

Der Mikrowellenhintergrund: von Penzias und Wilson zu Planck

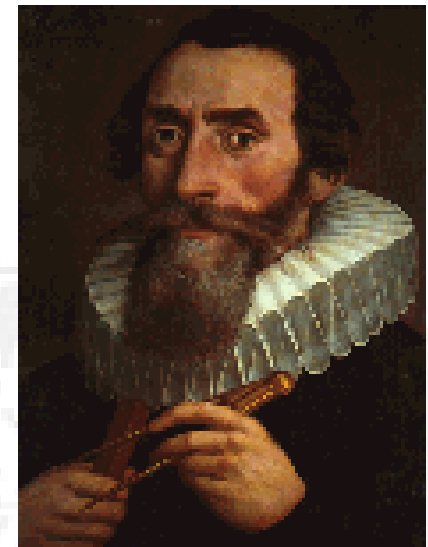


Heute

- Am Anfang war ...
- Bell Laboratories und Princeton: die Entdeckung
- Die kosmische Zeitskala
- Beobachtungen des Mikrowellenhintergrundes
- Was bedeuten die Spektren?
- WMAP und die Konsequenzen
- Zweifel an den WMAP Resultaten

Am Anfang ...

- Die Erschaffung der Welt:
 - Der angelsächsische Benediktinermönch Beda Venerabilis (673-735) errechnete aus den Angaben der hebräischen und lateinischen Bibel das Datum auf den 18. März 3952 vor Christus
 - 27. April 3877 vor Christus, 11 Uhr vormittags (Johannes Kepler)
 - 3950 vor Christus (Joseph Justus Scaliger)
 - 23. Oktober 4004 vor Christus, 6 Uhr morgens (Erzbischof Usher von Canterbury)

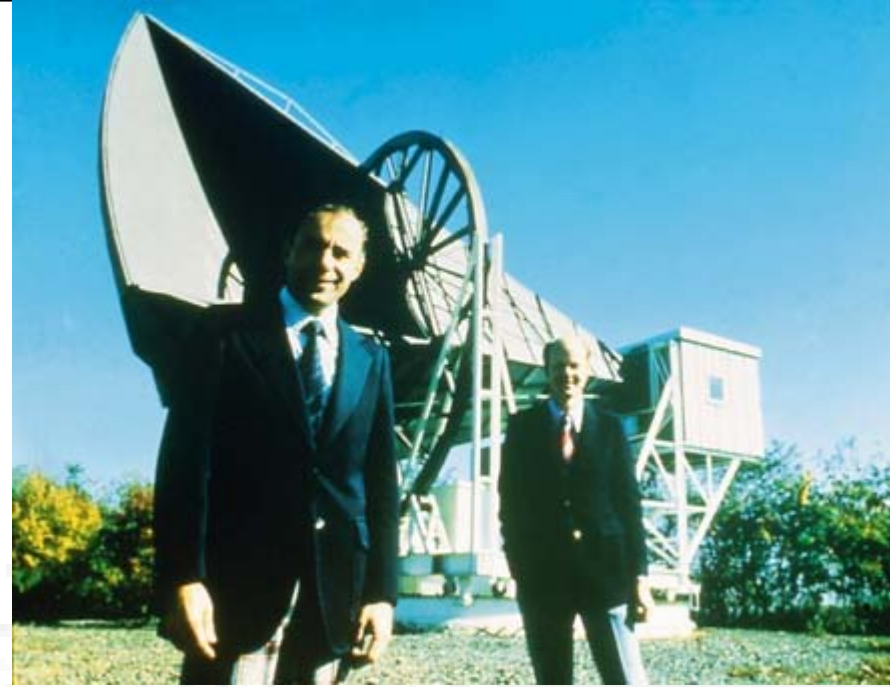


Die Situation zu Beginn der 60iger Jahre

- Ende der 1920er Jahre: Edwin Hubble findet, daß sich Galaxien umso schneller von uns entfernen, je weiter sie entfernt sind
- 1948: der russisch-amerikanische Physiker George Gamov berechnet daraus den Zeitpunkt der „Explosion“: vor 15 Milliarden Jahren, Gamov postuliert, daß Urknall von 10 Milliarden Kelvin heißer Strahlung begleitet gewesen sein sollte -> Abkühlung auf etwa 5 Kelvin vermutet, sollte noch nachweisbar sein (Äquivalenz von „Temperatur“ und „Strahlung“)
- In den 60iger Jahren hatten R. Penrose und S. Hawking den Weg der Galaxien konsequent zu einem einzelnen Ursprungspunkt zurück verfolgt und dafür den Begriff der Singularität salonfähig gemacht
- Fred Hoyle: setzt Steady-State Hypothese gegen die Expansion, prägt „Big Bang“ in einem BBC-Interview als Verballhornung von Gamovs Theorie

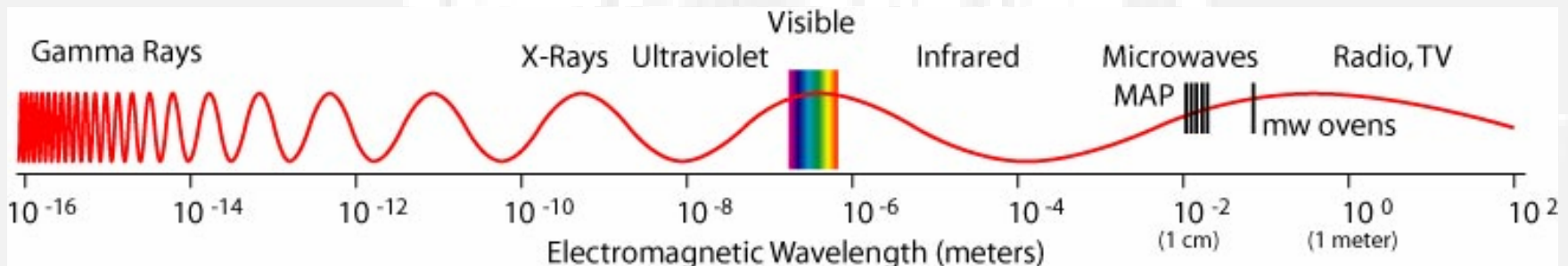
Am Anfang, der älteste Radiosender der Welt

- Penzias und Wilson sollten schwache Radioquellen in unserer eigenen Milchstraße untersuchen
- Ehrgeiziges Ziel: wollen Grundrauschen eliminieren
- erwarteten, daß sich ein Grundrauschen von 3.5 K nicht würde vermeiden lassen, tatsächliche Werte aber viel höher: 7.5 K



Tauben

- Taubenpaar hatte sich in der Antenne eingenistet: „weiße, dielektrische Substanz“ verschmutzt die Antenne
 - 1) Tauben wurden einige Kilometer weiter verfrachtet (50 km)
 - 2) Tauben wurden „dauerhaft entfernt“, Penzias: „daß es am humansten wäre, sie zu erschießen“
- Rauschen bleibt ...
- Penzias telephonierte mit Burke (MIT), erfährt von Peeble und Dicke (Princeton)
- Robert Dicke und Jim Peebles beschäftigen sich mit Theorie eines oszillierenden Universums, Peebles berechnet die Temperaturen die „jeweils“ beim Urknall entstehen müssen um die während der Jahrtausenden langen Expansion des Universums entstandenen schweren Elemente zu zerstören, damit ein „frischer“, neuer Zyklus beginnen kann, kannten Gamovs Ergebnisse nicht, kommen auf ähnliche Werte (höchstens 10 Kelvin)



Zeitgleiche Publikation

- Wilson, Penzias, Peebles, Dicke treffen sich und hören sich die vor 15 Milliarden Jahren ausgestrahlte Radiosendung an

A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about 3.5° K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and

No. 1, 1965

LETTERS TO THE EDITOR

421

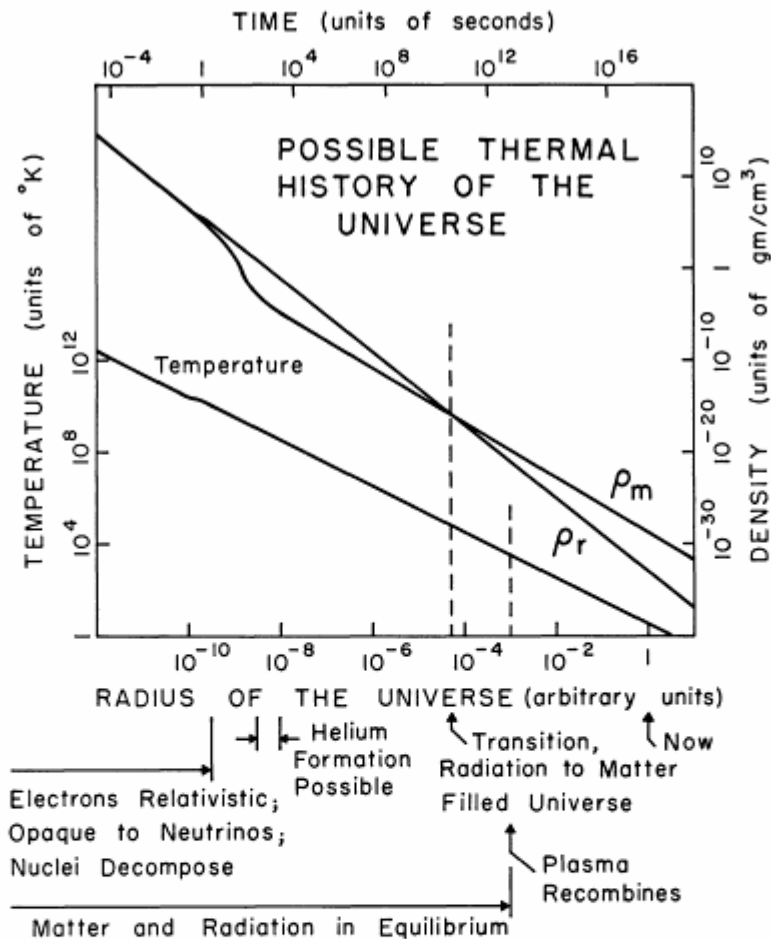
Note added in proof.—The highest frequency at which the background temperature of the sky had been measured previously was 404 Mc/s (Pauliny-Toth and Shakeshaft 1962), where a minimum temperature of 16° K was observed. Combining this value with our result, we find that the average spectrum of the background radiation over this frequency range can be no steeper than λ^0 . This clearly eliminates the possibility that the radiation we observe is due to radio sources of types known to exist, since in this event, the spectrum would have to be very much steeper.

A. A. PENZIAS
R. W. WILSON

May 13, 1965

BELL TELEPHONE LABORATORIES, INC
CRAWFORD HILL, HOLMDEL, NEW JERSEY

- Verabreden eine zeitgleiche Publikation



Dicke, R. H., Peebles, et al. 1965

FIG 1 —Possible thermal history of the Universe. The figure shows the previous thermal history of the Universe assuming a homogeneous isotropic general-relativity cosmological model (no scalar field) with present matter density 2×10^{-29} gm/cm³ and present thermal radiation temperature 3.5° K. The bottom horizontal scale may be considered simply the proper distance between two chosen fiducial co-moving galaxies (*points*). The top horizontal scale is the proper world time. The line marked "temperature" refers to the temperature of the thermal radiation. Matter remains in thermal equilibrium with the radiation until the plasma recombines, at the time indicated. Thereafter further expansion cools matter not gravitationally bound faster than the radiation. The mass density in radiation is ρ_r . At present ρ_r is substantially below the mass density in matter, ρ_m , but, in the early Universe ρ_r exceeded ρ_m . We have indicated the time when the Universe exhibited a transition from the characteristics of a radiation-filled model to those of a matter-filled model.

Looking back in time, as the temperature approaches 10^{10} ° K the electrons become relativistic, and thermal electron-pair creation sharply increases the matter density. At temperatures somewhat greater than 10^{10} ° K these electrons should be so abundant as to assure a thermal neutrino abundance and a thermal neutron-proton abundance ratio. A temperature of this order would be required also to decompose the nuclei from the previous cycle in an oscillating Universe. Notice that the nucleons are non-relativistic here.

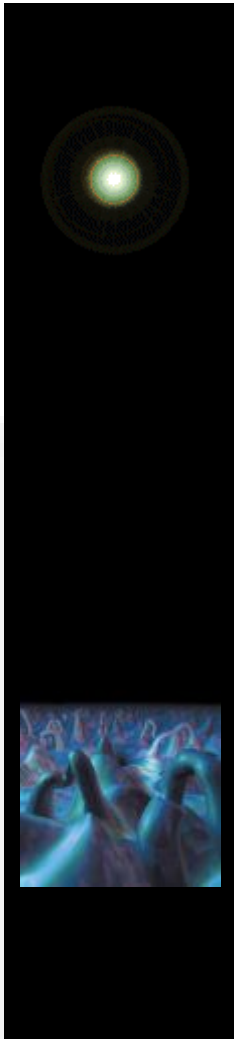
The thermal neutrons decay at the right-hand limit of the indicated region of helium formation. There is a left-hand limit on this region because at higher temperatures photodissociation removes the deuterium necessary to form helium. The difficulty with this model is that most of the matter would end up in helium.

Nach der Entdeckung

- Gamow erlebte Beweis seiner Theorie
- 1978 Nobelpreis an Penzias und Wilson, blieben bei den Bell Laboratories, Teilzeit: Radioastronomie + „Brauchbareres“
- Banquett speech of Penzias
- Hoyle bleibt vermutlich einer der wenigen Anhänger seiner Theorie (Materie entsteht kontinuierlich mit zunehmender Ausdehnung des Universums und kondensiert aus dem Vakuum, um den hinzu gekommenen Raum mit konstanter Dichte aufzufüllen), Hoyle stirbt 2001

Die kosmische Zeitskala (kurz)

Zeitalter der Quantengravitation



t = 0 s

Singularität

Zustand unendlich grosser Dichte in einem unendlich kleinen Volumen, auf den die heute bekannten physikalischen Gesetze nicht anwendbar sind.

bis t = 10⁻⁴³ s

Planck-Ära

T = 10³² K

Die eigentliche Geschichte des Universums beginnt nicht bei Null, sondern etwas später. Vor der [Planck-Zeit](#) war es so klein, dass eine Quantenunschärfe dominierte, die mit den heutigen Theorien nicht zu beschreiben ist. Virtuelle Teilchen entstanden spontan aus dem Vakuum und zerstrahlten wieder. Diese Vorgänge unterlagen keinen kausalen Zusammenhängen und waren daher unvorhersehbar. Die heute bekannten 4 [Naturkräfte](#) (Gravitation, elektromagnetische Kraft, starke und schwache Kernkraft) waren noch in einer einzigen, allumfassenden Kraft vereint. Die Planck-Ära endet mit einer ersten Aufspaltung dieser Kraft.

Zeitalter der Symmetrie-Brechungen



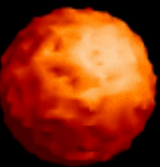
$$t = 10^{-43} \text{ s}$$

$$T = 10^{30} \text{ K}$$

$$d = 10^{-35} \text{ m}$$

GUT-Ära

Die Gravitation wird zur eigenständigen Kraft und hinterlässt die vereinigten Kräfte der *Grand Unified Theory* (Elektronukleare Wechselwirkung). Die Ausbildung unterschiedlicher Naturkräfte, wird auch als Symmetrie-Brechung bezeichnet und ereignet sich noch zwei mal.



$$t = 10^{-35} \text{ s}$$

bis

$$t = 10^{-32} \text{ s}$$

$$T = 10^{27} \text{ K}$$

bis

$$T = 10^{23} \text{ K}$$

$$d = 10^{-30} \text{ m}$$

bis

$$d = 0,1 \text{ m}$$

Inflation

Die Aufspaltung der GUT-Kraft in die elektroschwache Wechselwirkung und die starke Kernkraft liefert den Antrieb für ein plötzliches Aufblähen des Raums um mehrere Größenordnungen (ca. 10^{50} -faches Volumen).

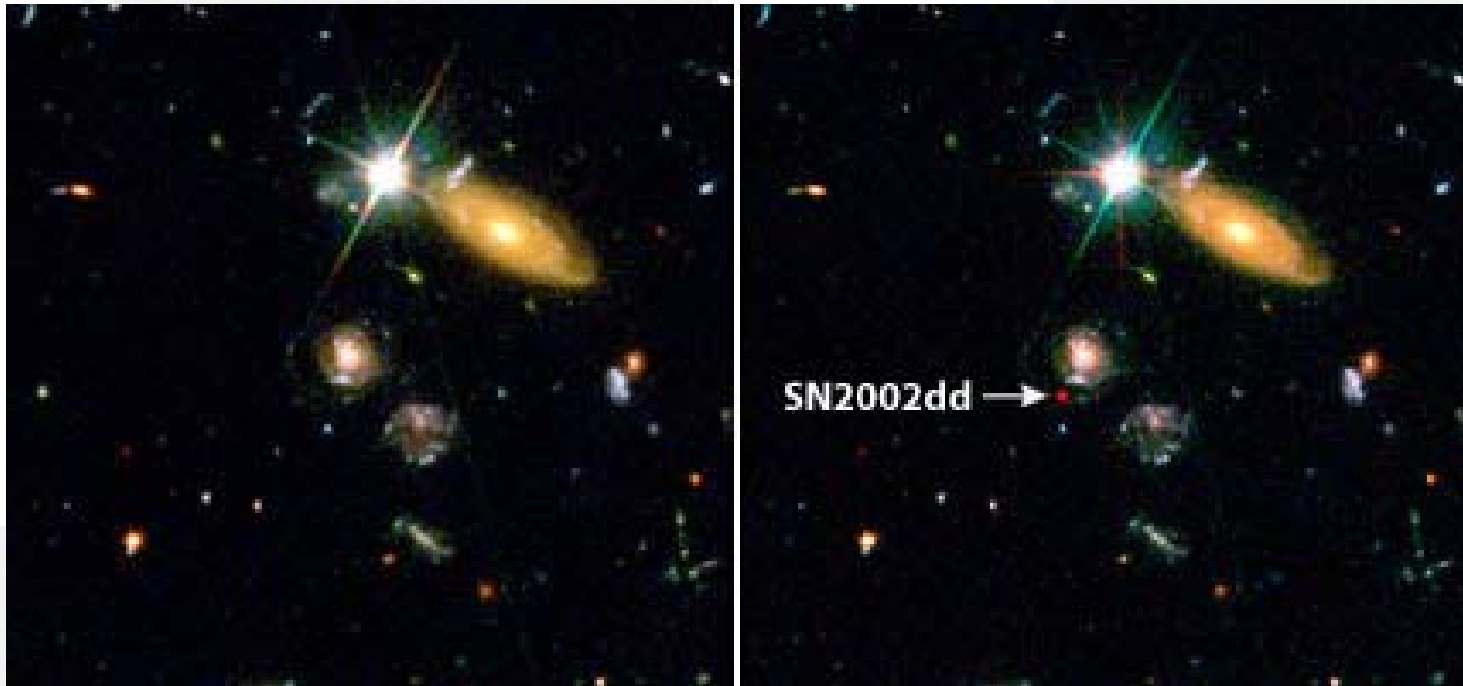


$$t = 10^{-12} \text{ s}$$

$$T = 10^{16} \text{ K}$$

Die elektroschwache Kraft spaltet sich in die elektromagnetische Kraft und die schwache Kernkraft auf. Damit liegen alle 4 bekannten Naturkräfte separat vor. Die Vakuumenergie verwandelt sich in elektromagnetische Strahlung, die sich wiederum teilweise in Elementarteilchen umwandelt und damit Materie entstehen lässt. Die Vakuumenergie beträgt heute Null.

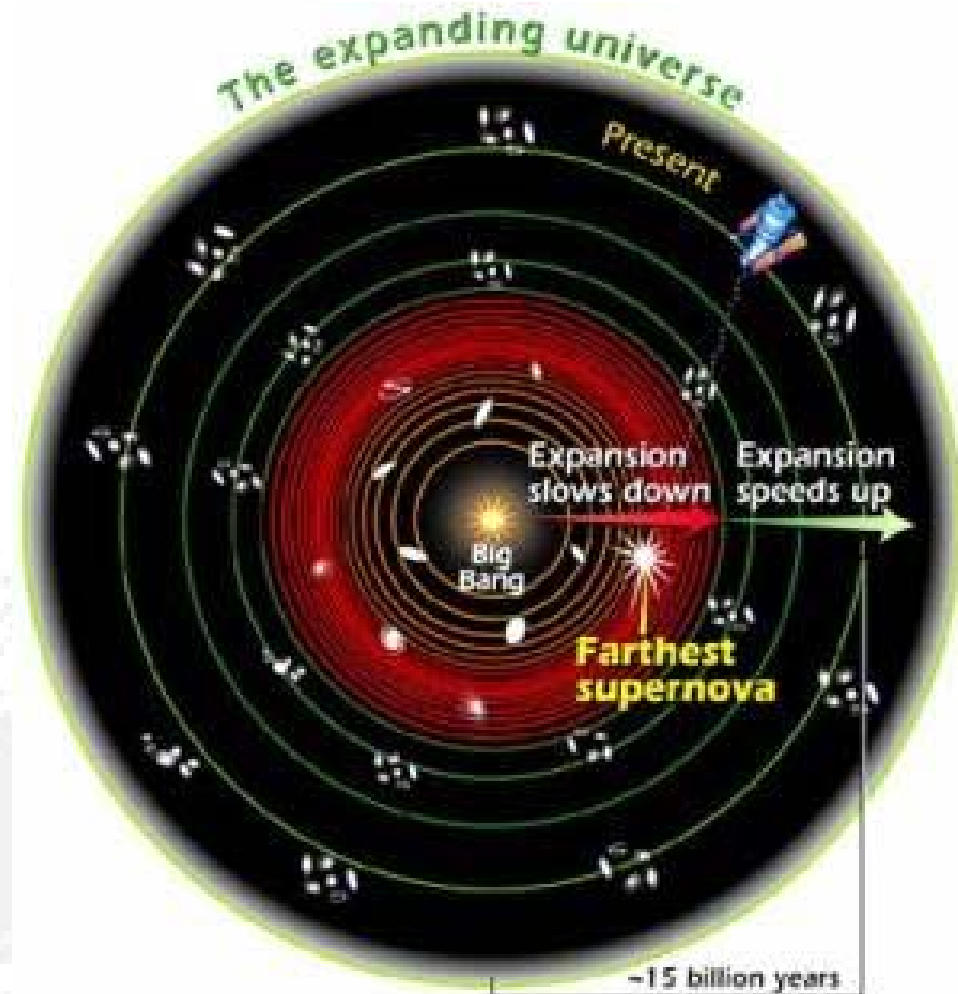
Inflation – rapide Expansion des Universums



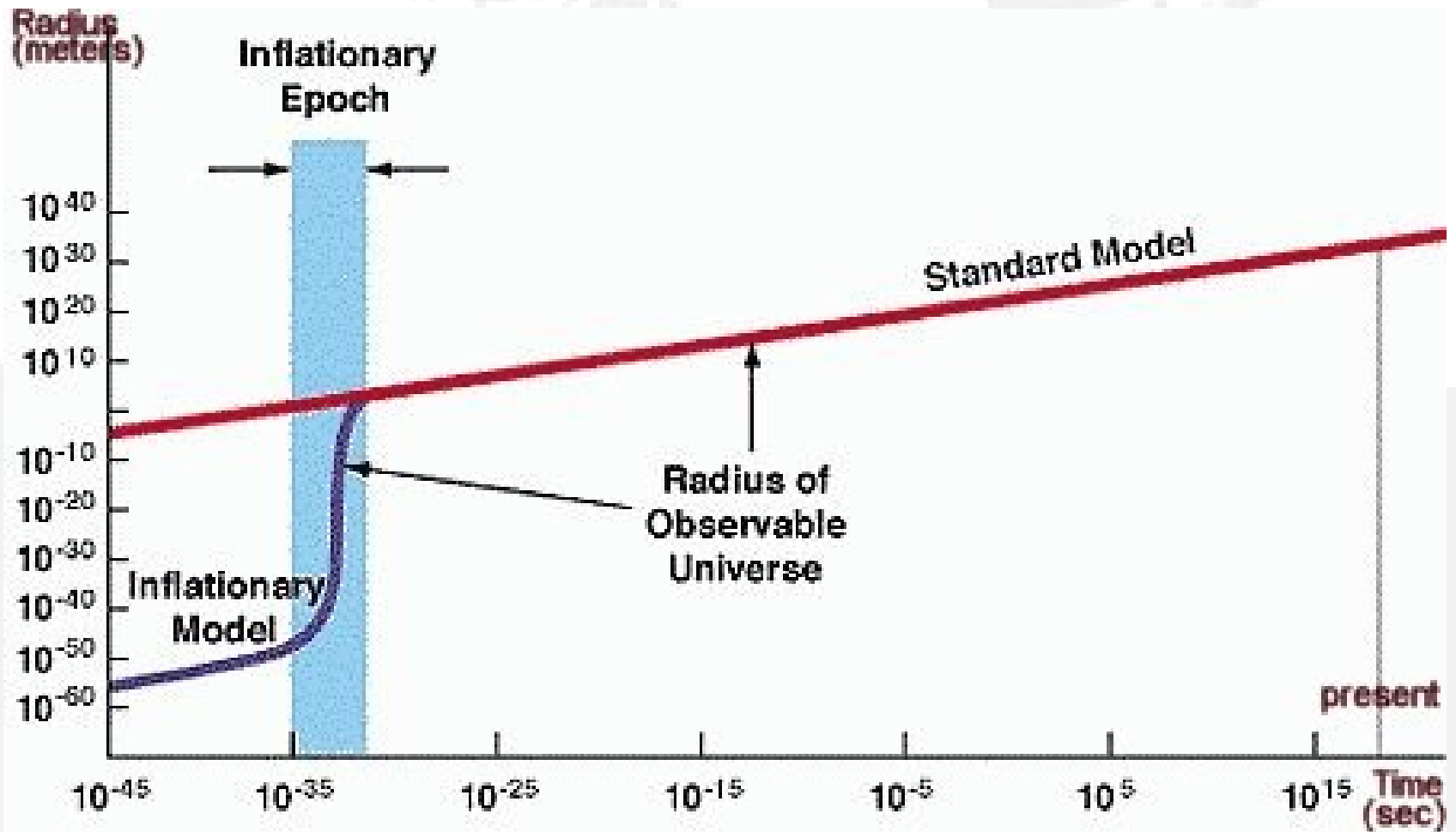
- *Left:* A small portion of the original Hubble Deep Field image, which the Hubble Space Telescope acquired in late 1995. *Right:* The same field, imaged 6½ years later with Hubble's Advanced Camera for Surveys. ACS serendipitously captured a supernova explosion (SN2002dd) that took place when the universe was slightly less than half its current age. Such supernovae have shown that the universe's expansion has been speeding up in the last few billion years. Courtesy NASA and John P. Blakeslee (Johns Hopkins University).

