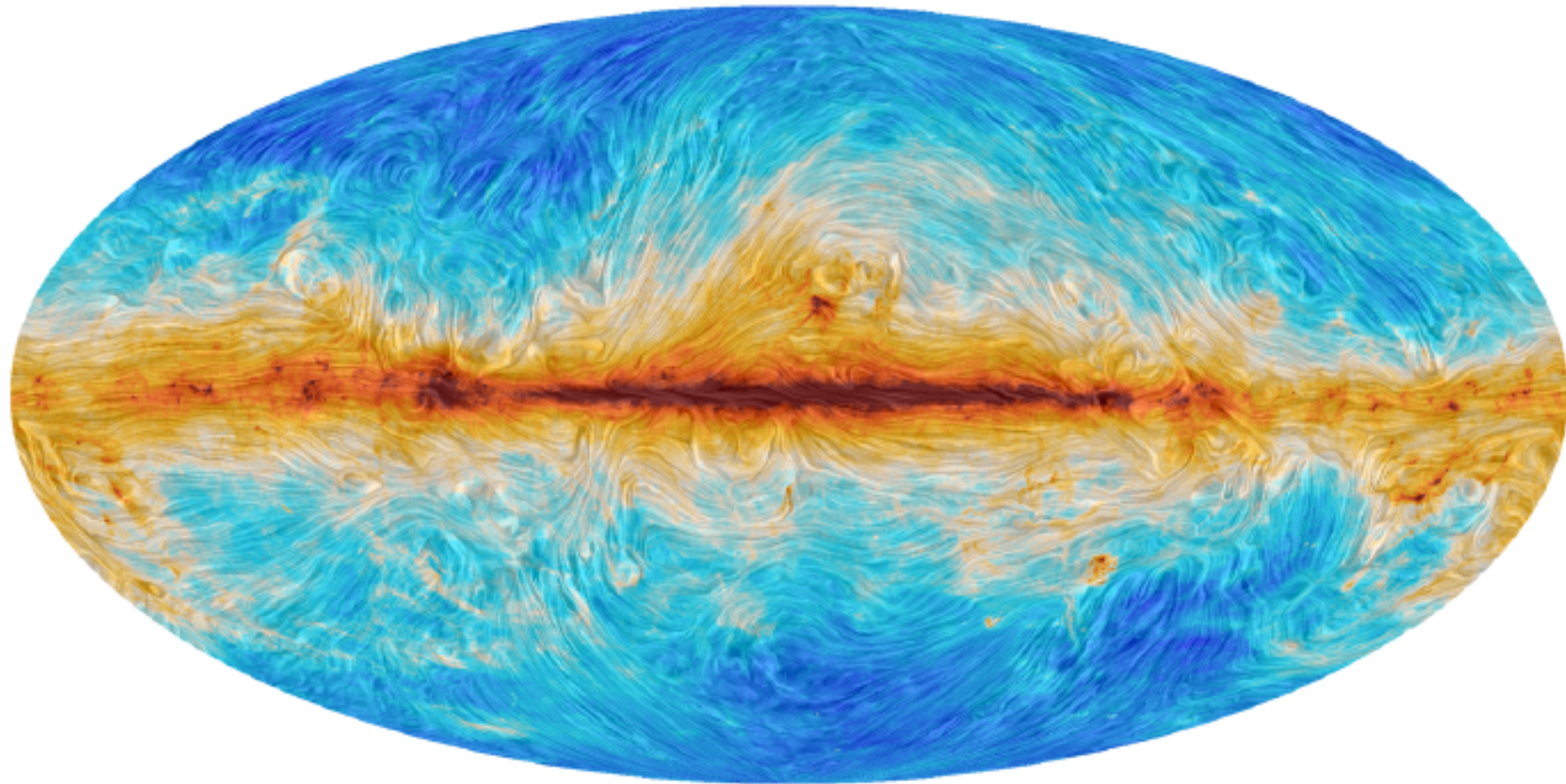
Gravitationswellen aus der Inflationsphase des nur Sekundenbruchteile alten Universums bewirken eine charakteristische Verwirbelung der so genannten B-Moden der kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung. Rote Bereiche in diesem vom BICEP2-Team gewonnenen Diagramm stehen für Verwirbelung im Uhrzeigersinn, blaue für die Gegenrichtung. An den beiden Achsen sind die Himmelskoordinaten abzulesen. Das Instrument vermaß ein Himmelsfeld in den südlichen Sternbildern Indus, Pendeluhr und Tukan, auf das vom Südpol aus besonders gute Sicht im Mikrowellenbereich herrscht.