Inflationäres Universum

- taken from:
<http://spaceflightnow.com/news/n0104/03supernova/>
- Supernove Typ Ia
- Kein Wasserstoff
- Nur Linien höherer Elemente:
Helium und Kohlenstoff
- Leuchtkraft steigt rasch an,
innerhalb weniger Stunden Max.,
fällt ab
- Abweichungen vom
gleichförmigen
Expansionsgesetz für
Supernovae bei hohen
Rotverschiebungen



Inflationäres Universum



Zeitalter der Symmetrie-Brechungen



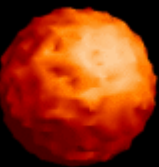
$$t = 10^{-43} \text{ s}$$

$$T = 10^{30} \text{ K}$$

$$d = 10^{-35} \text{ m}$$

GUT-Ära

Die Gravitation wird zur eigenständigen Kraft und hinterlässt die vereinigten Kräfte der *Grand Unified Theory* (Elektronukleare Wechselwirkung). Die Ausbildung unterschiedlicher Naturkräfte, wird auch als Symmetrie-Brechung bezeichnet und ereignet sich noch zwei mal.



$$t = 10^{-35} \text{ s}$$

bis

$$t = 10^{-32} \text{ s}$$

$$T = 10^{27} \text{ K}$$

bis

$$T = 10^{23} \text{ K}$$

$$d = 10^{-30} \text{ m}$$

bis

$$d = 0,1 \text{ m}$$

Inflation

Die Aufspaltung der GUT-Kraft in die elektroschwache Wechselwirkung und die starke Kernkraft liefert den Antrieb für ein plötzliches Aufblähen des Raums um mehrere Größenordnungen (ca. 10^{50} -faches Volumen).



$$t = 10^{-12} \text{ s}$$

$$T = 10^{16} \text{ K}$$

Die elektroschwache Kraft spaltet sich in die elektromagnetische Kraft und die schwache Kernkraft auf. Damit liegen alle 4 bekannten Naturkräfte separat vor. Die Vakuumenergie verwandelt sich in elektromagnetische Strahlung, die sich wiederum teilweise in Elementarteilchen umwandelt und damit Materie entstehen lässt. Die Vakuumenergie beträgt heute Null.

Zeitalter der Quarks

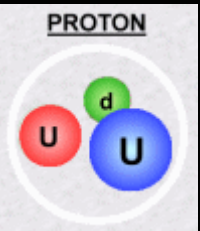


$t = 10^{-10} \text{ s}$ Quark-Suppe

$T = 10^{15} \text{ K}$

K

Quarks, Antiquarks und Gluonen (die Überträgerteilchen der starken Kernkraft) liegen ungebunden nebeneinander vor und der grösste Teil der gerade entstandenen Materie vernichtet sich selbst. Die vorher aus Strahlungsenergie in fast gleicher Anzahl entstandenen Quarks und Antiquarks treffen aufeinander und zerstrahlen wieder. Durch eine leichte Asymmetrie sind jedoch mehr Quarks als Antiquarks vorhanden, so dass etwa ein Milliardstel der ursprünglichen Materie übrig bleibt. Dieser winzige Bruchteil bildet bis heute die gesamte materielle Welt.



$t = 10^{-6} \text{ s}$

$T = 10^{13} \text{ K}$

K

Die starke Kernkraft sorgt dafür, dass sich die Quarks zu Protonen und Neutronen, den Bestandteilen der Atomkerne, vereinigen. Dabei entstehen Protonen und Neutronen in einem Verhältnis von etwa 5:1.



$t = 1 \text{ s}$

$T = 10^{10} \text{ K}$

K



Die Energie der Strahlung reicht nicht mehr aus, um Elektronen und Positronen (Antiteilchen des Elektrons mit Ladung +1) zu bilden. Wie vorher Quarks und Antiquarks zerstrahlen auch die meisten Elektron-Positron-Paare wieder. Nur ein Bruchteil der Elektronen bleibt übrig, der jedoch genau die Ladung der Protonen ausgleicht, so dass das Universum elektrisch neutral bleibt.

t = 1 min

bis

t = 3 min

T = 10^9 K
bis

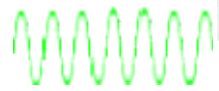
T = 108 K



Nukleosynthese

Die aus freien Quarks entstandenen Protonen (Wasserstoffkerne) und Neutronen verschmelzen durch Kernfusion teilweise zu Deuterium (Wasserstoff-Isotop), Helium sowie Spuren von Lithium und Beryllium. Schwerere Elemente werden nicht gebildet, da sich das Universum zu rasch abkühlt. Drei Viertel der im Weltall enthaltenen Materie bestehen bis heute aus dem einfachsten Element Wasserstoff und seinen Isotopen. Das restliche Viertel besteht überwiegend aus Helium.

Zeitalter der Strahlung

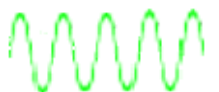


$$t = 1\text{J}$$

$$T = 10^7\text{ K}$$

Strahlungs-Zeitalter

Das Universum wird nach wie vor von den in milliardenfacher Überzahl vorhandenen Photonen der elektromagnetischen Strahlung beherrscht, die jedoch ständig an Elektronen gestreut werden und keine langen Wege zurücklegen können. Etwa einen Monat nach dem Urknall bildet sich das charakteristische Schwarzkörper-Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung aus (spektrale Entkopplung), aber noch ist das Weltall undurchsichtig. Die Wellenlänge der Strahlung nimmt mit der fortschreitenden Ausdehnung ab und verschiebt sich vom Röntgenbereich ins sichtbare Licht.



$$t = 10^4\text{ J}$$

$$T = 25000\text{ K}$$



$$t = 10^5\text{ J}$$

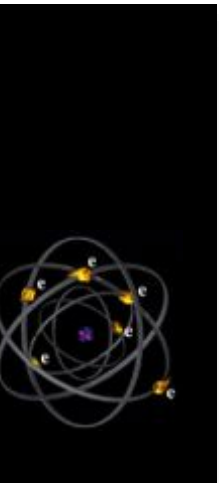
$$T = 6000\text{ K}$$

$$t = 3,8 \times 10^5\text{ J}$$

$$T = 3000\text{ K}$$

Entkopplung von Strahlung und Materie

Nach 379.000 Jahren ist die Temperatur so weit gesunken, dass die freien Elektronen von den Atomkernen eingefangen werden können und das Plasma zu neutralen Atomen kondensiert. Das Weltall wird durchsichtig und die kosmische Hintergrundstrahlung kann sich ungehindert ausbreiten. Damit beginnt das bis heute andauernde Zeitalter der Materie (***und die heutige Vorlesung***).



Zeitalter der Materie

bis $t = 10^8 \text{ J}$ Dunkles Zeitalter

Das Weltall ist jetzt zwar durchsichtig, aber noch dunkel, denn es fehlen die Lichtquellen in Form von Sternen. Die entstandene Materie kühlt langsam ab und treibt als unbeleuchtete Gaswolken durch den ansonsten leeren Raum.

$t = 2 \times 10^8 \text{ J}$ Erste Sterne

Die während der Inflationsphase vergrößerten und eingefrorenen Quanten-Fluktuationen stören die gleichmäßige Verteilung der Materie. Es bilden sich dichtere Zonen aus, die durch ihre verstärkte Schwerkraft noch mehr Gas anziehen. In riesigen, rotierenden Gasscheiben (*Protogalaxien*) entstehen durch weitere Verdichtung die ersten Sterne. Dabei handelt es sich grösstenteils um kurzlebige Blaue Riesensterne, die bereits nach wenigen Millionen Jahren wieder als Supernova explodieren.

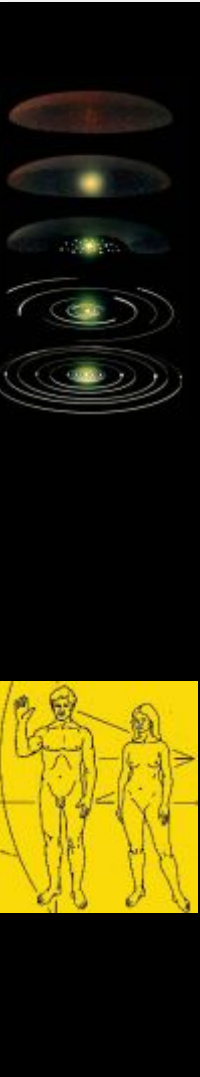


Zeitalter der Materie



t = Bildung von
10⁹ J Galaxien

T = Die Supernova-Explosionen der ersten Sterne senden Schockwellen durch die Gaswolken und lassen schnell noch mehr Dichteunterschiede entstehen, die die Bildung weiterer Sterne begünstigen (*Starburst*). In den Zentren der sich formenden Galaxien stürzt all jene Materie zusammen, die sich auf instabilen Umlaufbahnen befindet. Dort bilden sich gewaltige Schwarze Löcher mit mehreren Millionen Sonnenmassen, die alles in ihrer Umgebung aufsaugen und dabei intensive Röntgenstrahlung abgeben.



$t = 10 \times 10^9 \text{ J}$

Entstehung
des
Sonnensystems

Die turbulenten Prozesse aus der Entstehungszeit der Milchstrasse sind mittlerweile abgeschlossen und die früheren Sterngenerationen haben genug schwere Elemente in das interstellare Gas entlassen, um massive Himmelskörper formen zu können. So entsteht vor etwa 5 Milliarden Jahren in einem Ausläufer der Milchstrasse aus einer sich verdichtenden Wolke von Gas und Staub unsere Sonne mit ihren Planeten.

$t = 15 \times 10^9 \text{ J}$

Heute

$T = 2,726 \text{ K}$

Das Leben auf der Erde ist bereits über 4 Milliarden Jahre alt, aber die paar Jahrtausende der menschlichen Geschichte machen im kosmischen Maßstab nur einen Augenblick aus. Aus Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung durch den *Wilkinson Mikrowellen Anisotropie Satelliten* (WMAP) wurde ein aktuelles Alter des Universums von 13,7 Milliarden Jahren abgeleitet.

Alle Fragen gelöst

**Der Eindruck, der jetzt
entstanden ist, ist falsch!!**

Experimente

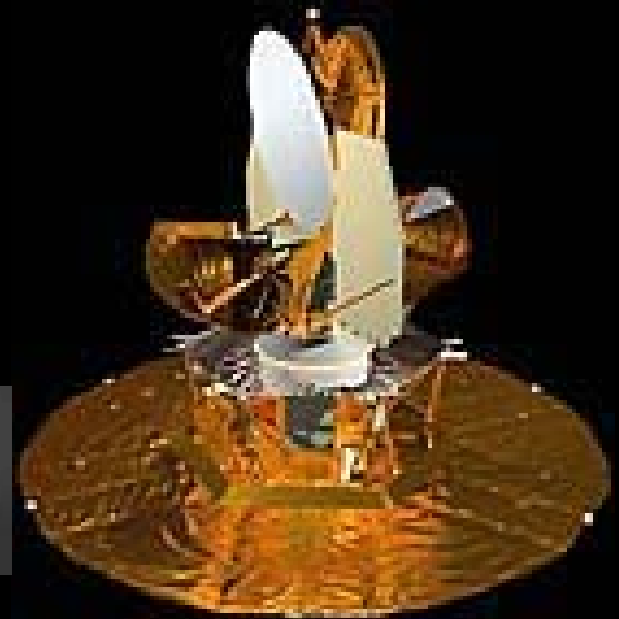
*Cosmic
Background
Imager*



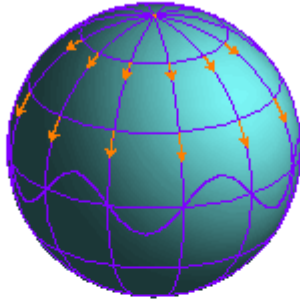
**Wilkinson
Microwave Anisotropy Probe**



**Arcminute Cosmology
Bolometer Array Receiver**



Expansion des Universums



(simulation and movie courtesy of Andrey Kravtsov)

- Mit der Expansion des Universums wird die Wellenlänge größer, die Energie der Photonen kleiner, die Temperatur der Hintergrundstrahlung nimmt ab; verdoppelt das Universum seine Größe, halbiert sich die Temperatur der CMB (kosmologische Rotverschiebung)

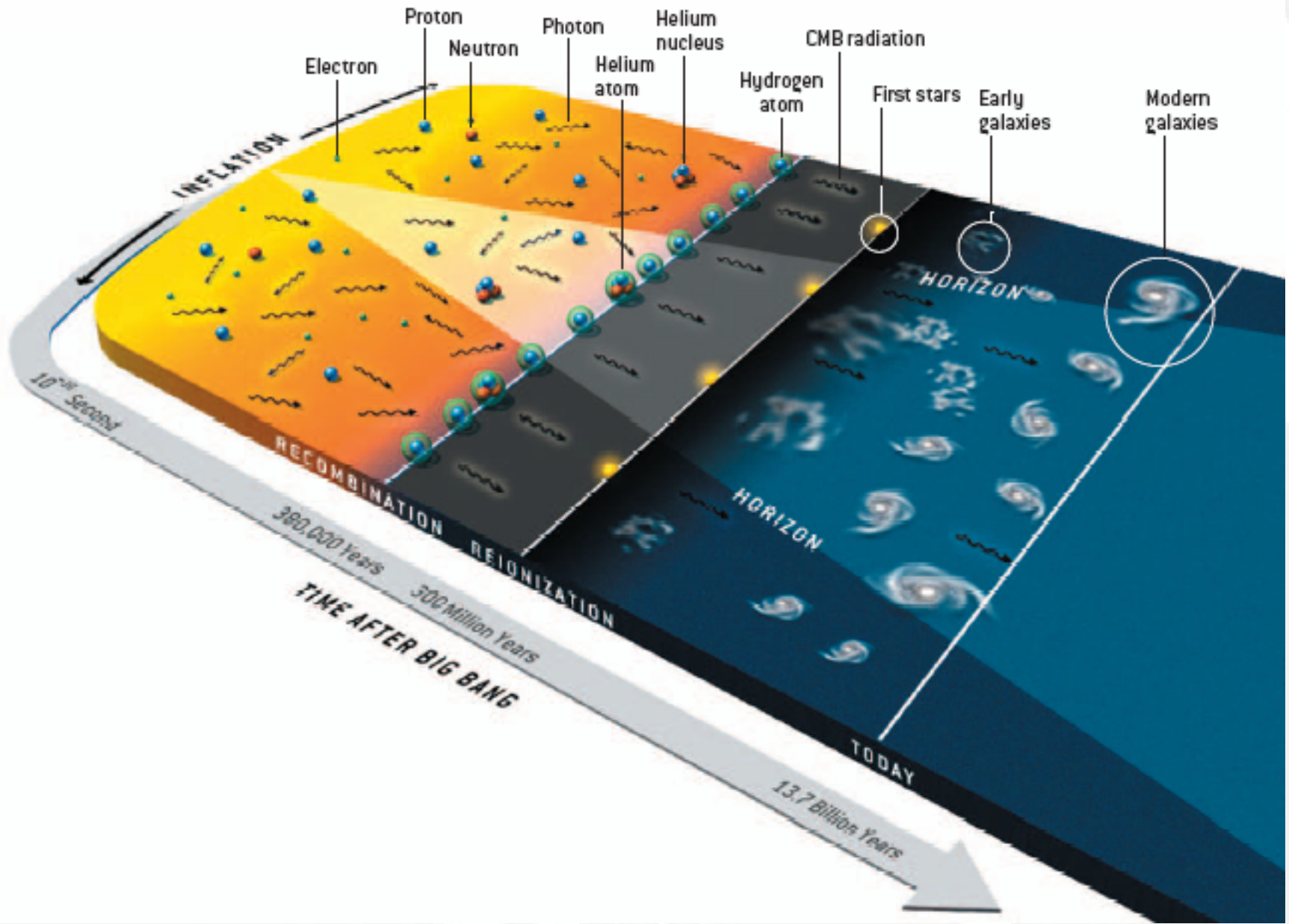
Rekombination

- Zunächst: Strahlung gefangen durch die Materie, Photonen, Elektronen und Protonen verhalten sich wie ein Gas, eine kleine Störung breitet sich wie Schallwelle aus: Folge von Kompressionen und Expansionen
- Strahlungsdruck widersteht einer Kompression (Gravitation) des Photonen-Baryonen-Gemischs: oszillierende Sequenz, Analogie zur Luft: Schallwellen, akustische Oszillationen
- Als das Universum $1/1000$ (Alter: 380 000 Jahre) der heutigen Größe hatte, CMB 1000 fach heißer (Temperatur von 3000 K): Protonen fangen die Elektronen und bilden Atome (**Rekombination**), Photonen werden nicht länger in Kollisionen mit geladenen Teilchen gestreut und können sich ausbreiten

Kompression/Expansion

- Photonen-Baryonen-Gemisch befindet sich im Gravitations-Potentialtopf der Regionen, in denen sich die Strukturen bilden (zufällige Quantenfluktuationen), im frühen Universum in der rapiden Expansion (Inflation) wurden die Quantenfluktuationen auf kosmische Skalen gedehnt
- Inflation produzierte die Dichte-Störungen alle gleichzeitig: die Phasen der Schallwellen sind synchronisiert
- Obertöne: Frequenzen sind ganzzahlige Vielfache der fundamentalen Frequenz
- Unterschied zwischen Stradivari und normalen Violinen
- Schallwellen im frühen Universum ähnlich, aber: Wellen oszillieren in der Zeit statt im Raum
- Schallwellen breiten sich im primordialen Plasma aus: beginnend mit der Inflation und endend mit der Rekombination (~380 000 Jahre später)

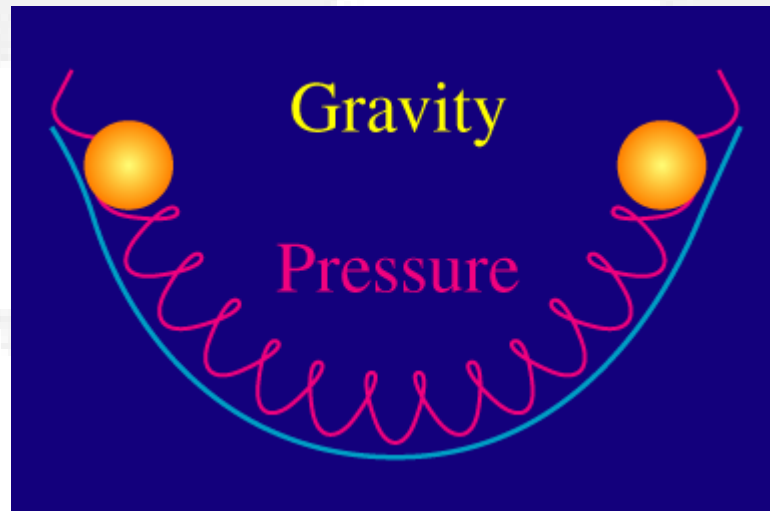
Kosmische Hintergrundstrahlung



- Die folgenden Seiten beruhen auf der
**Warner Prize lecture,
2001 von *W. Hu (U. Chicago),
AAS meeting***

<http://background.uchicago.edu/~whu/intermediate/intermediate.html>

Kompression/Expansion

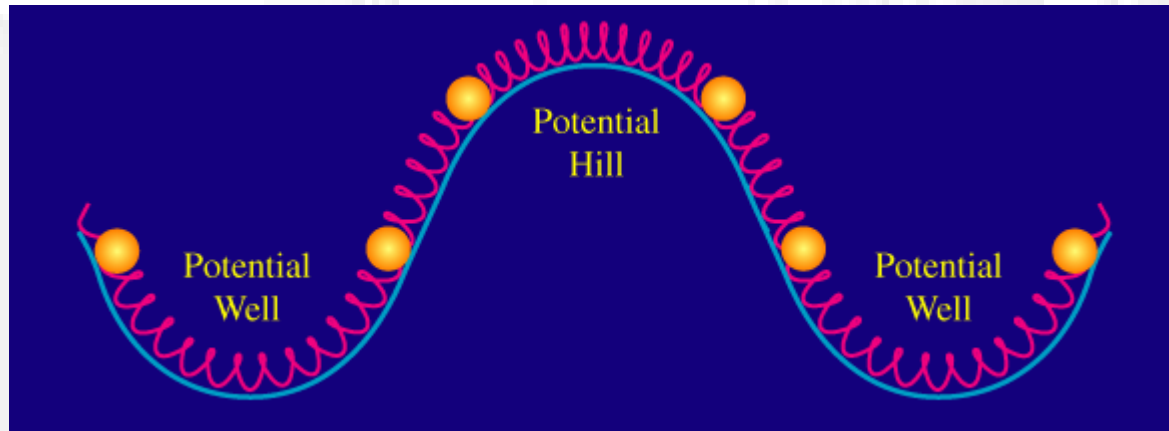


W. Hu

- Inflation: triggerte Schallwellen, die abwechselnd Regionen des primordialen Plasmas komprimieren und expandieren
- Als das Universum genügend abkühlte um die Bildung von neutralen Atomen zu ermöglichen, wurde das Muster der Dichteveränderungen (durch die Schallwellen) in die Hintergrundstrahlung eingefroren

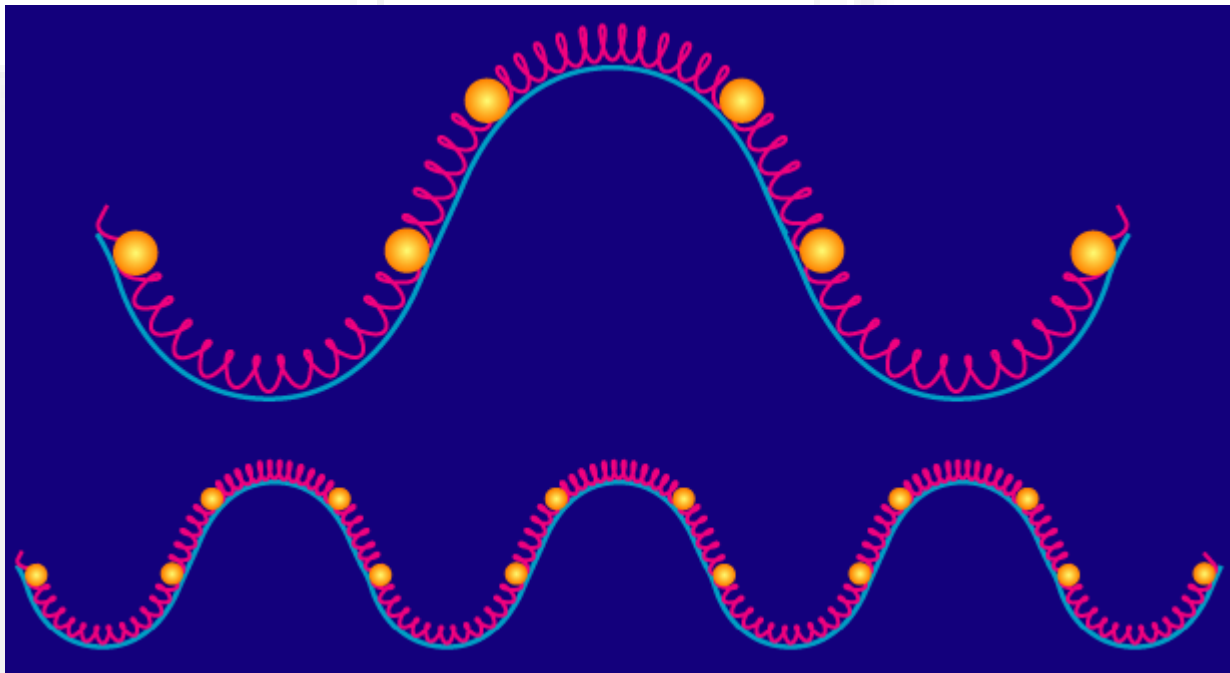
Kompression/Expansion

- Fluktuationen in der Energiedichte erzeugen Fluktuationen im lokalen Gravitationspotential, Regionen hoher Dichte erzeugen Potentialtäler, Regionen niedriger Dichte Potentialberge



Kompression/Expansion

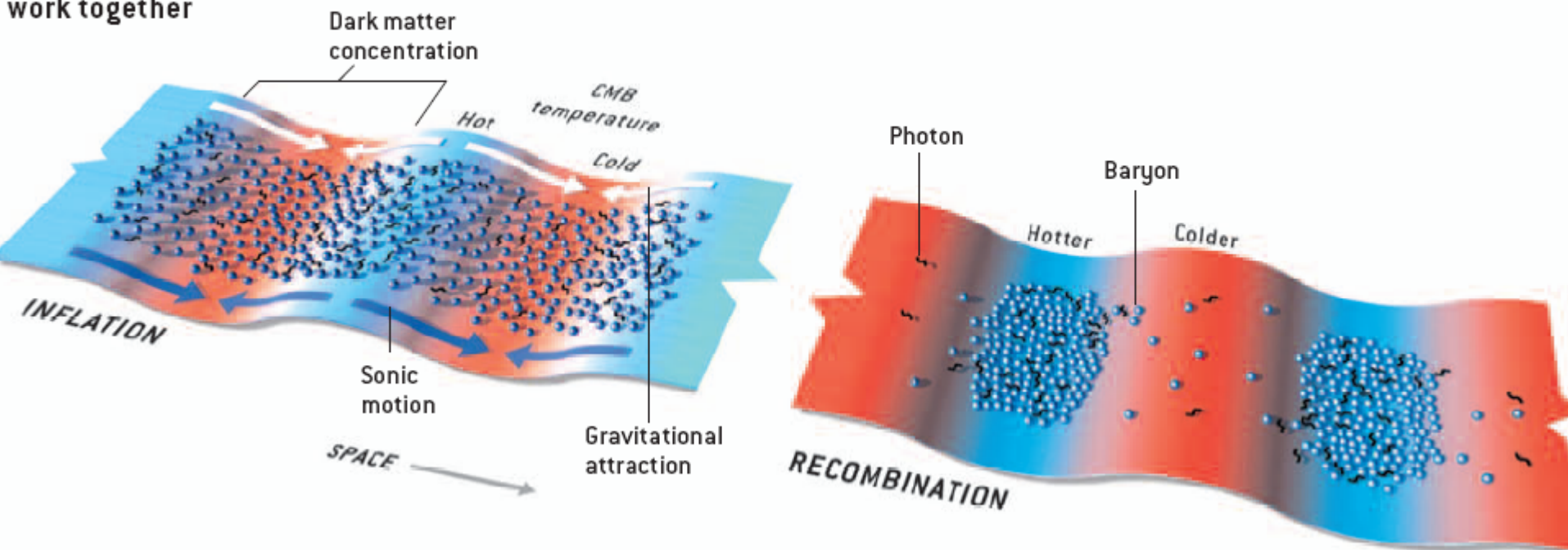
- Kompression heizt das Gas auf, Expansion kühlt es ab, CMB ist heißer wo die akustischen Wellen Kompression verursachen und kühler wo Expansion verursacht wird
- Inflation erzeugt Potentialfluktuationen auf allen Skalen (Fourier-Zerlegung in ebene Wellen verschiedener Wellenlängen)



Der erste Peak

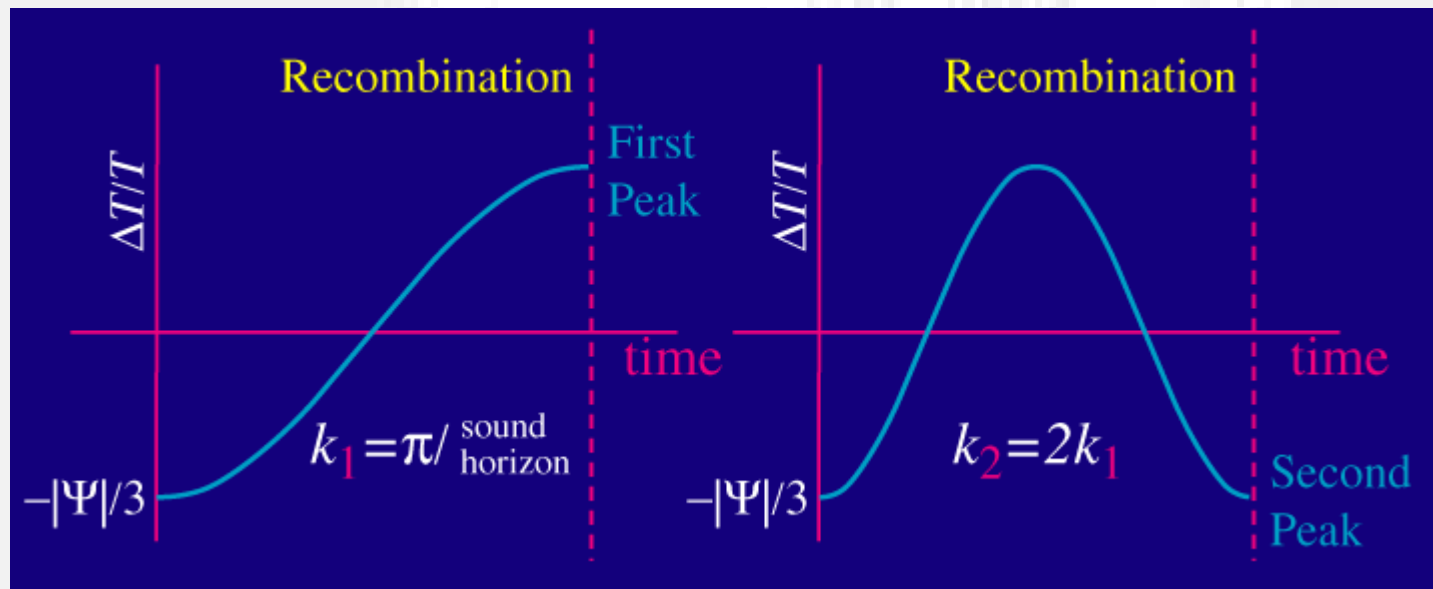
FIRST PEAK

Gravity and sonic motion work together



Rekombination

- Akustische Wellen hören auf zu oszillieren im Moment der Rekombination: wenn die Baryonen die Photonen freigeben
- Die Moden, die Extremwerte ihrer Oszillation bei der Rekombination erreichen, tragen verstärkte Temperaturfluktuationen
- Die Welle, die die maximale negative Versetzung einer Region just im Moment der Rekombination erzeugt, ist die fundamentale Welle des frühen Universums
- Die Obertöne haben Frequenzen mit ganzzahligen Vielfachen und regen kleinere Regionen an die maximale Versetzung zu erreichen

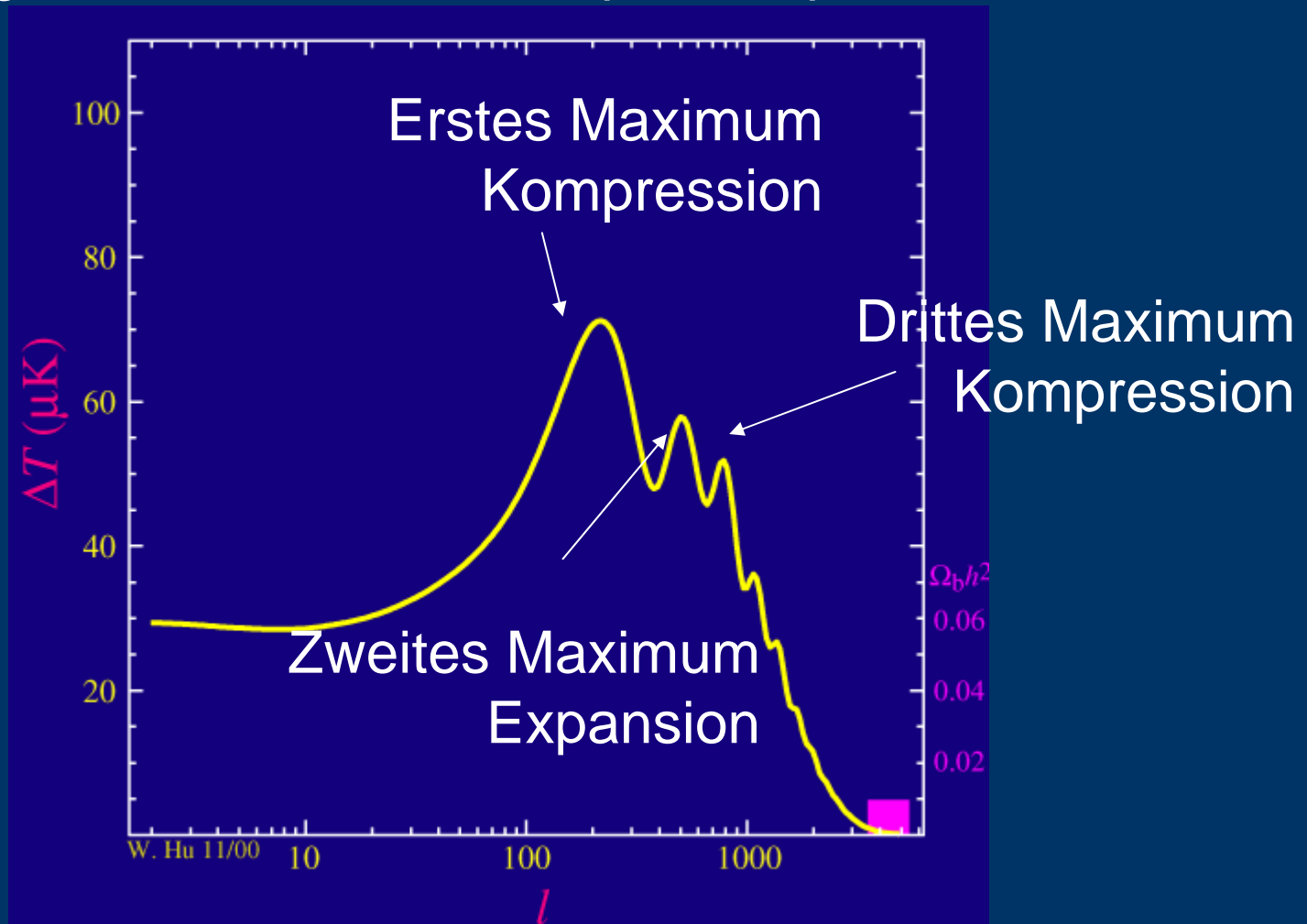


Peaks im CMB power spectrum

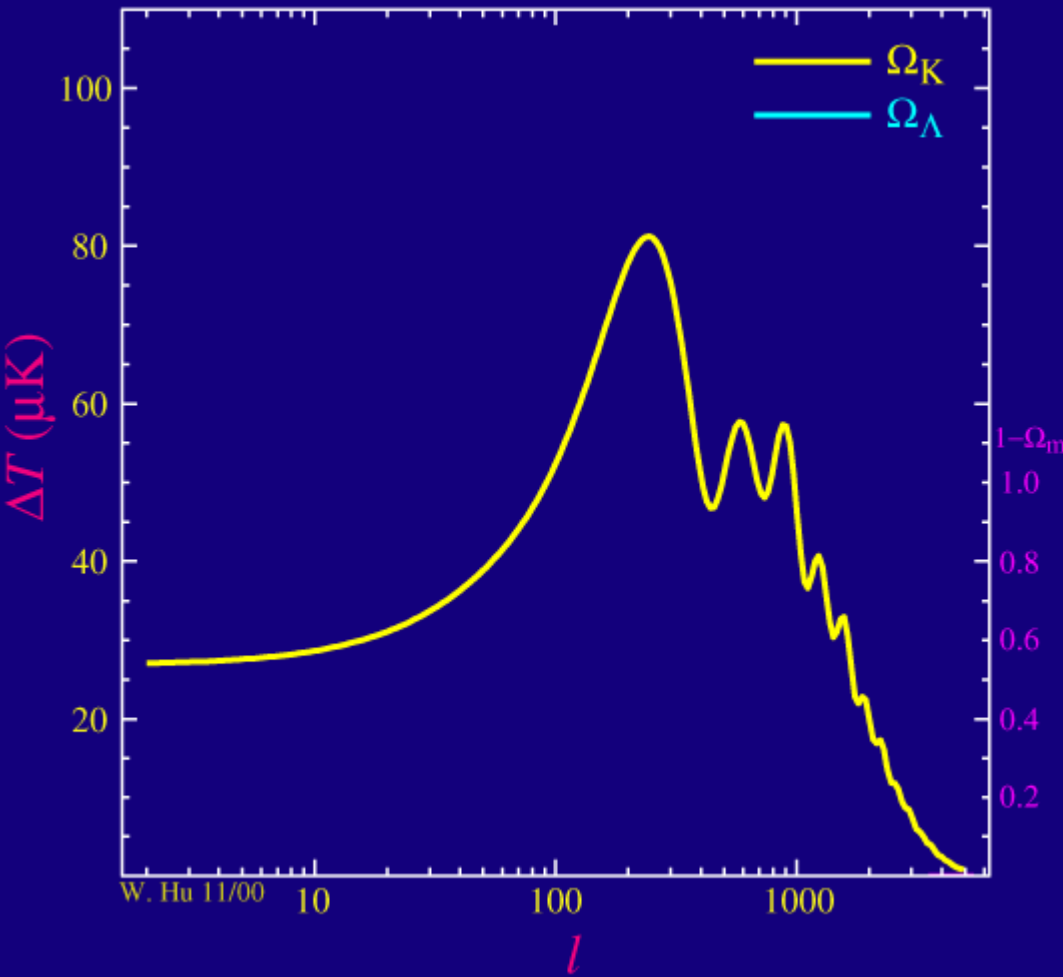
- 1. Peak: der Modus, der einmal komprimiert wurde vor der Rekombination
- 2. Peak: der Modus, der einmal komprimiert wurde und dann expandierte
- 3. Peak:komprimiert, expandiert, komprimiert,
- etc.
- wir sehen diese räumlichen Variationen als Winkel-Fluktuationen am Himmel
- Größe der Temperaturvariationen als Funktion der Größe der heißen und kalten Flecken
- Regionen mit den größten Variationen: ~ 1 Grad, zur Zeit der Rekombination: 1 Mio Lichtjahre
- Hätte die Inflation nicht alle Schallwellen gleichzeitig getriggert, wäre das power spectrum nicht so *harmonisch* geordnet

Die Maxima im Spektrum

- Die Moden in den Extremwerten ihrer Oszillationen erzeugen die Peaks im CMB power spectrum

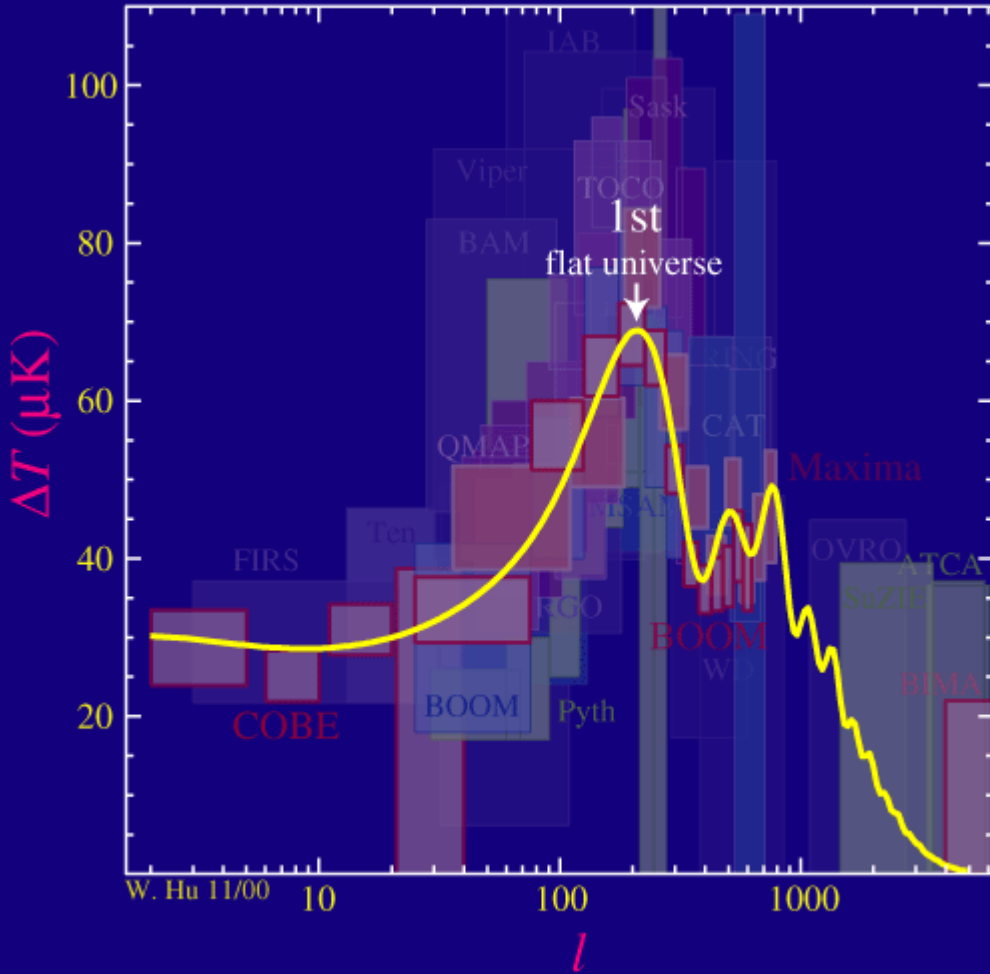


Der erste Peak



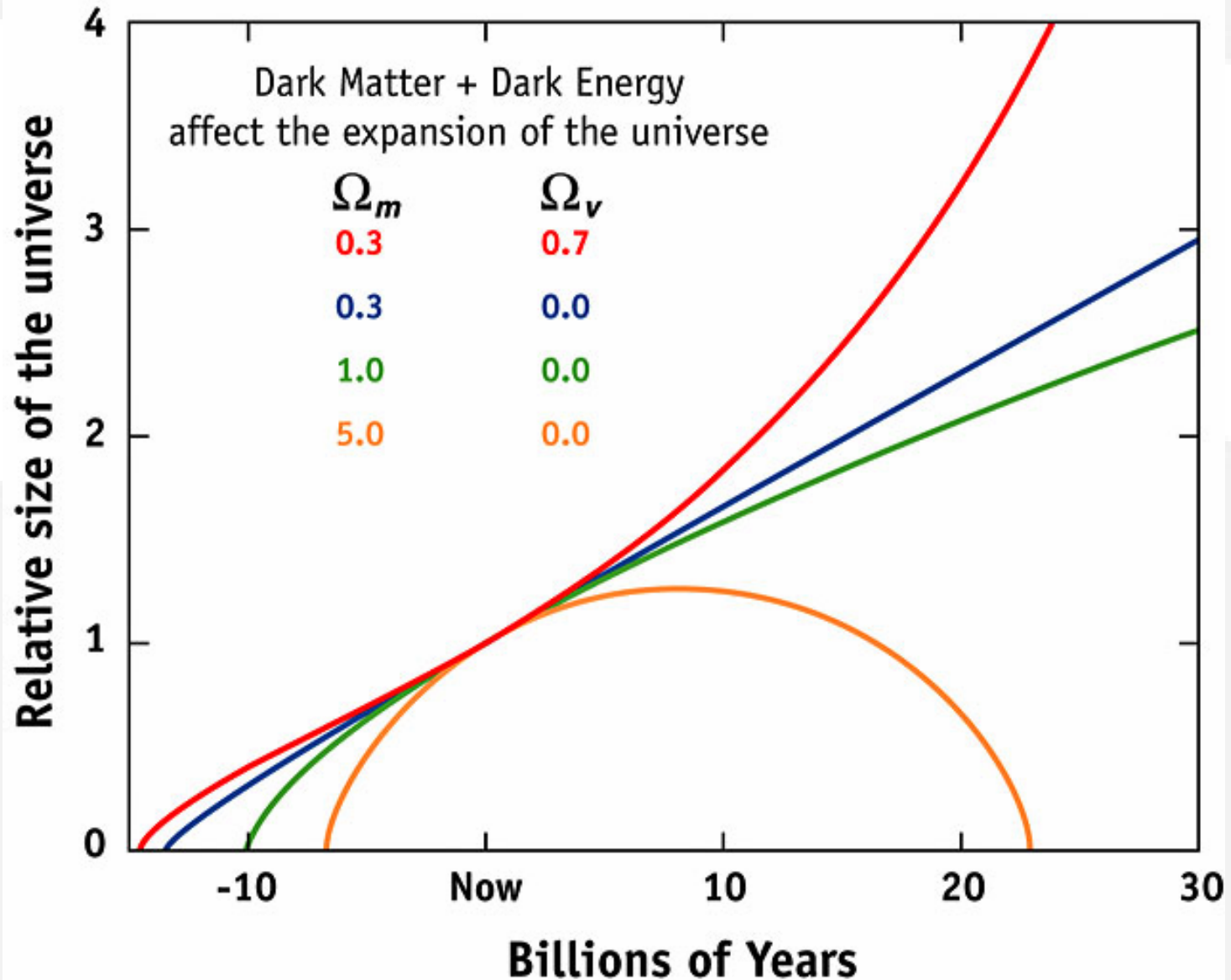
- die Position des ersten Peaks hängt empfindlich von der räumlichen Krümmung des Universums ab
- nimmt die Krümmung ab (gelbe Kurve, negativ), wandert das erste Maximum zu geringeren Winkeln
- Form fixiert durch Dichte an Materie und Baryonen
- Dunkle Energie spielt geringe Rolle bei Position der Peaks