# B-Moden der CMB-Polarisation



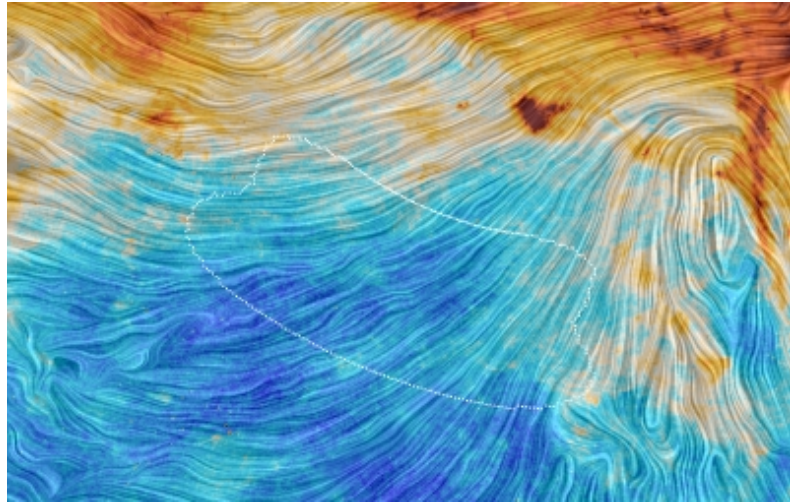
BICEP2 Kollaboration, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 241101/  
Spektrum d. Wissenschaft

## Planck: Polarisationsmessungen (bei 7 Frequenzen, 30-353 GHz)

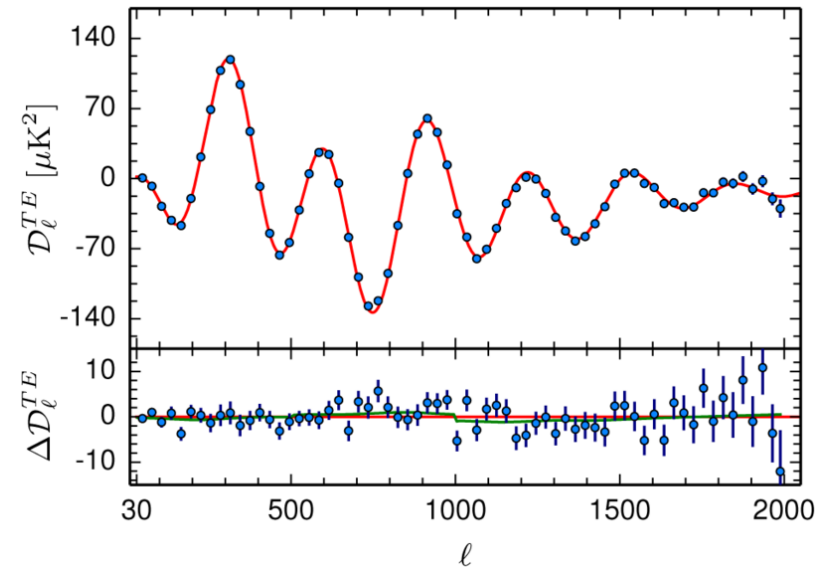


**Fig. 22.** All-sky view of the magnetic field and total intensity of dust emission measured by *Planck*. The colours represent intensity. The “drapery” pattern, produced using the line integral convolution (LIC, Cabral & Leedom 1993), indicates the orientation of magnetic field projected on the plane of the sky, orthogonal to the observed polarization. Where the field varies significantly along the line of sight, the orientation pattern is irregular and difficult to interpret.

## BICEP2-Sichtfeld in Plancks Messung



Planck: Temperatur-Polarisations-Korrelationsspektrum



Dieser Ausschnitt des kosmischen Mikrowellenhintergrundes, aufgenommen von der Planck-Mission, zeigt den Bereich (weiße Linie), den die BICEP2-Kollaboration beobachtet hat, um dort Anzeichen für die Inflationsphase zu finden. (Bild: ESA/Planck Collaboration).

Ergebnis der gemeinsamen Planck/BICEP2-Analyse in Phys. Rev. Lett. 114,101301 (2015):

»...We find strong evidence for dust and no statistically significant evidence for tensor modes.«

# 7. Ausblick

- Die **beschleunigte Expansion** des Kosmos für  $z < 1$ , und die Abbremsung für  $z > 1$  sollen genauer getestet werden
- Die **physikalische Ursache** der beschleunigten Expansion (»**dunkle Energie**«) soll aufgedeckt werden: Hauptziel des SFB/ Transregio 33 »The Dark Universe«, Universitäten Bonn – Heidelberg – München.

Mögliche Alternativen: - Kosmologische Konstante (Physikalische Ursache?)  
- Zeitabhängige dunkle Energie (Quintessenz)  
- Modifikation der Gravitation

- **dunkle Materie** soll (direkt) nachgewiesen werden:  
Zahlreiche Experimente zum direkten Nachweis wie Xenon100, CRESST, CDMS
- Verbesserte Experimente sollen **primordiale Gravitationswellen** suchen





Danke für die Aufmerksamkeit und das Interesse an Planck!