1. Peak

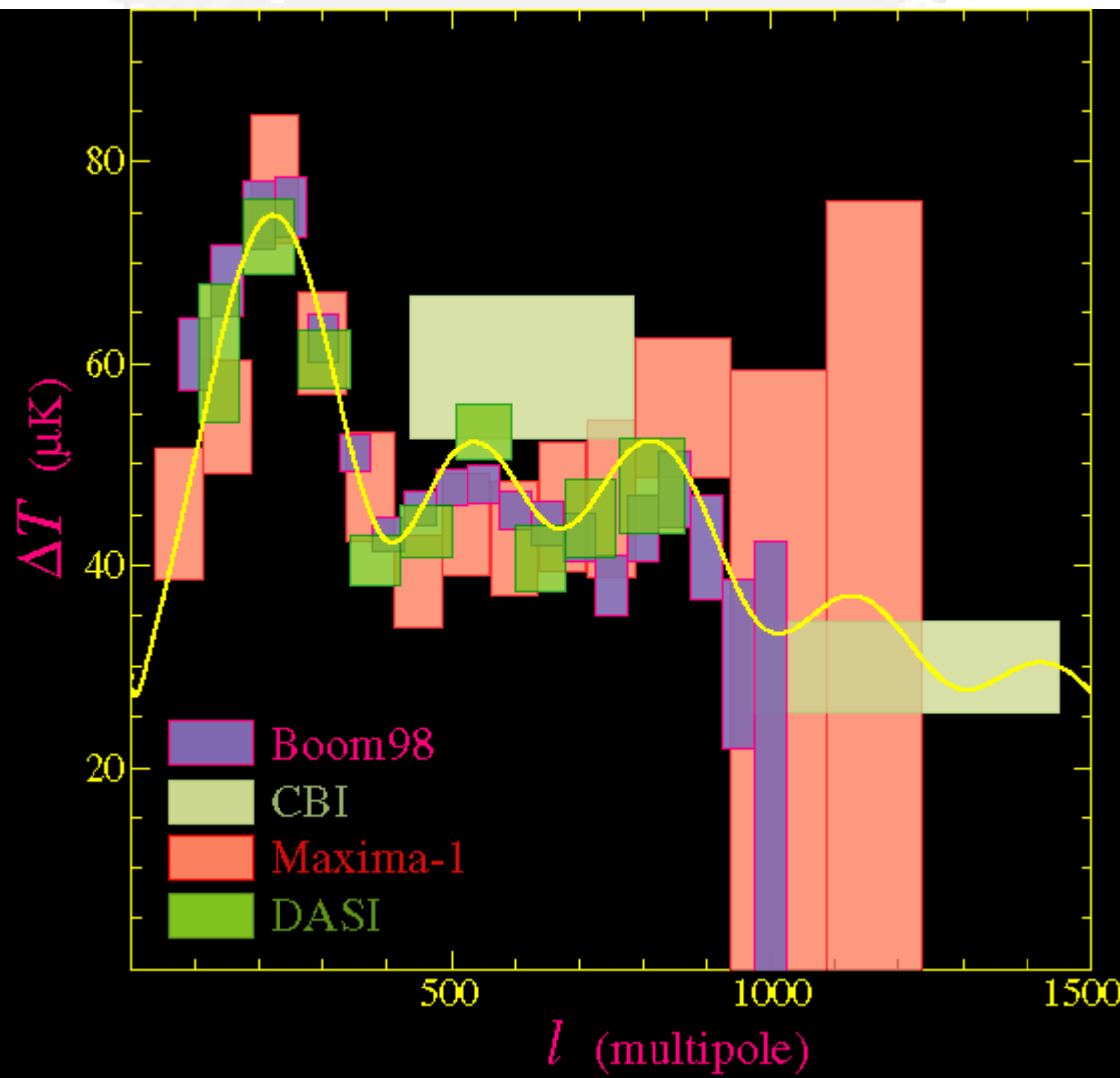


- das Universum ist vermutlich flach
- Mittlere Energiedichte nahe Kritischer Dichte (WMAP): 10^{-29} Gramm/cm³

Kritische Dichte und Expansion des Universums

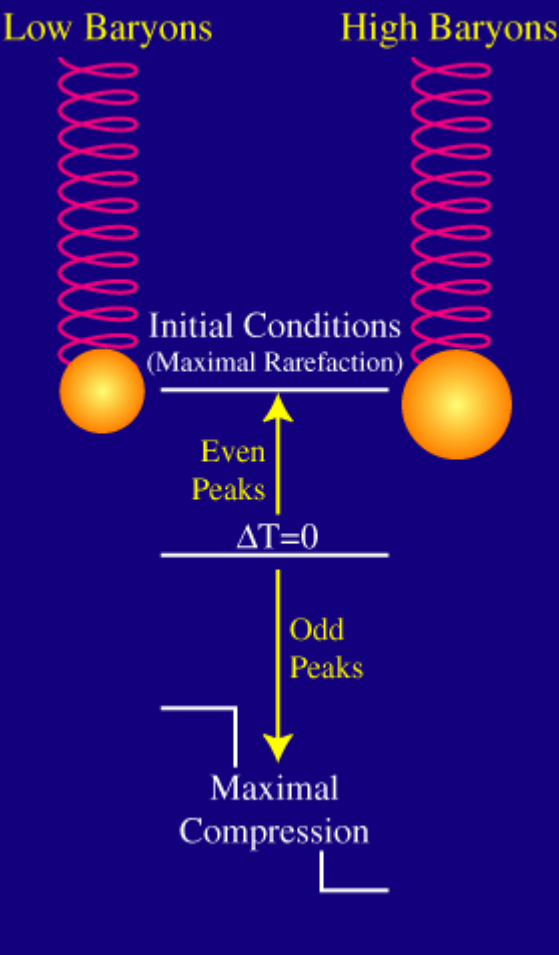


2. Peak



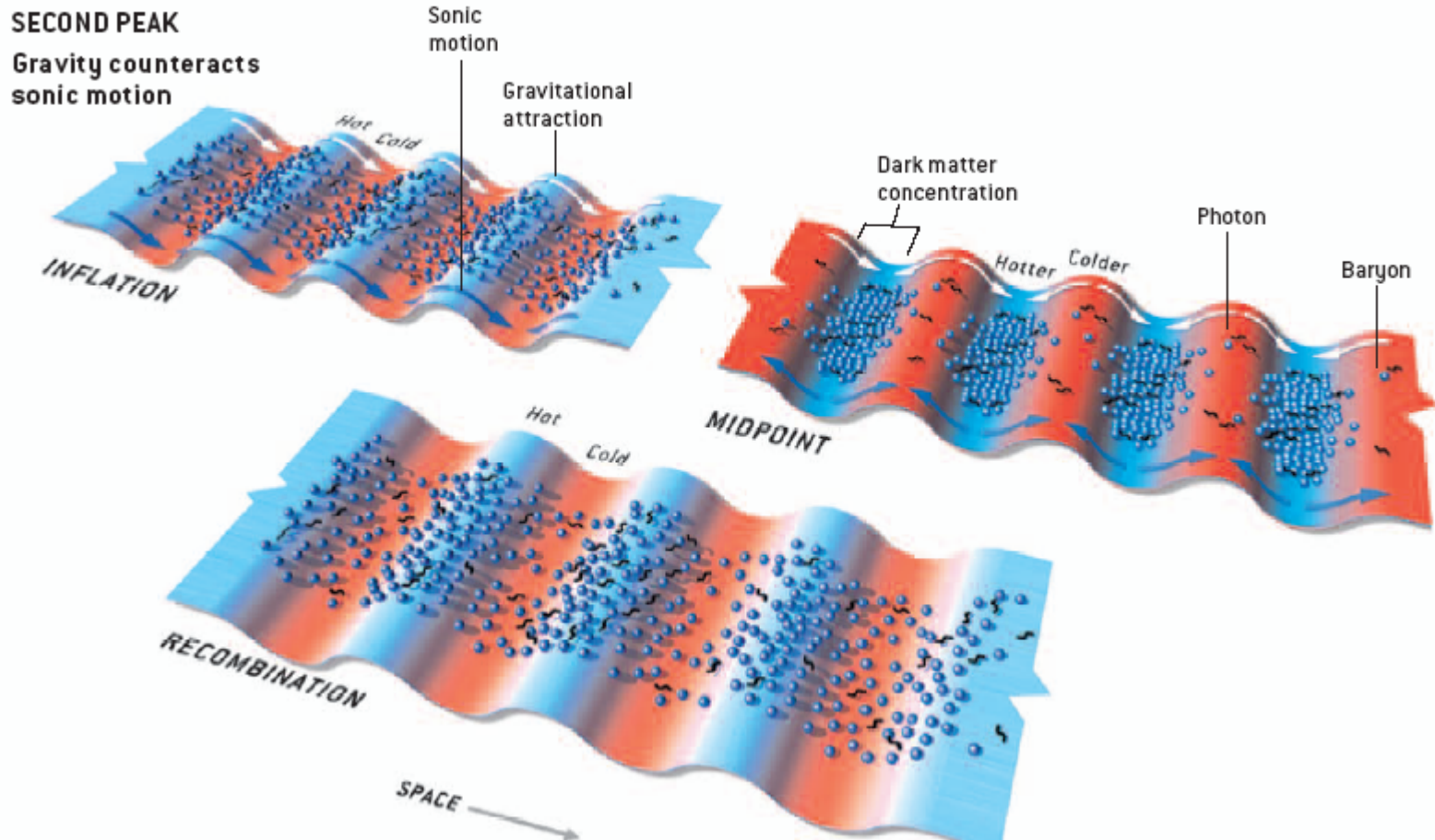
- Platz des 2. Peak auf Position einer Harmonischen des ersten Peaks ist unvermeidlich
- sei Mai 2001: erste Entdeckungen des 2. Peaks durch DASI, Boomerang und Maxima-Experimente

Baryonen



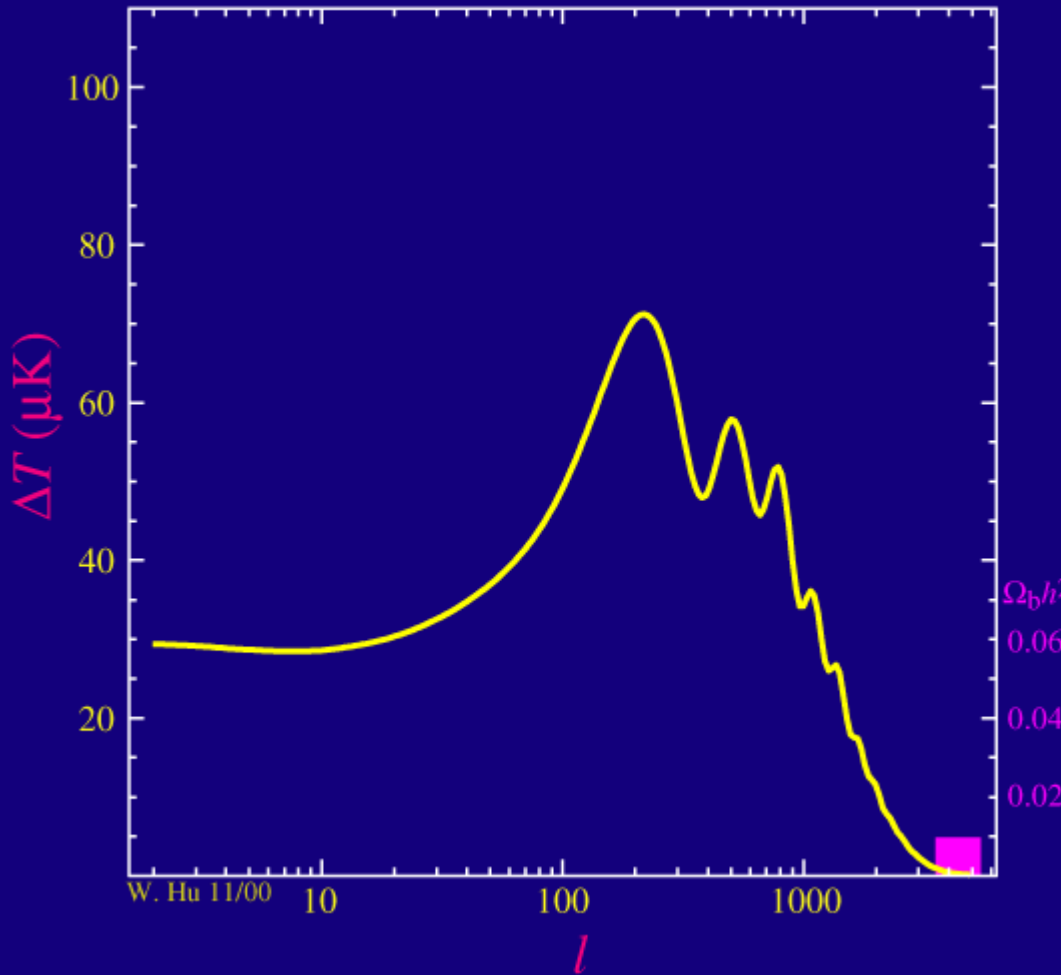
- Baryonen fügen dem oszillierenden System Masse zu
- die *ungeraden* akustischen Peaks hängen damit zusammen, wie tief das Plasma in den Gravitationsgraben „fällt“, sie werden verstärkt durch einen Anstieg der Baryonen im Universum
- die geraden Peaks: wie stark das Plasma expandiert
- Je mehr Baryonen, um so stärker ist der zweite Peak *relativ* unterdrückt

Der 2. Peak



- Sowohl normale Materie als auch Dunkle Materie fügen dem primordialen Gas Masse zu, aber nur die normale Materie unterliegt der Kompression und Expansion
- Kalte Dunkle Materie wechselwirkt nicht mit normaler Materie oder Licht

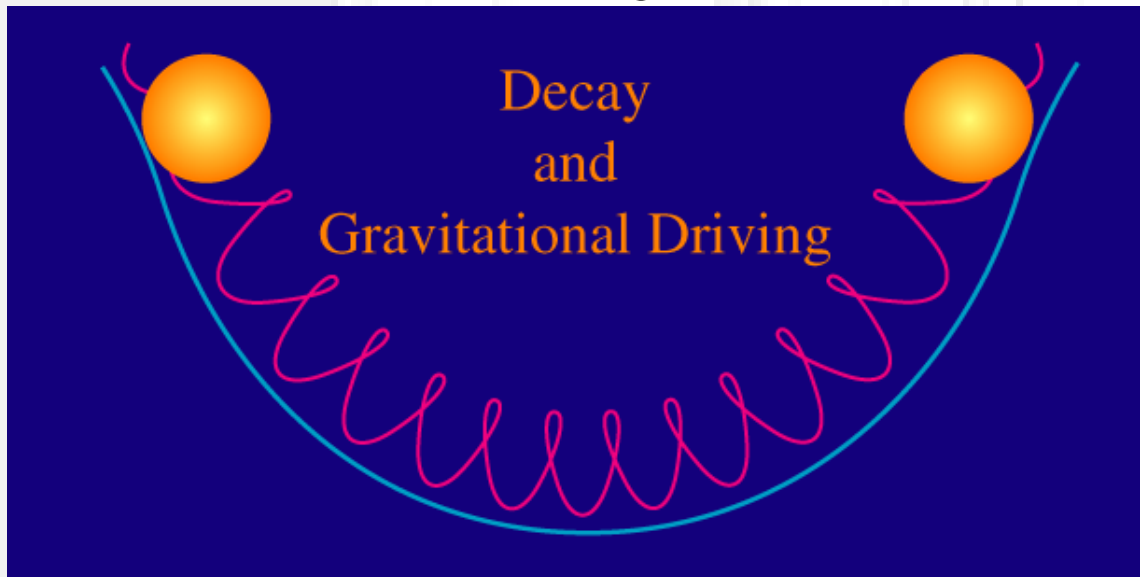
Baryonen im Power Spectrum



- nimmt die Baryonendichte im Universum zu, so werden die ungeraden akustischen Peaks in der Amplitude verstärkt
- außerdem: bremst die Oszillationen, schiebt den Peak zu höheren l -Werten
- dämpft die akustischen Wellen
- Baryonendichte spielt wichtige Rolle im Spektrum
- fehlende Baryonen im Universum

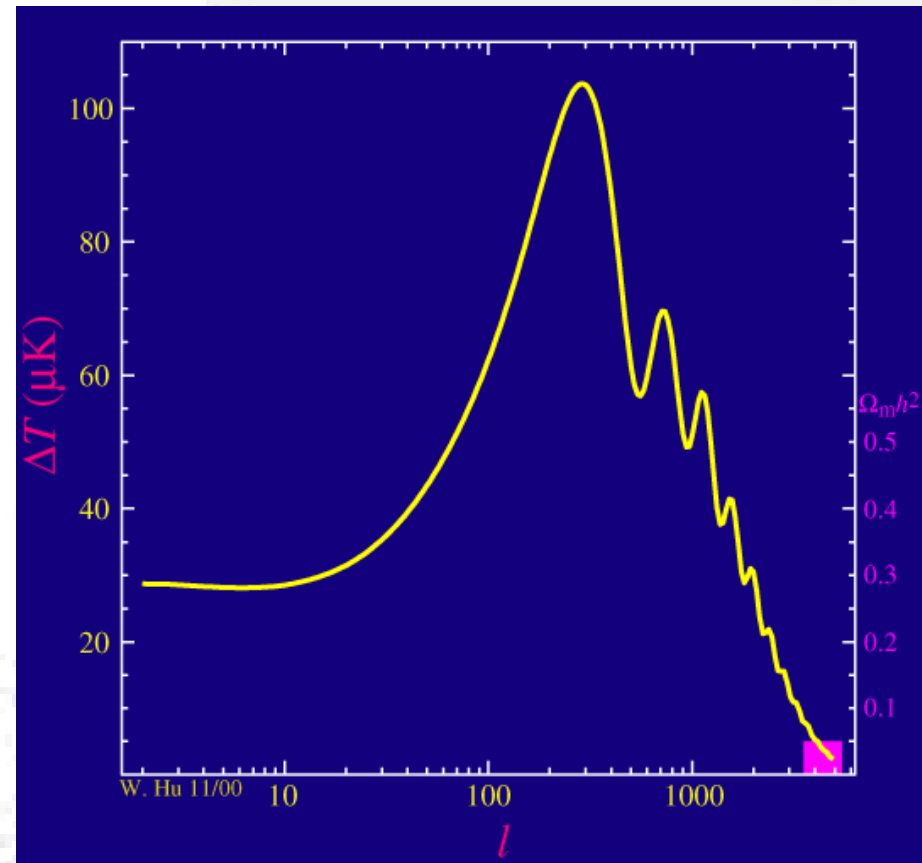
Höhere Peaks

- Energiedichte Verhältnis der dunklen Materie zu Strahlung im Universum
- dominiert die Energiedichte der Strahlung über die Materiedichte, so oszilliert das Photonen-Baryonen-gemisch nicht mehr in einem festen Gravitationspotential, das Potential verschwindet
- die Dichtefluktuationen stabilisieren und lassen das Gravitationspotential zerfallen mit der Expansion des Universums
- dies passiert nicht, wenn die Dichte durch Dunkle Materie dominiert wird
- Universum war nur in den frühesten Epochen strahlungsdominiert. Moden geringer Wellenlänge starten zuerst -> höhere akustische Peaks sind betroffen
- Wo Übergang im Spektrum passiert, gibt Auskunft über das Energiedichte Verhältnis von Materie zu Strahlung im Universum



Dichte der Dunklen Materie

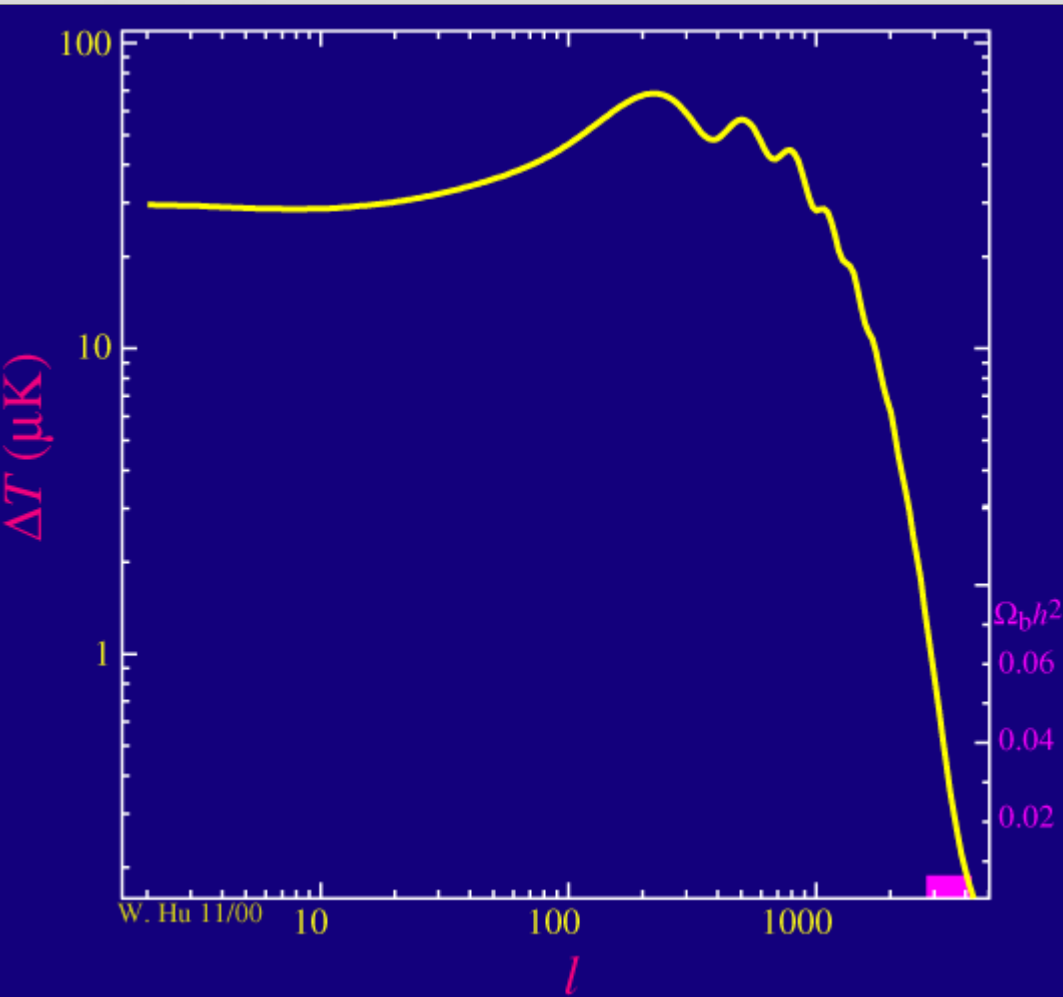
- Anstieg der Dichte der Dunklen Materie senkt die Amplitude der Peaks
- Geringere Dunkle Materie eliminiert den Baryonen-Effekt: hoher dritter Peak deutet auf Dunkle Materie



Kleinste Skalen im Spektrum

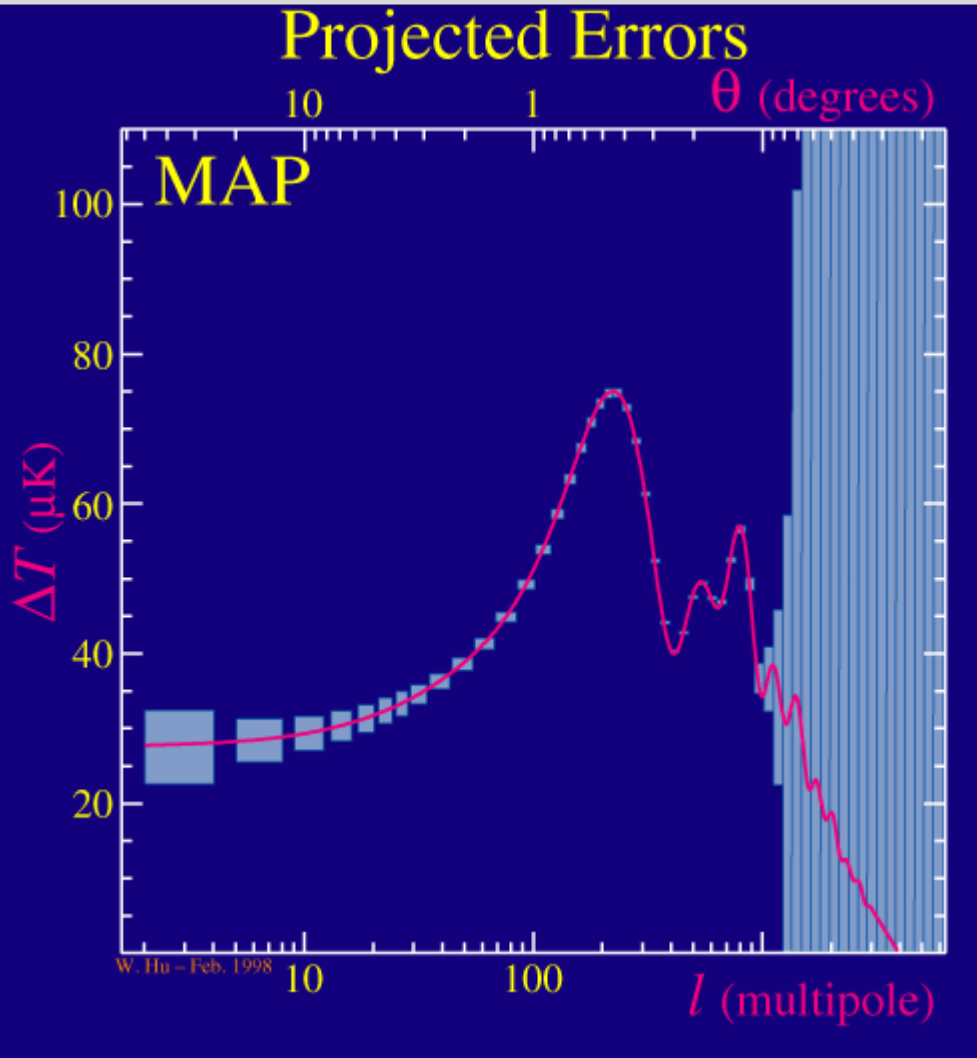
- Peaks sollten gleiche Amplitude haben
- Amplitude der Peaks fällt rasch ab zu kleinen Winkelgrößen
- Grund: physikalische Größe der Fluktuationen so klein, daß sie vergleichbar der Distanz sind, die die Photonen während der Rekombination zurücklegen
- bewegen sich die Photonen über eine Wellenlänge der Störung so mischen sich heiße und kalte Photonen-> Exponentielle Dämpfung auf Skalen kleiner als die Distanz, die die Photonen in dieser Zeit der Rekombination zurücklegen
- (In der Luft ist diese Distanz vernachlässigbar: 10^{-5} cm), im primordialen Plasma legt ein Teilchen typischerweise einige 10 000 Lichtjahre zurück, bevor es auf ein weiteres trifft (heute wären dies 10 Mio Lichtjahre)
- CMB Photonen haben ~45 Milliarden Lichtjahre zu uns zurückgelegt (eigentlich nur 14 Milliarden Jahre unterwegs aber Expansion ...)

Exponentielle Dämpfung



- mit höherer Baryonendichte ist das Photonen-Baryonen-Gemisch stärker gekoppelt bei der Rekombination und der Dämpfungsteil wird zu kleineren Skalen verschoben
- höhere Materiedichte erhöht das relative Alter des Universums bei der Rekombination und vergrößert die Skalen bei denen die Dämpfung auftritt

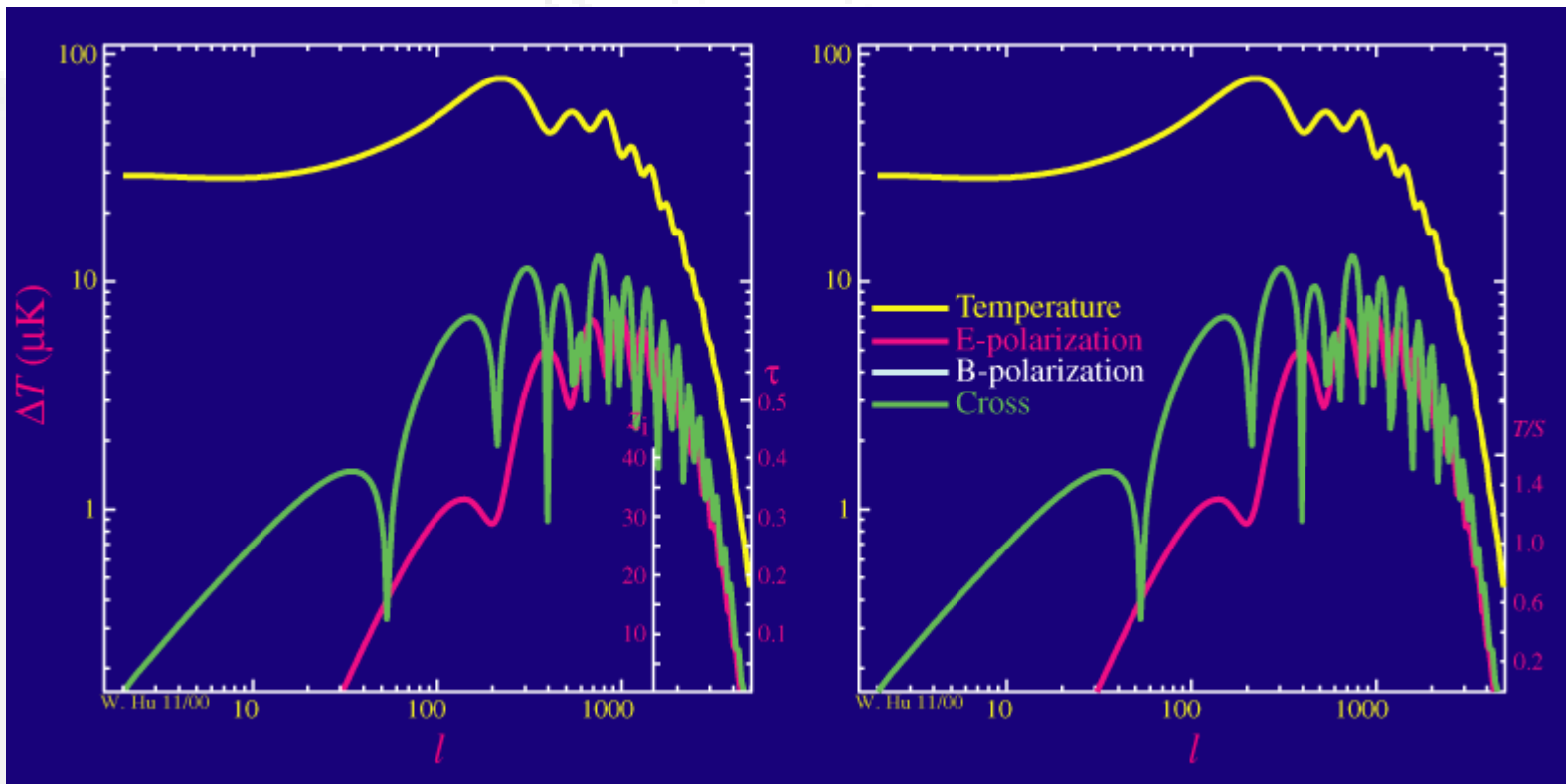
Fehlerberechnung



- statistische Limitierungen der Messungen: instrumentelles Rauschen und Winkelauflösung
- Planck wird höhere Auflösung und geringeres Rauschen aufweisen
- WMAP und Planck gleiche Fehler bei großen Winkelskalen

Parameter-Entartung

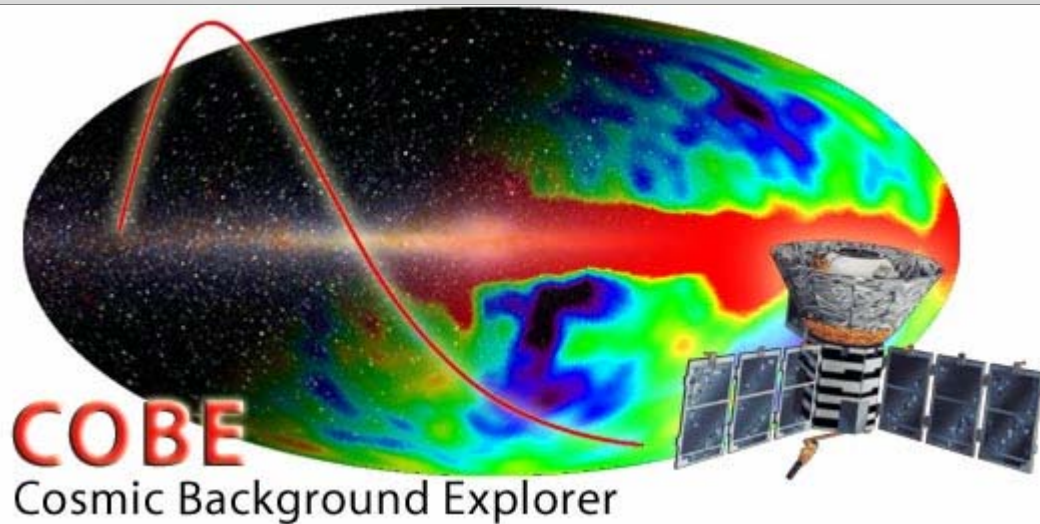
- Wie wirken sich die Reionisierung des Universums durch die ersten Sterne und Gravitationswellen (erzeugt während Inflation) auf das Spektrum aus ?
- Links: Reionisierung, Rechts: Gravitationswellen
- Gravitationswellen so geringen Effekt, können ignoriert werden?
- Reionisierung so spät, kann ignoriert werden?



Polarisation

- Polarisation wird nur durch Streuung erzeugt, die letzte Streuoberfläche der Photonen wird abgebildet, das direkte Bild der Epoche der Rekombination und Reionisierung durch die ersten Sterne (kann nur durch Polarisation der CMB untersucht werden)
- Auf kleinen Skalen (Dämpfung), Photonen bewegen sich mit geringer Anzahl an Streuungen, sie behalten so die Richtungsinformation
- Polarisation enthält mehr Informationen als das Temperaturfeld
- 1-10% der Amplitude der Temperatur Anisotropien
- erhöhen die Präzision der physikalischen Aussagen
- Polarisation kann Gravitationswellen (vorausgesagt in Inflations-Modellen) isolieren
- Daten von DASI (Degree Angular Sclae Interferometer, Südpol Station Antarktis), POLAR, etc.

COBE



- November 18, 1989 Start, 3 Instrumente; Winkelauflösung 7 Grad
 - Diffuse Infrared Background Experiment (DIRBE)
 - -> CIB nachgewiesen 140 and 240 microns, und im kurzwelligen Ende des FIRAS Spektrums, enthält die Gesamtstrahlung der Sterne und Galaxien zur Zeit als sie entstanden sind
 - Differential Microwave Radiometer (DMR)
 - -> intrinsische „Anisotropie“ auf einem Niveau von 1 in 100,000.
 - Far Infrared Absolute Spectrophotometer (FIRAS)
 - -> CMB Spektrum perfekte Schwarzkörper-Strahlung mit einer Temperatur von 2.725 ± 0.002 K.

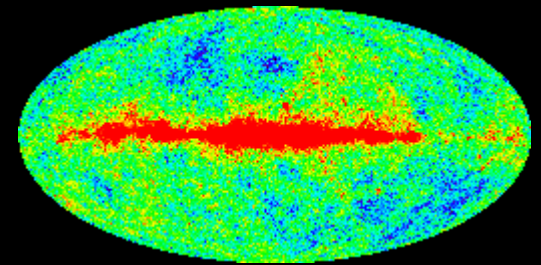
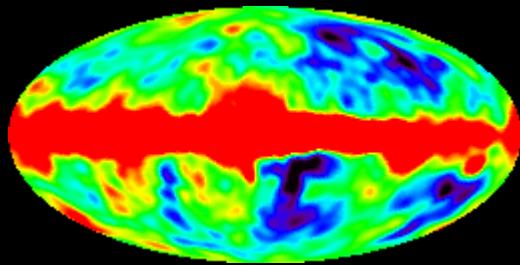
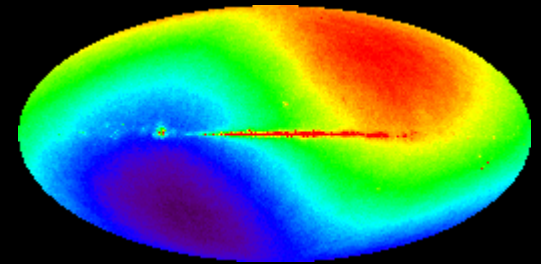
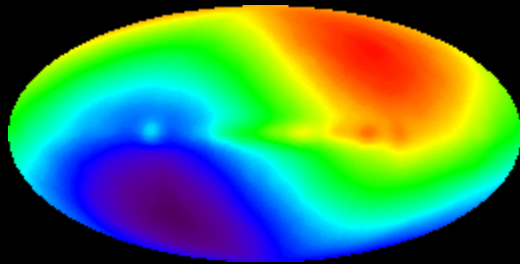
COBE / WMAP

COBE

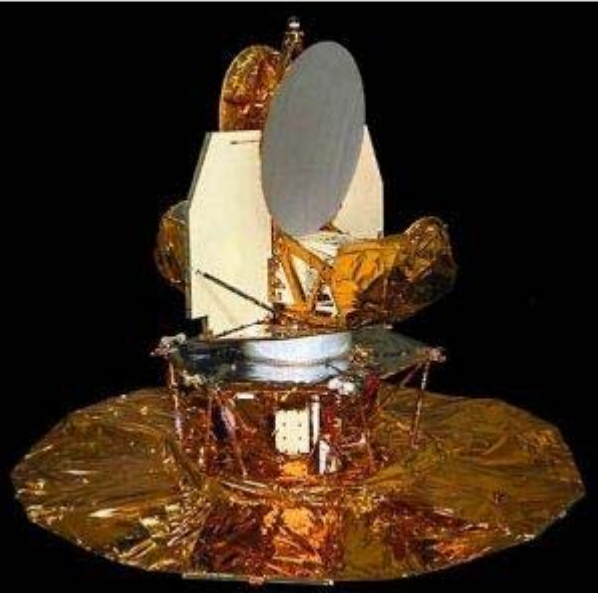


- 0 -4 K
- 2.721-2.729 K

WMAP



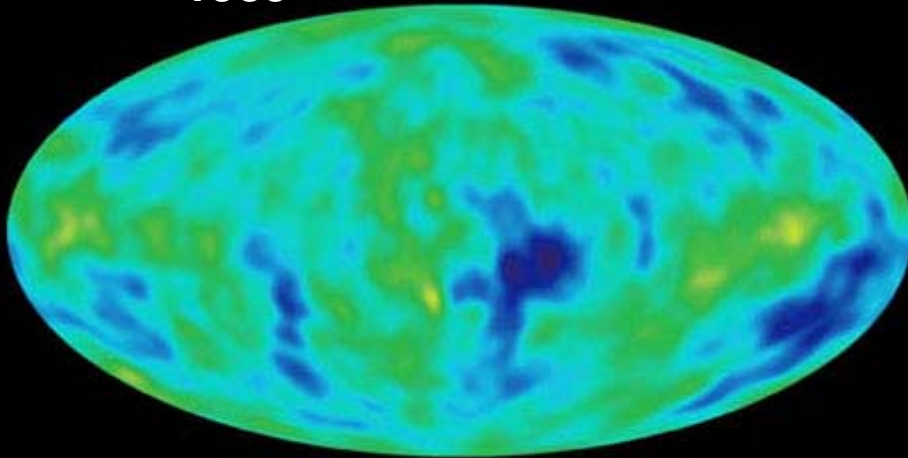
WMAP <http://map.gsfc.nasa.gov/>



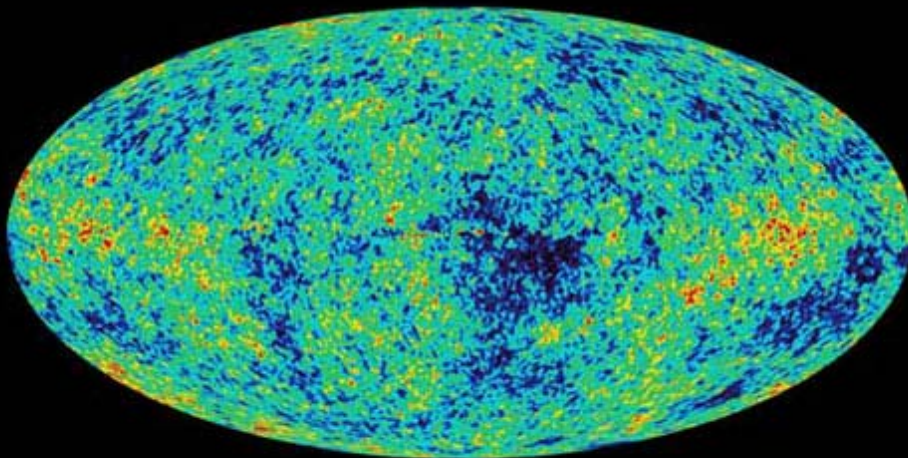
- WMAP (= "Wilkinson Microwave Anisotropy Probe"),
- Start: 30. Juni 2001
- Auflösung 0.3 Bogengrad
- Temperaturunterschiede von 20 Millionstel Grad Kelvin
- Gesamte Beobachtungszeit: 2 Jahre
- Erste Ergebnisse zur Halbzeit

Mikrowellenhintergrund

1989



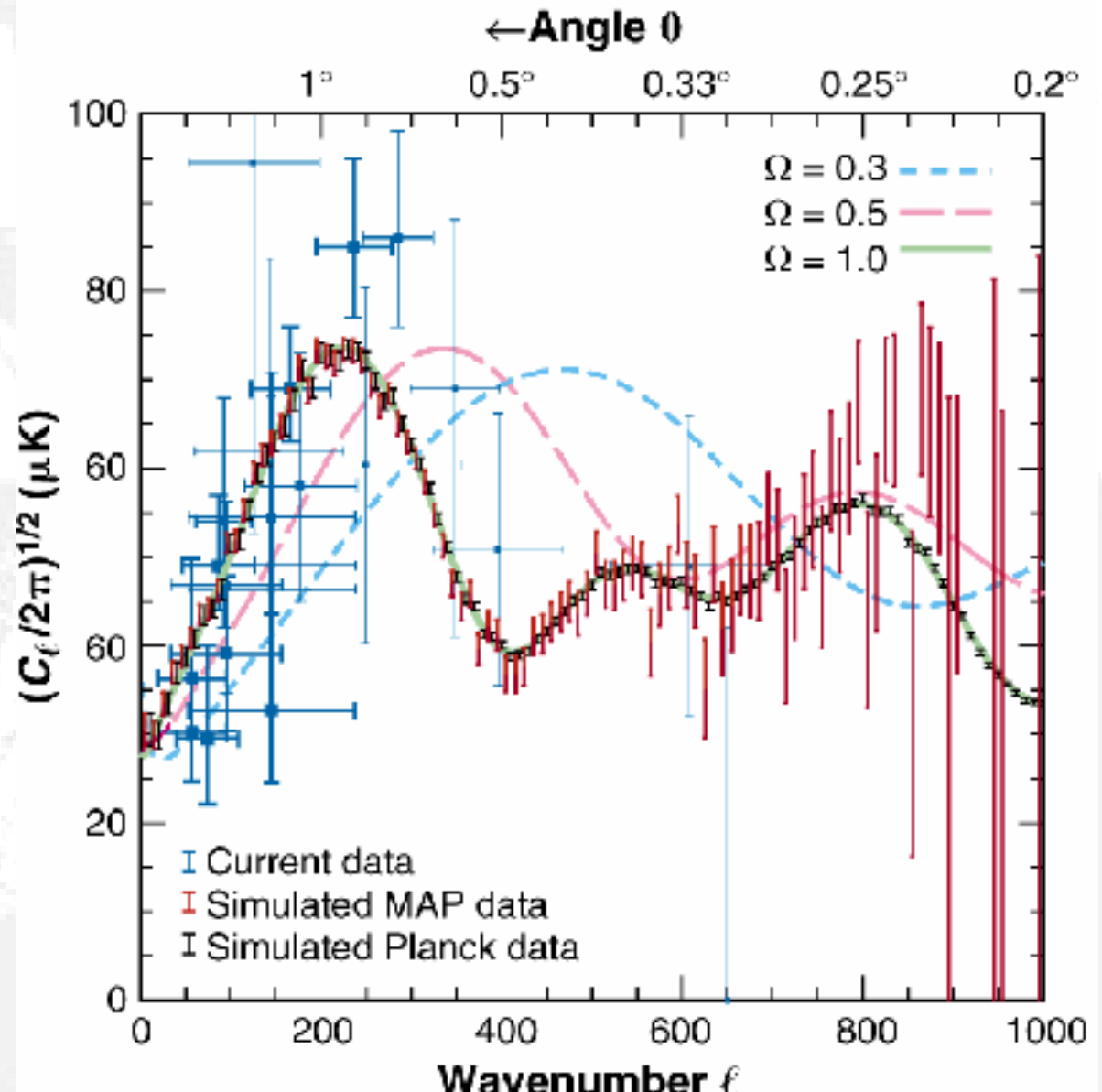
COBE



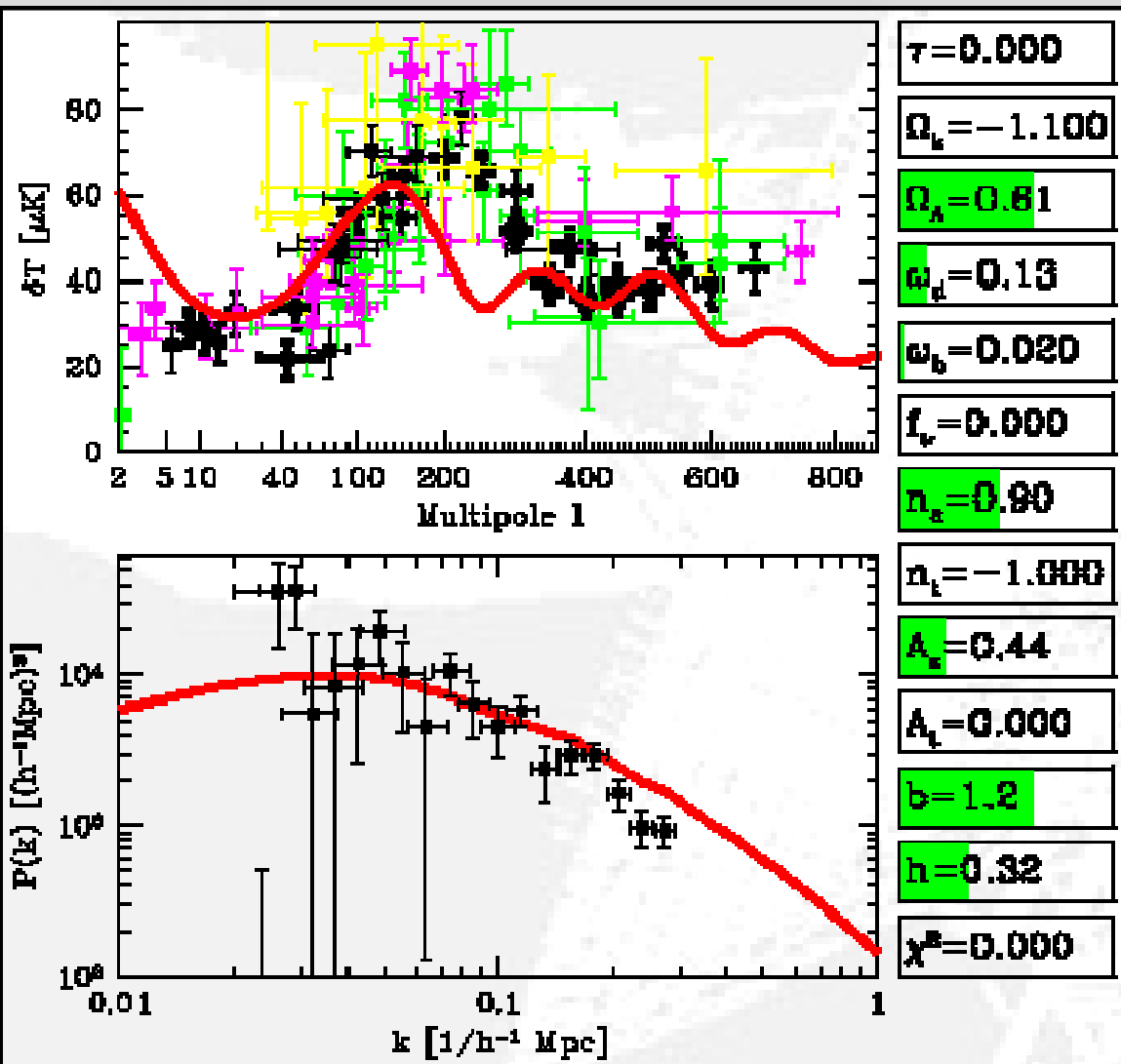
MAP

- WMAP: Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, Die Temperatur ist anisotrop mit Fluktuationen
- CMB ist Schnappschuss des Universums bei einer Rotverschiebung von 1000
- Fluktuationen sind Vorgänger der großskaligen Fluktuationen von heute

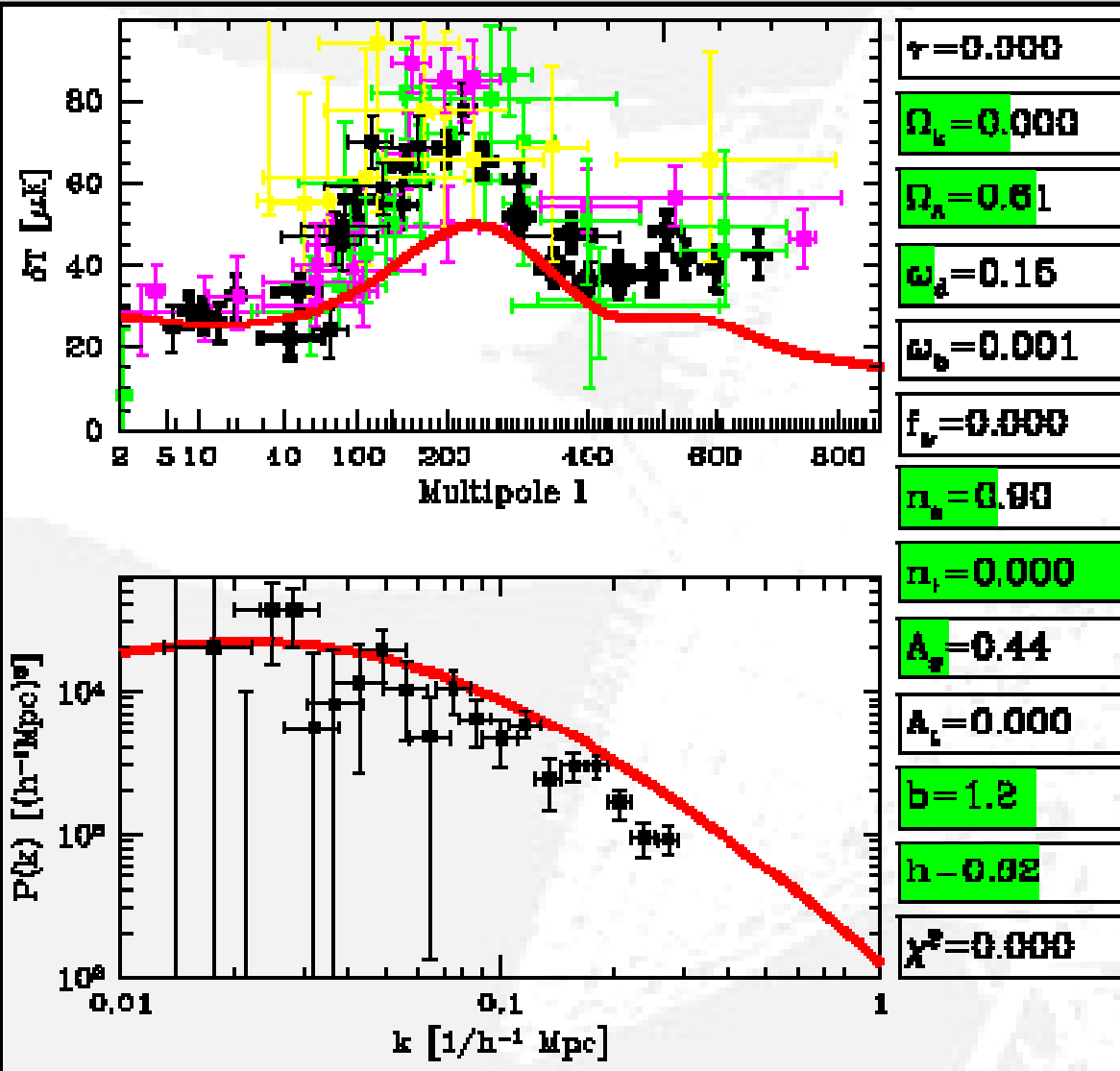
<- Energieflektuationen als „Samen“
für die großskalige Struktur



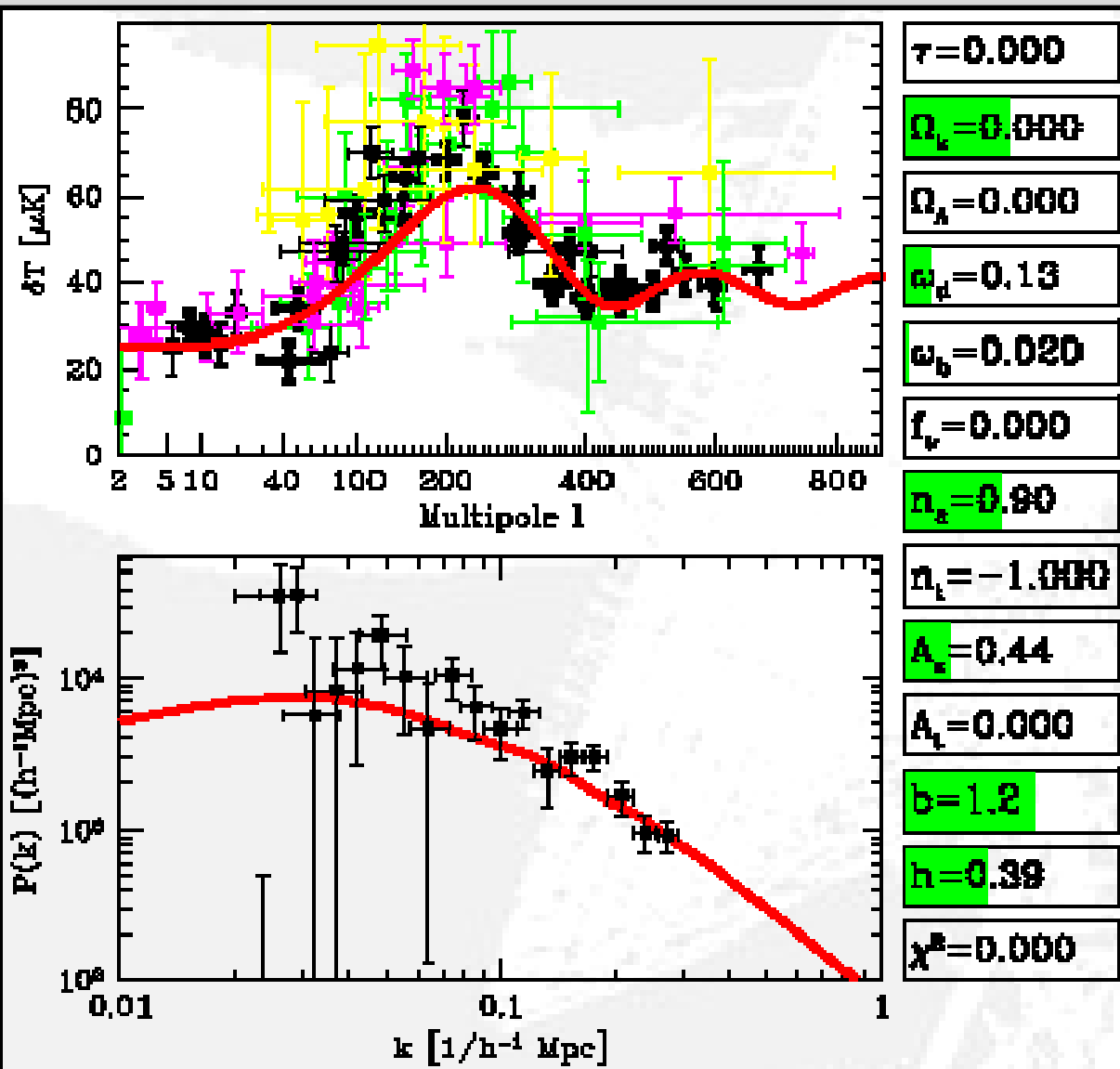
Krümmung



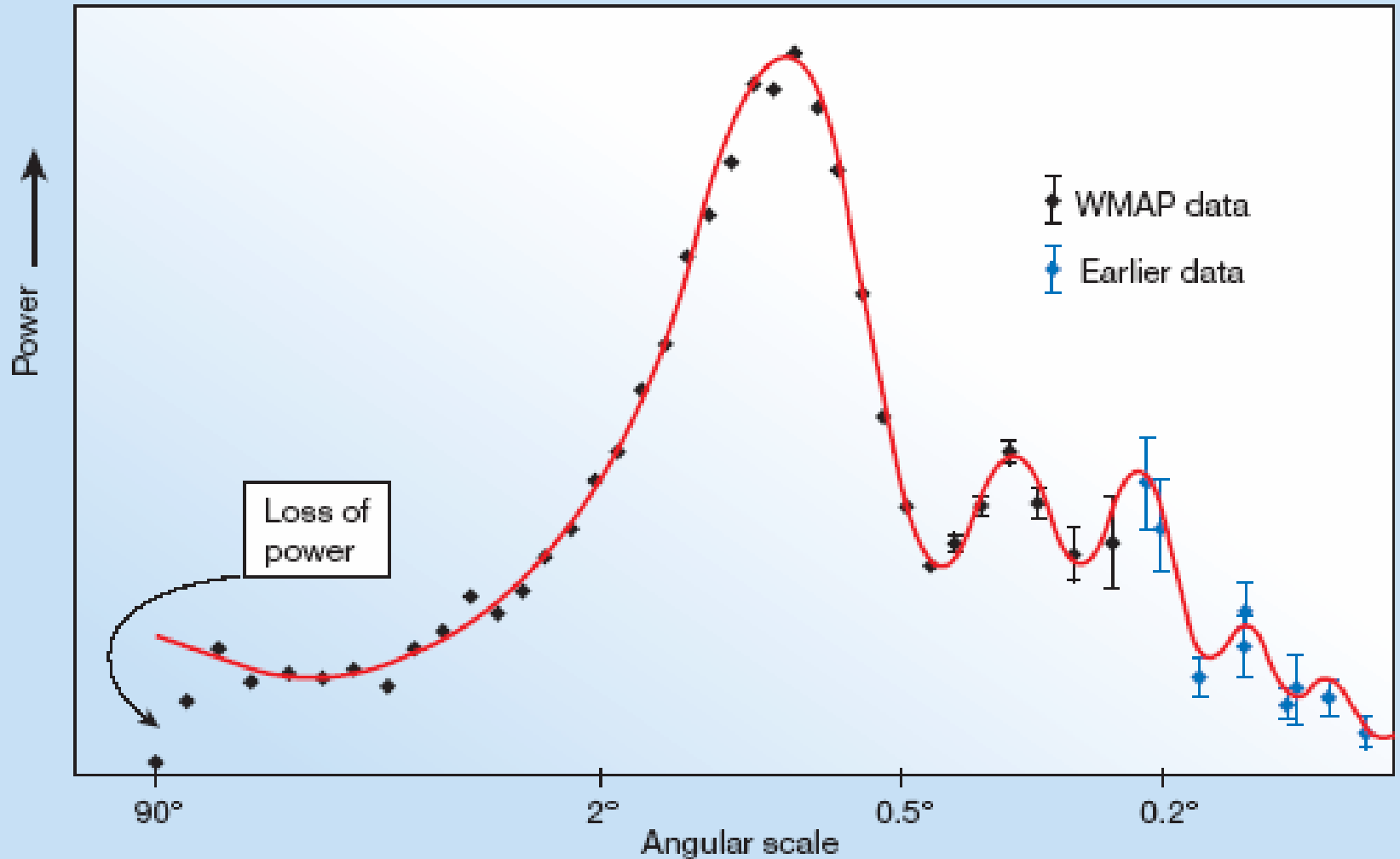
Baryonen



Lambda

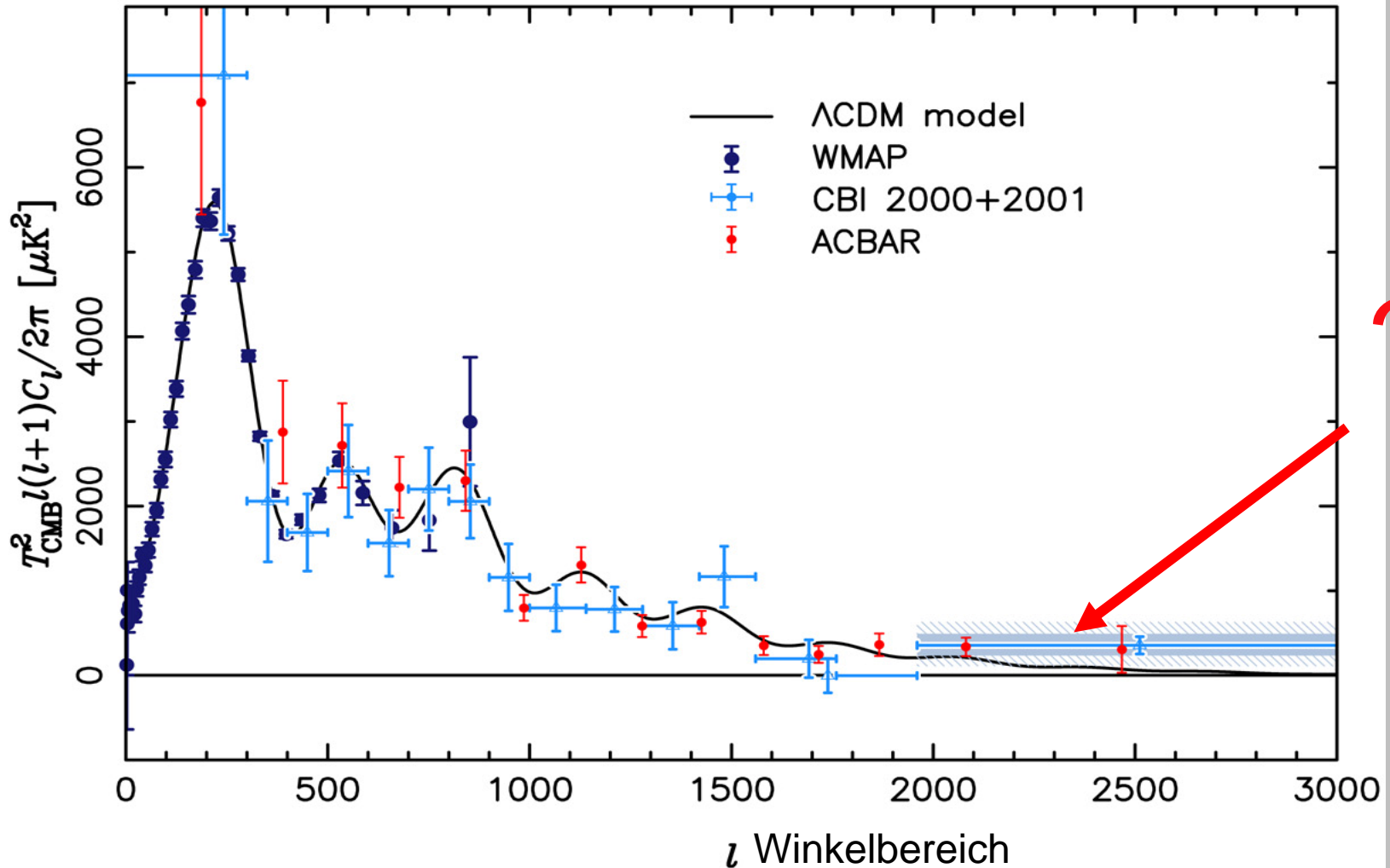


WMAP / power spectrum



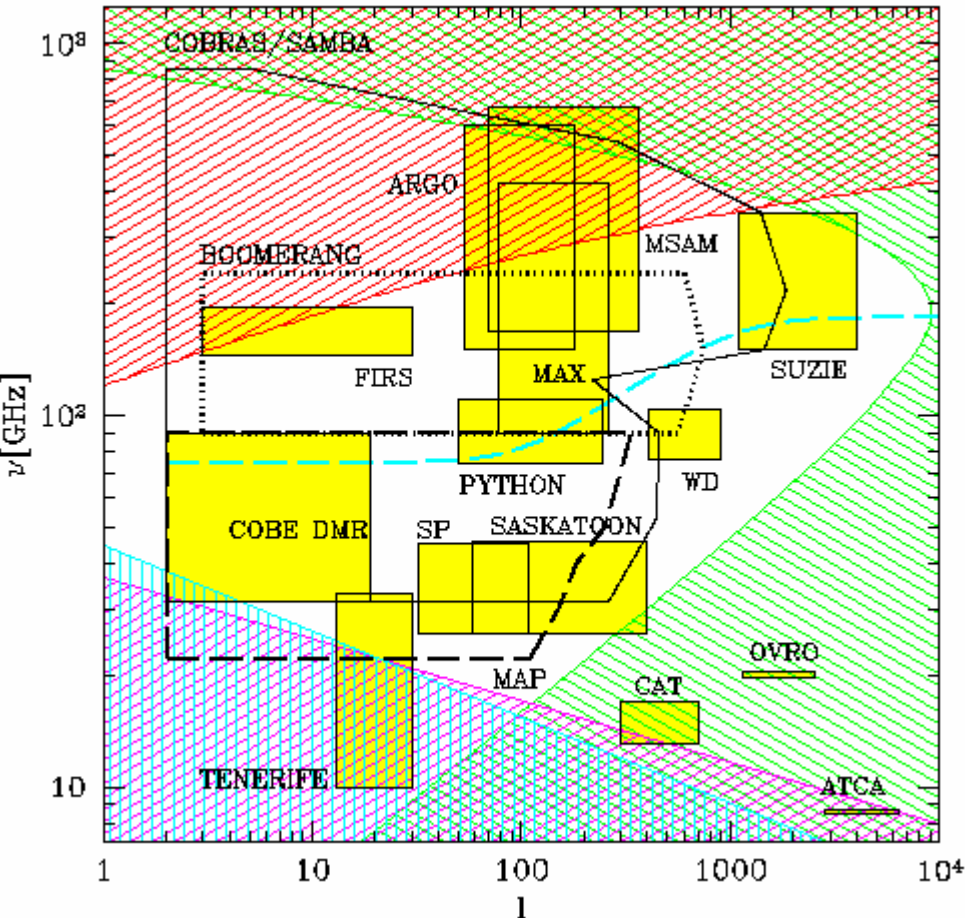
WMAP & CBI

Temperaturabweichung in Mikrokeln zum Quadrat

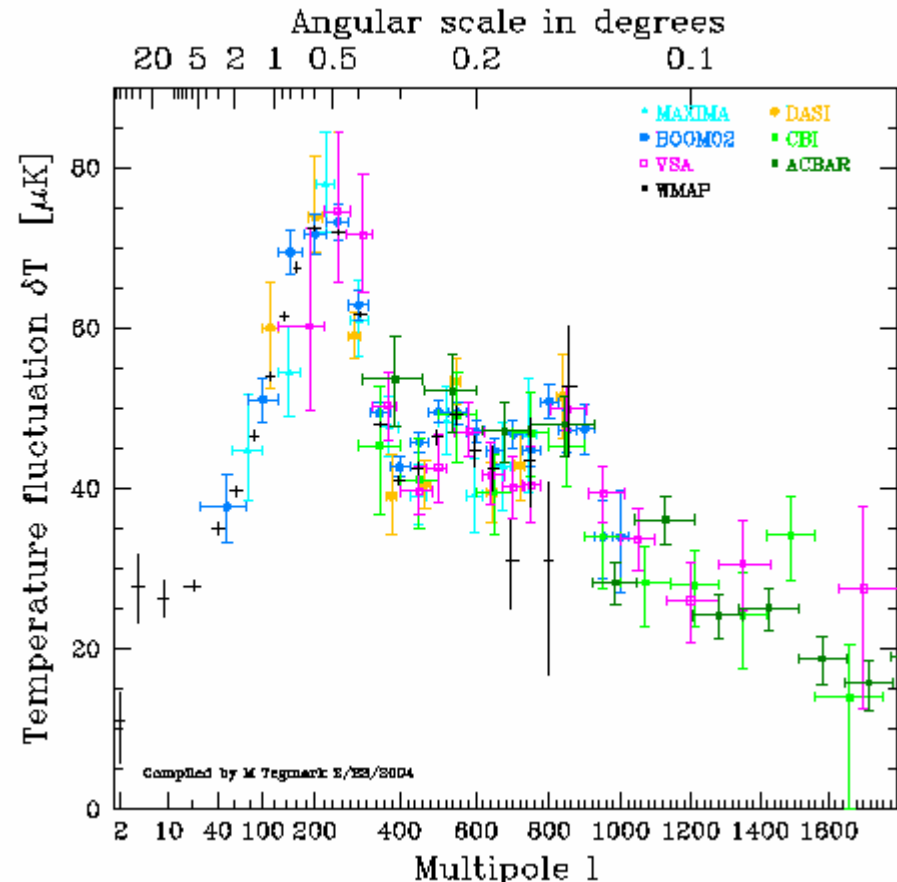


Die Ungleichmäßigkeit der Hintergrundstrahlung zeigt deutliche Maxima, wenn die Schwankungen in Abhängigkeit von ihrer Winkelgröße aufgetragen werden.

Alle Daten (Februar 2004)



Winkel- und Frequenz-Sensitivität
 Vordergrund: Staub (rot),
 Punktquellen (grün), Synchrotron
 (Magenta), Frei-Frei-Strahlung (blau)



Compiled by M Tegmark 2/23/2004

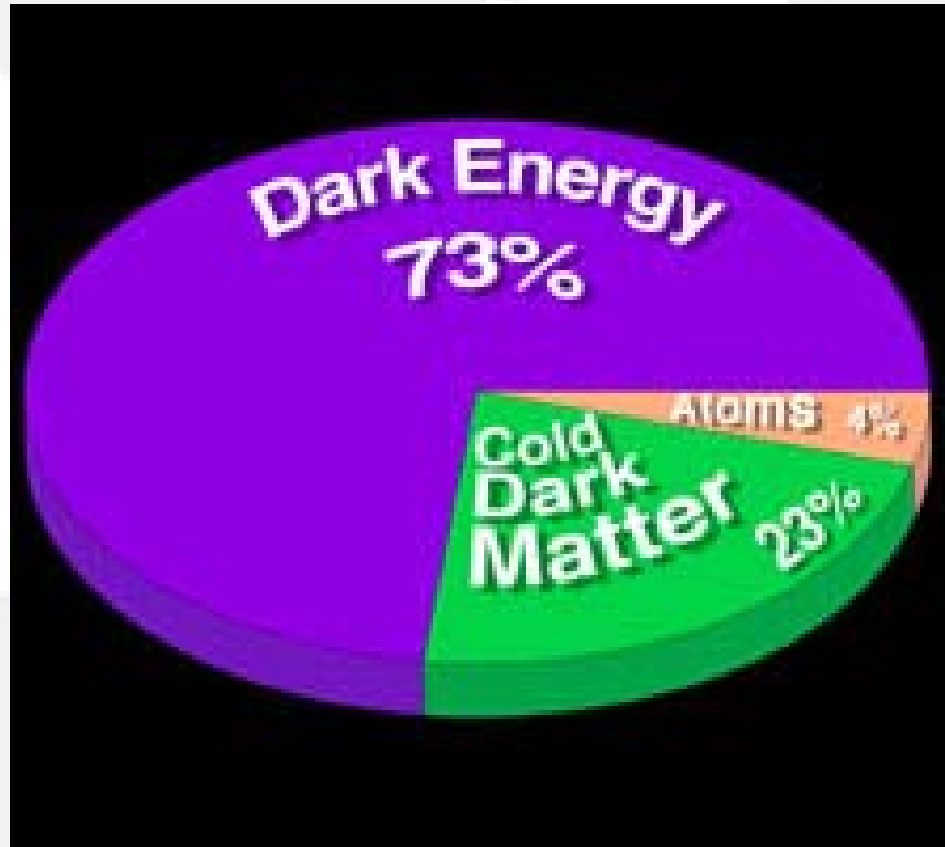
Ergebnisse von WMAP

- Erste Sternengeneration viel früher als bislang erwartet: 200 Mio Jahre nach Urknall
- Alter des Weltalls: 13,7 Milliarden Jahre
- Universum ist flach
- Universum wird weiter expandieren
- Weltall besteht nur zu rund 4% aus Atomen in Form aktiver, „regulärer“ kosmischer Objekte, 23% Dunkle Materie, 73% Dunkle Energie

WMAP / Polarisation

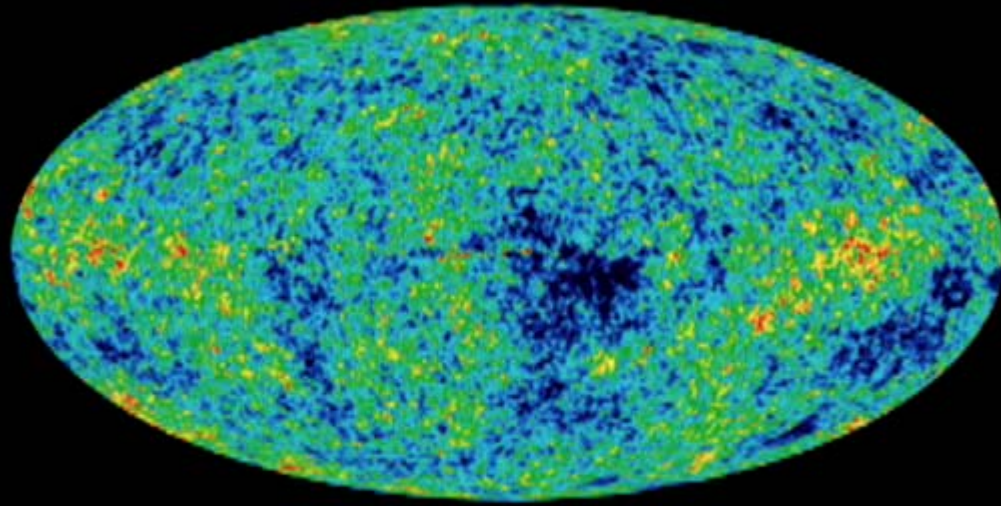
- 17% der CMB Photonen wurden gestreut durch dünnen Nebel aus ionisiertem Gas einige 100 Mio Jahre nach dem Urknall
- Nicht erwartet! Erwartet wurde: Wasserstoff und Helium durch die ersten Sterne ionisiert (Reionisierung), Milliarde Jahre nach dem Urknall, 5% gestreut
- WMAP: viel frühere Reionisierung, Probleme für Sternmodelle; Probleme für Inflation und gleiche Dichtefluktuationen auf allen Skalen; erste Sterne hätten sich früher gebildet haben können, wenn die kleinskaligen Fluktuationen höhere Amplituden gehabt hätten

Dunkle Rätsel im Universum (27.01.)



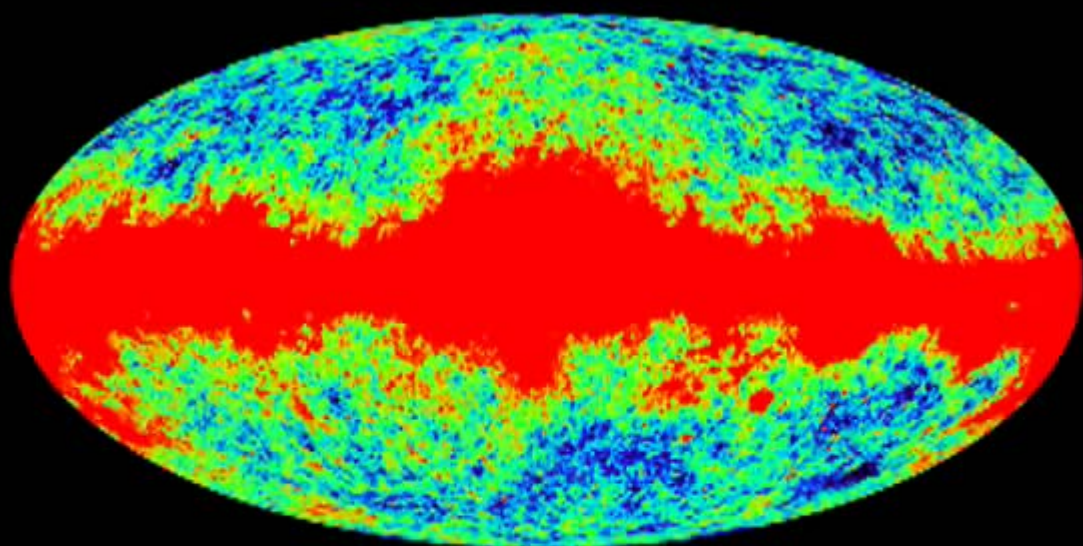
In today's conventional view of cosmology, baryonic (atomic) matter amounts to only 4.4 percent of the total cosmic matter-and-energy budget. The other 95.6 percent comprises dark matter and dark energy — both complete mysteries. Courtesy NASA / WMAP Science Team.

WMAP



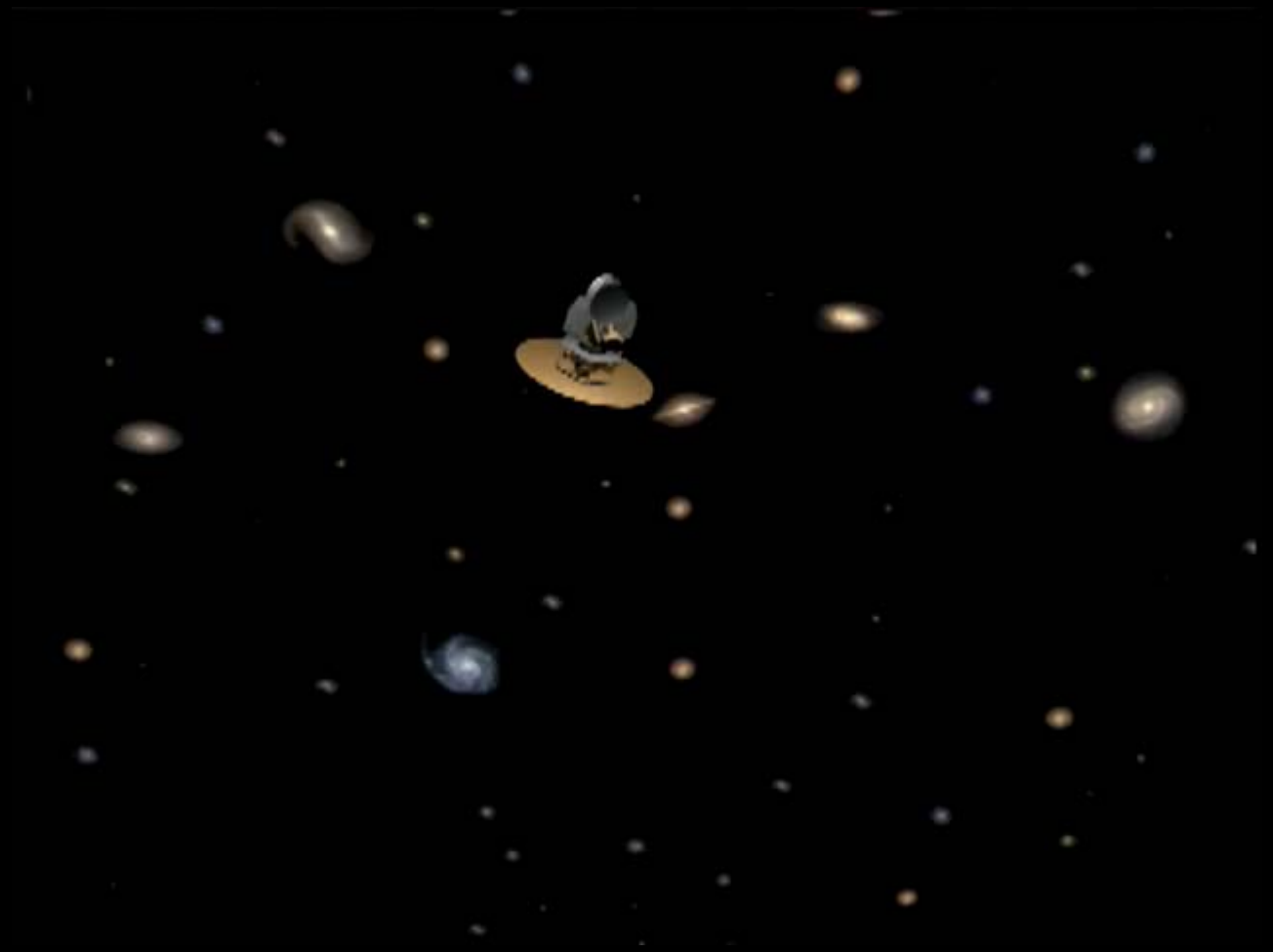
WMAP/



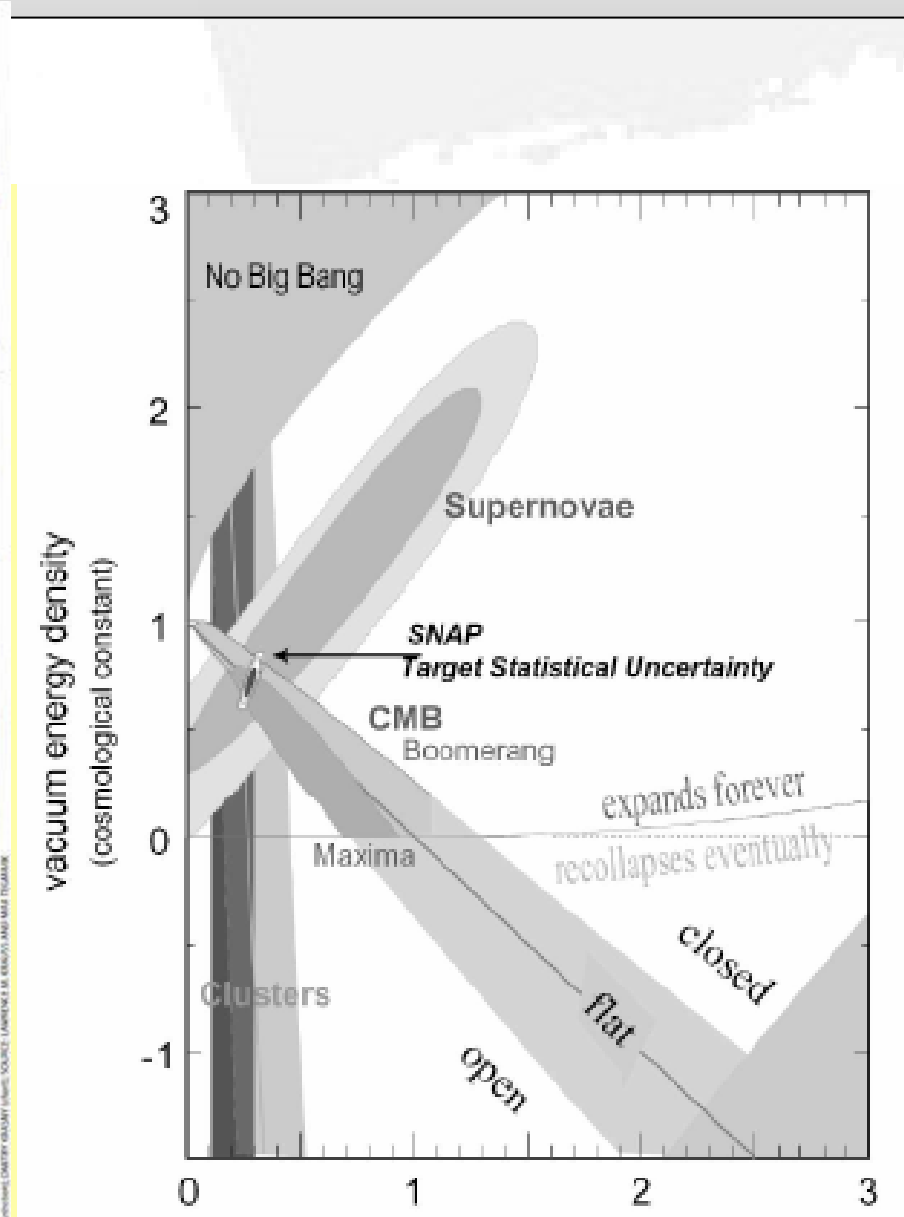
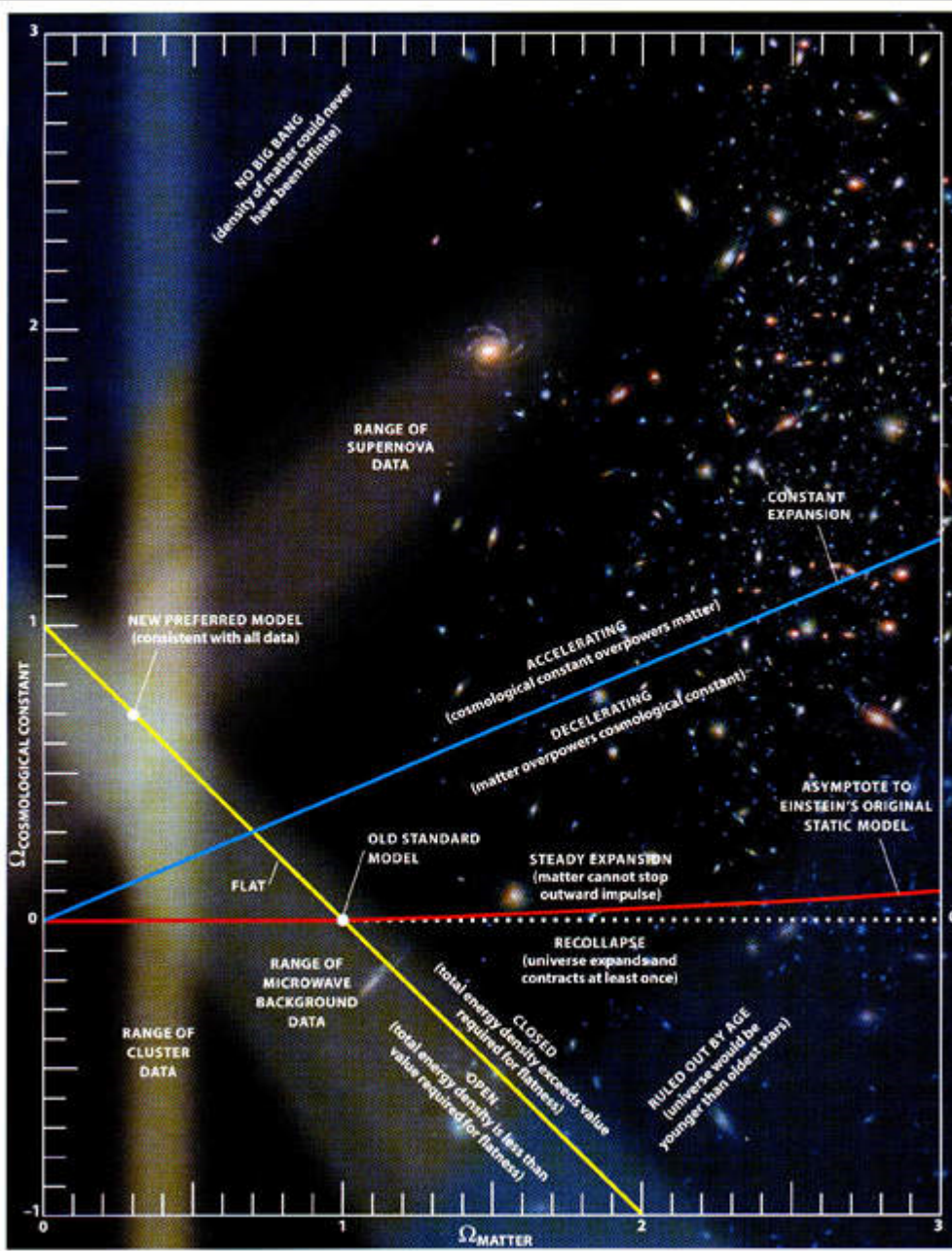


23 GHz

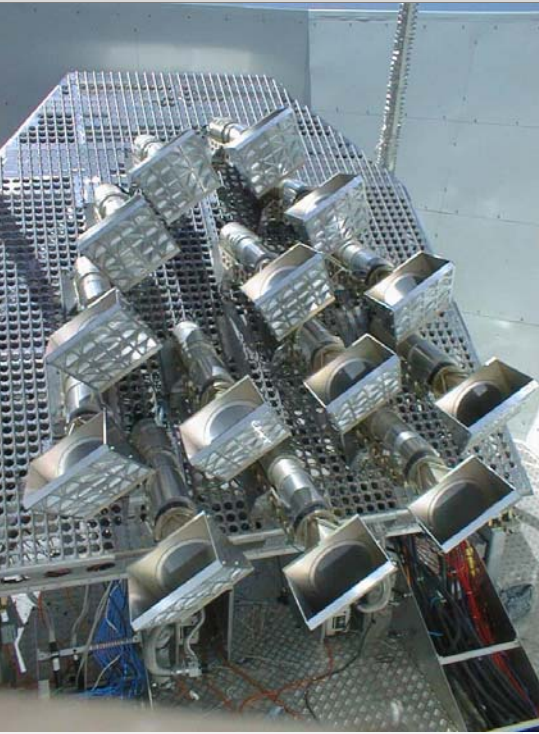




Überblick

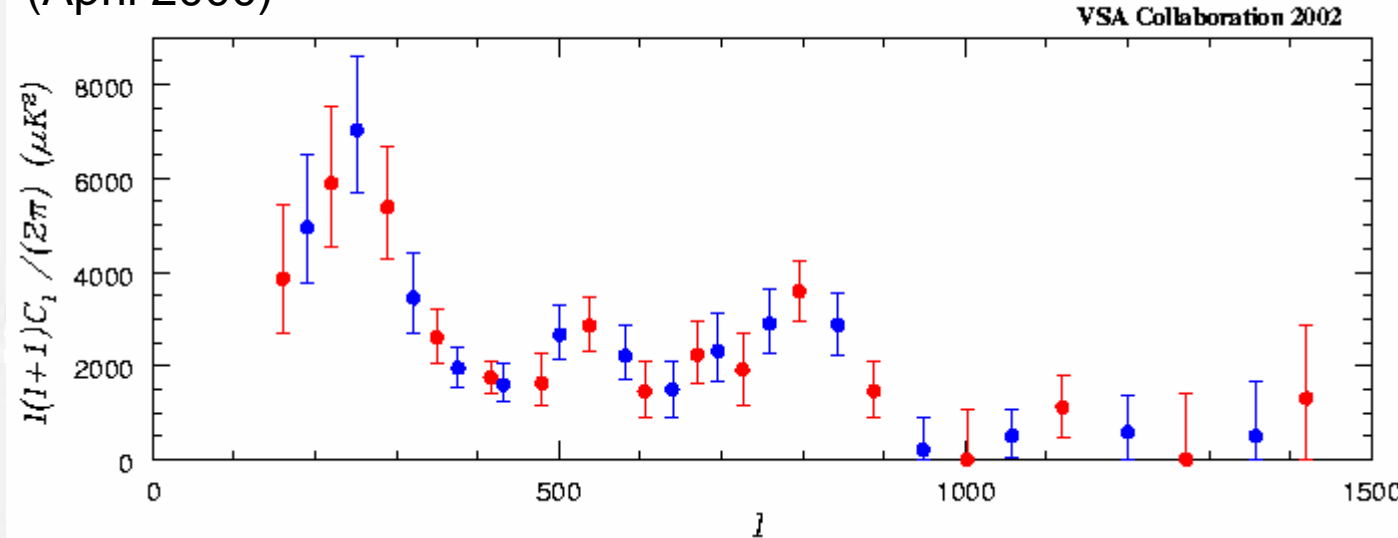


Neue Daten / VSA

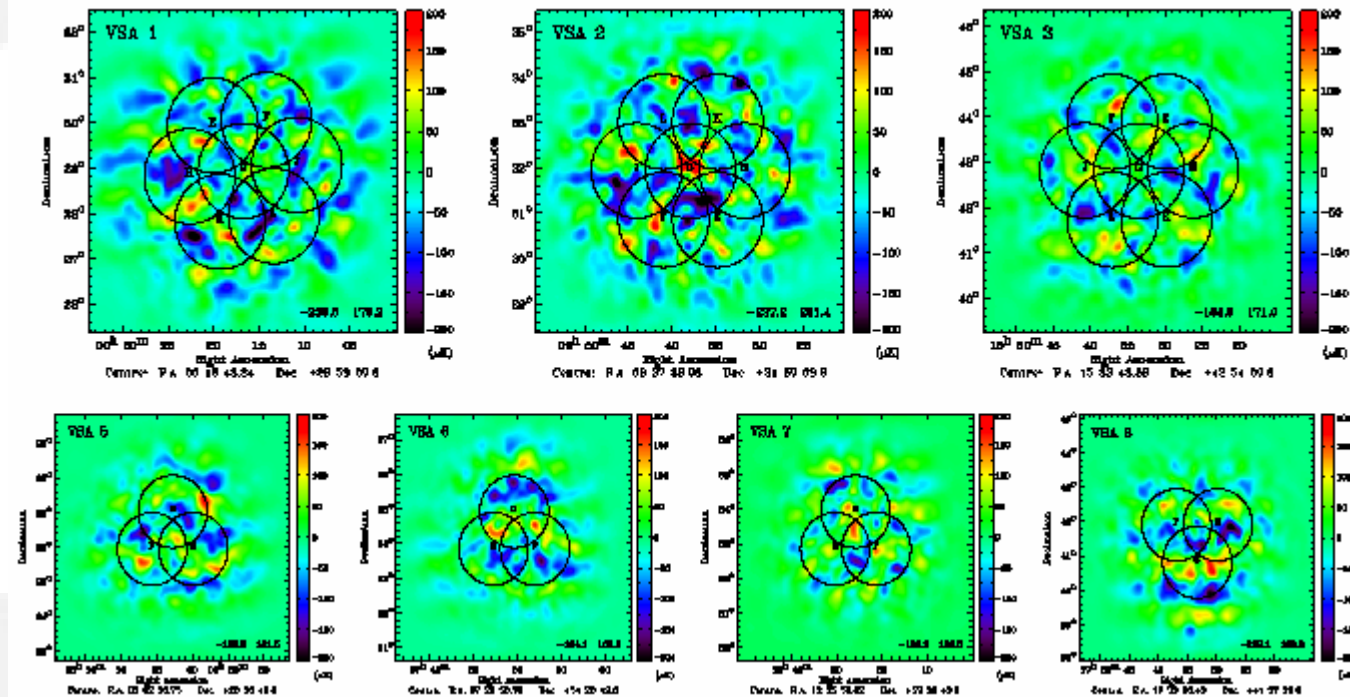


Top view of one of the source-subtraction antennas.
(April 2000)

VSA:
Very Small Array



Karten der CMB Anisotropien mit VSA



- Blau: kälter als Mittelwert
- Kreise: Sensitivität des Instruments
- Universum während Inflationsphase untersuchen: 10^{-35} Sekunden
- Erwartet: Verteilung der Fluktuationen unabhängig von der Skala
- Aber: Fluktuationen am deutlichsten auf Skalen von 0.5 Grad
- Auf größeren (Größe des Universums) und kleineren Skalen (Galaxienhaufen) sind die Variationen in Dichte und Temperatur geringer, bestätigt von CBI (Chile)

Cosmic Background Imager (CBI)

Gravitationswellen hinterlassen
Spuren in Beobachtungen
der Polarisation der
kosmischen Hintergrundstrahlung

29 October 2004
Science

VOL. 306 No. 5697
Pages 761-924 \$10

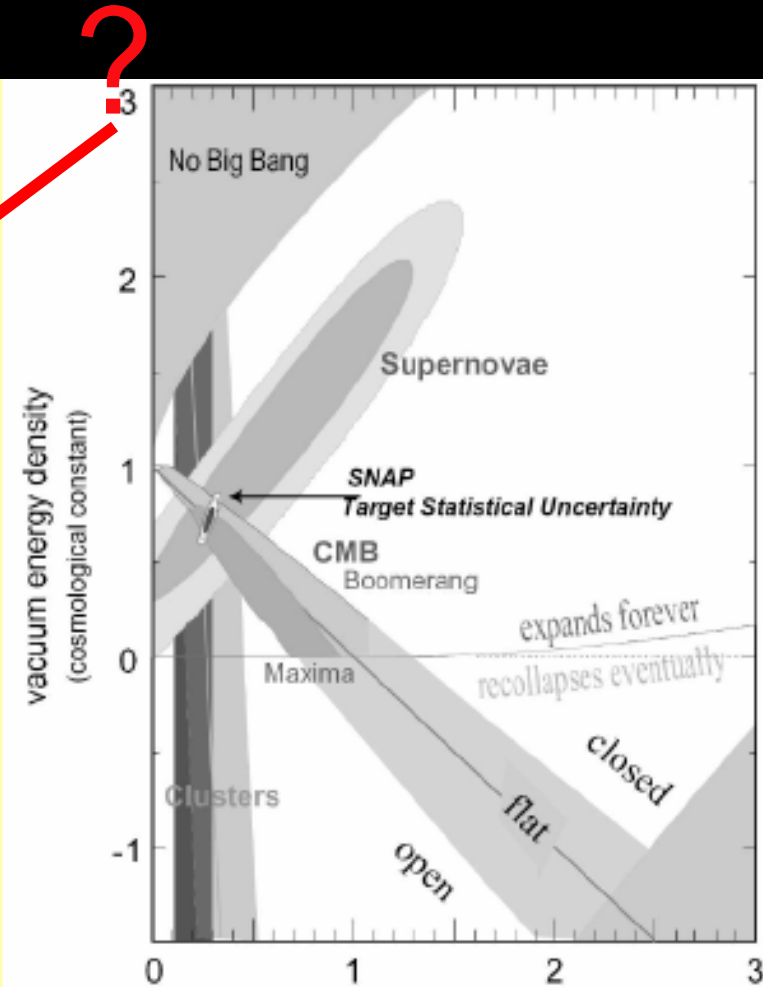
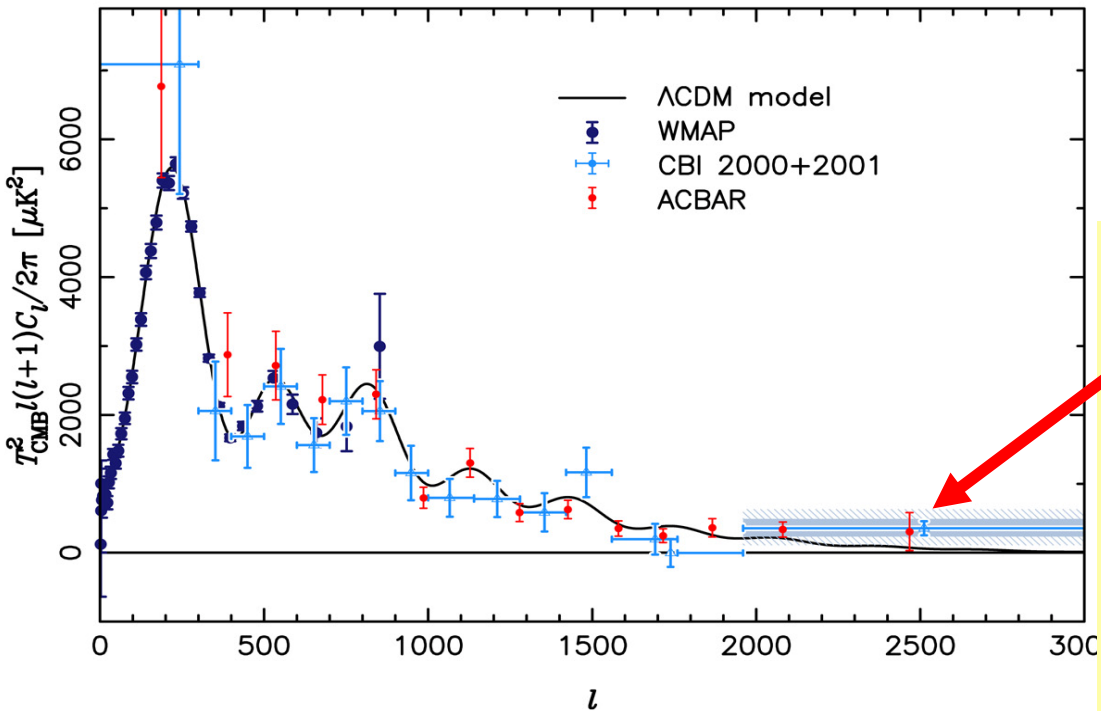
AAAS

Entdeckung der CMB Polarisation

Courtesy of R. Bustos

Der Mikrowellenhintergrund

Welche Rolle spielen die Galaxienhaufen?



Probleme mit WMAP-Resultaten

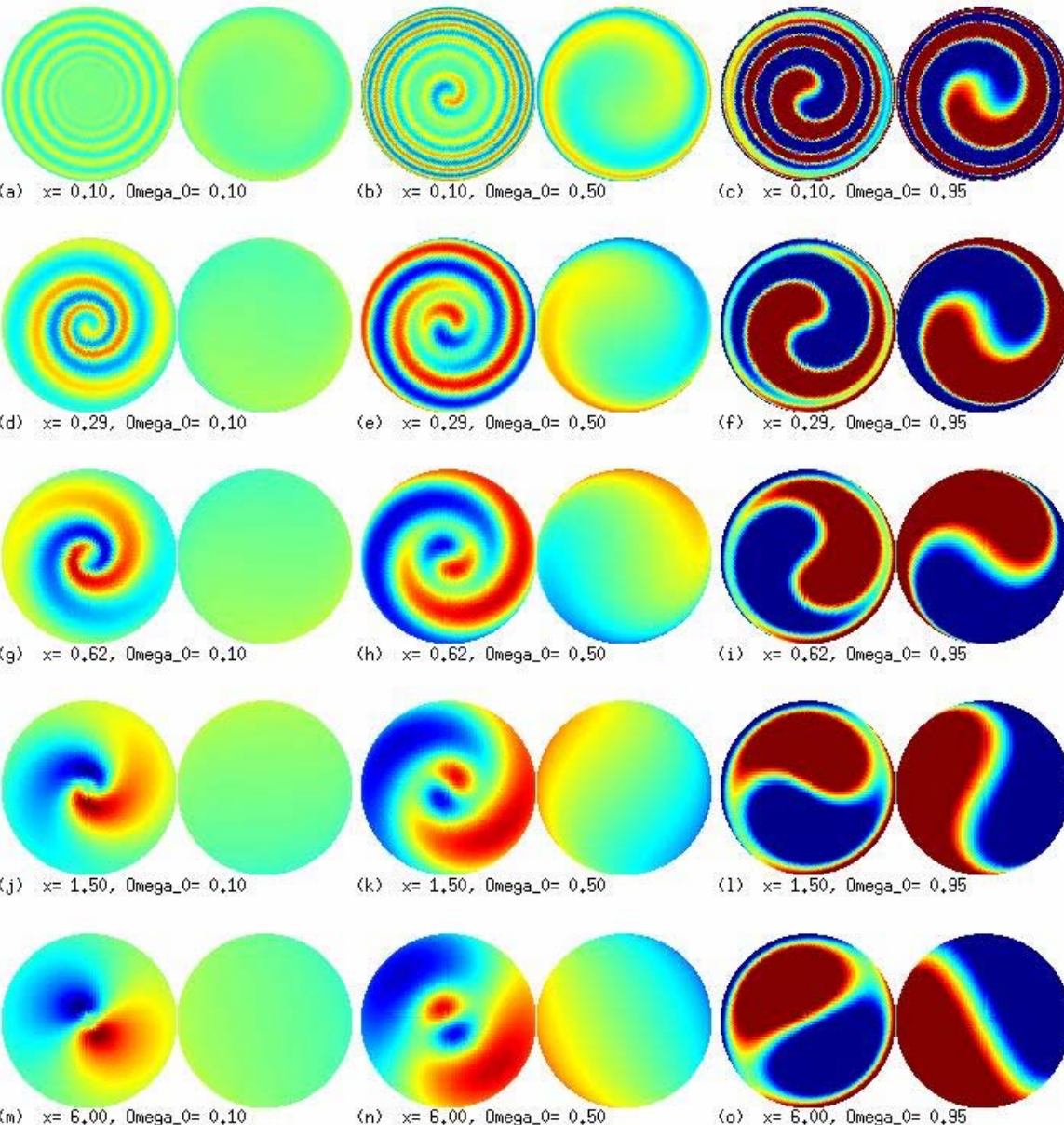
- WMAP und COBE finden ein Fehlen an Temperaturvariationen auf den größten Skalen (>60 Grad)
 - Statistisch? Himmel nur 360 Grad, nicht genügend großskalige Regionen für adäquates sampling
 - Oder: Probleme mit Inflation, Dunkler Energie, Topologie des Universums

Zweifel an WMAP-Resultaten

Verletzung der kosmischen Isotropie?

- Bislang zwei fundamentale Leitprinzipien der Kosmologie:
 - Kosmologische Homogenität
 - Isotropie
- WMAP-Daten: Temperaturfluktuationen sollten gleichmäßig über den Himmel verteilt sein, stattdessen **Anomalien auf großen Winkelskalen, welche auf bevorzugte Richtung im Universum hinweisen**
- Klasse von Kosmologischen Modellen, welche homogen sind jedoch Anisotropien zulassen: **Bianchi Type VIIh Modelle**: CMB Photonen bewegen sich entlang von Geodäsen, welche um die Symmetrieachsen rotieren und durch die anisotrope Expansion „gestreckt“ (oder rotverschoben) werden. Strahlungsfeld erscheint dann in Abhängigkeit von dem von den Photonen eingeschlagenen Weg heißer oder kälter, was dann zu weiterer Anisotropie des beobachteten CMB in Form von spiraligen Mustern führt.
- Asymmetrie läßt sich durch eine Kombination von Scherung (entlang einer bestimmten Achse) und Vortizität (globale Rotation um dieselbe Achse) erklären

Verletzung der kosmischen Isotropie?

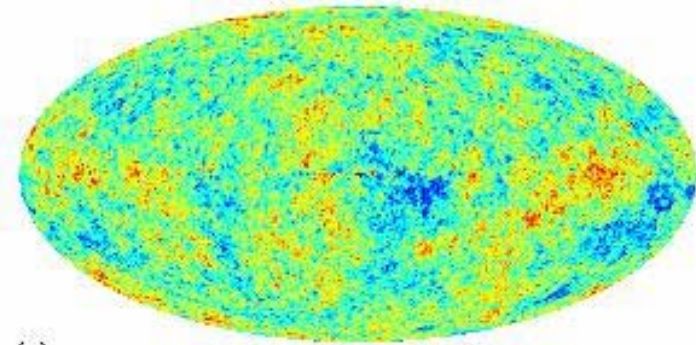


- Beispiele für durch Bianchi Modelle mit verschiedenen Parametern induzierte CMB Anisotropiemuster. Jeder Graph zeigt den gesamten Himmel in orthographischer Projektion
- Jaffe, Banday & Chluba

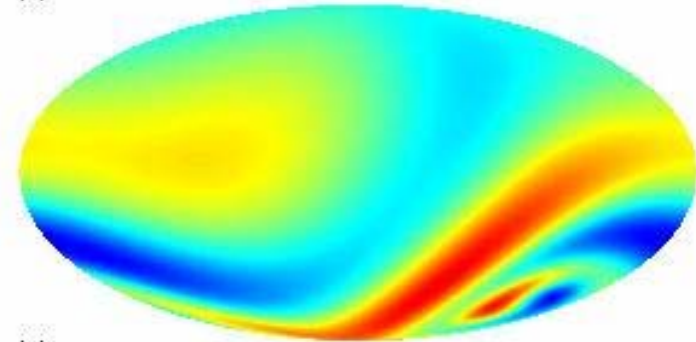
Zweifel an WMAP-Resultaten

Verletzung der kosmischen Isotropie?

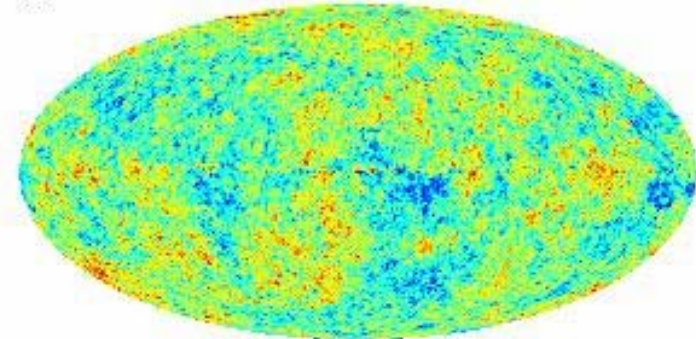
- Rechnet man die aus dem Bianchi Modell resultierende Anisotropie aus den CMB Daten heraus, so beseitigt dies die erwähnte Asymmetrie und weitere damit in Verbindung stehende Anomalien
- Aber: **solche Modelle sind nicht vereinbar mit der Inflationstheorie und der gemessenen Gesamtenergiedichte des Universums**



(a)



(b)



(c)

-300 μK  +300 μK

Zweifel an WMAP-Resultaten

- Lieu & Mittaz: suchen nach Hinweisen auf Gravitationslinseneffekte in WMAP Daten
- Expandierendes Universum (streckt den Raum), Gravitation beschränkt den Raum
- Kalte Spots im Mikrowellenhintergrund sind zu gleichförmig in Größe um den Weg vom Beginn des Universums zu uns zurückgelegt zu haben: gaußförmige Verteilung der Spotgrößen erwartet, stattdessen haben zu viele kalte Spots gleiche Größe
- Kalte Spots sind vermutlich die Geburtsplätze von Galaxien und Galaxienhaufen
- Einstein: Netto-Effekt der gegeneinander wirkenden Kräfte von Gravitation und Expansion sollte gleich bleiben, wenn die Materiemenge im Universum gleich bleibt

Zweifel an WMAP-Resultaten

- Lösung des Problems:

- Konservativ: Kosmologische Parameter (Hubble Konstante, Masse der dunklen Materie, etc.) falsch gesetzt für die Anfangsbedingungen

- Spekulativ: möglicherweise sind einige „cool spots“ durch nahe physikalische Prozesse entstanden und nicht zu Beginn des Universums

- Noch schlimmer: Hintergrundstrahlung nicht kosmologisch sondern durch „lokale“ Prozesse entstanden

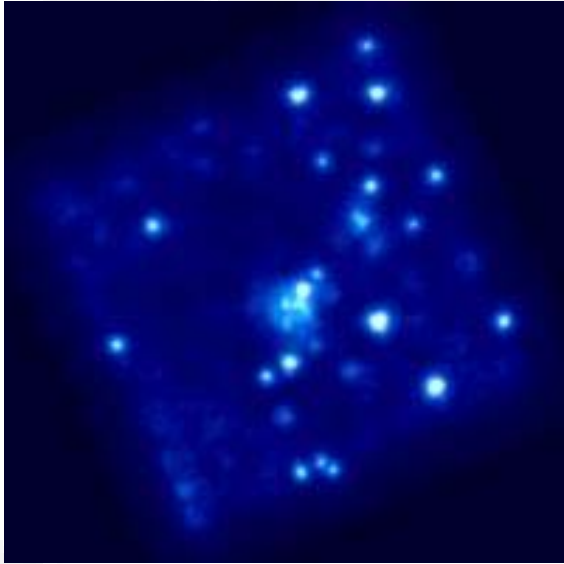
Zweifel an WMAP-Resultaten

- Damit ist auch die Big Bang-Theorie angezweifelt und die ganzen Baustellen um sie am Leben zu erhalten
 - Inflation (Überlichtschnelle Ausdehnung des Universums)
 - Dunkle Materie
 - Dunkle Energie
 - Sehr alte Sterne
- Lieu und Mittaz finden ebenfalls, daß WMAP Hinweise auf ein vielleicht „superkritisches“ Universum liefert, mehr Masse als Standard-Interpretation von WMAP angibt -> Probleme mit Inflation

Zweifel an WMAP-Resultaten

- Zweiter „data release“ war erwartet für Februar 2004, verzögert aufgrund von einigen „Überraschungen“ in den Daten, Natur der Überraschungen wird geheimgehalten....
- Vermutung: die Natur der Anomalien im ersten Datensatz soll zunächst geklärt werden

Zweifel an den Resultaten von WMAP



Der Galaxienhaufen RXJ0847.2+3449 in rund 7 Milliarden Lichtjahren Entfernung. **Foto:** ESA

- XMM-Newton: 8 Galaxienhaufen untersucht , bis zu 10 Lichtjahre entfernt
- In einem Universum mit hoher Materiedichte sollte ein Galaxienhaufen im Laufe der Zeit immer weiter anwachsen: junge Galaxienhaufen sollten weniger Masse haben als alte
- In einem Universum mit niedriger Materiedichte (unseres, + 70% Dunkle Energie) sollten Galaxienhaufen ser früh aufhören zu wachsen und damit ähnlich aussehen wie heute

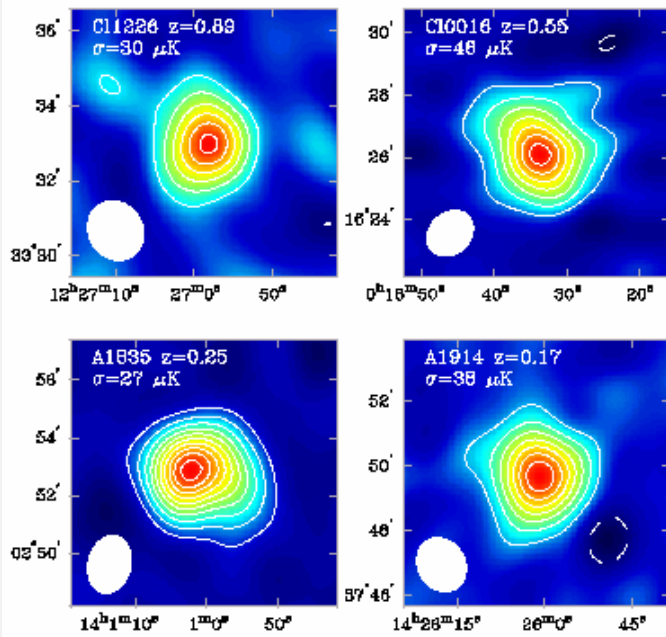
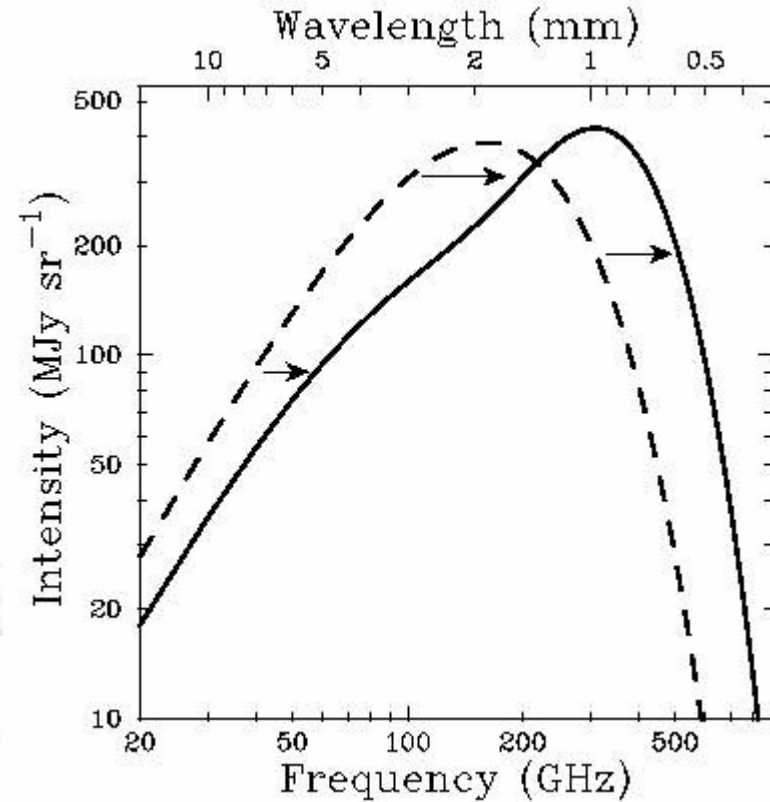
Zweifel an den Resultaten von WMAP

- XMM-Newton Daten: alte Galaxienhaufen unterscheiden sich deutlich von neuen Galaxienhaufen!!
- In der Vergangenheit gab es weniger Galaxienhaufen als heute
- => Universum weist hohe Materiedichte auf
- Eklatanter Widerspruch zum aktuellen „Dunkle Energie“-Modell
- Dunkle Energie gibt es möglicherweise nicht

Zweifel an den Resultaten von WMAP

- Galaxienhaufen können die Hintergrundstrahlung erheblich stören und verändern
- Sunyaev-Zeldovich-Effekt

$$\Delta v / v = - 4 (k_B T_e / m_e c^2)$$



PLANCK



1. $\Delta T/T \sim 2 \times 10^{-6}$, besser als 10 Bogenminuten Auflösung
2. Februar 2007, Ariane 5, Kourou
3. Zusammen mit Herschel
4. 2 komplette Himmels-Durchmusterungen geplant
5. 9 Frequenzbänder (30-857 GHz)
6. MPA Heidelberg