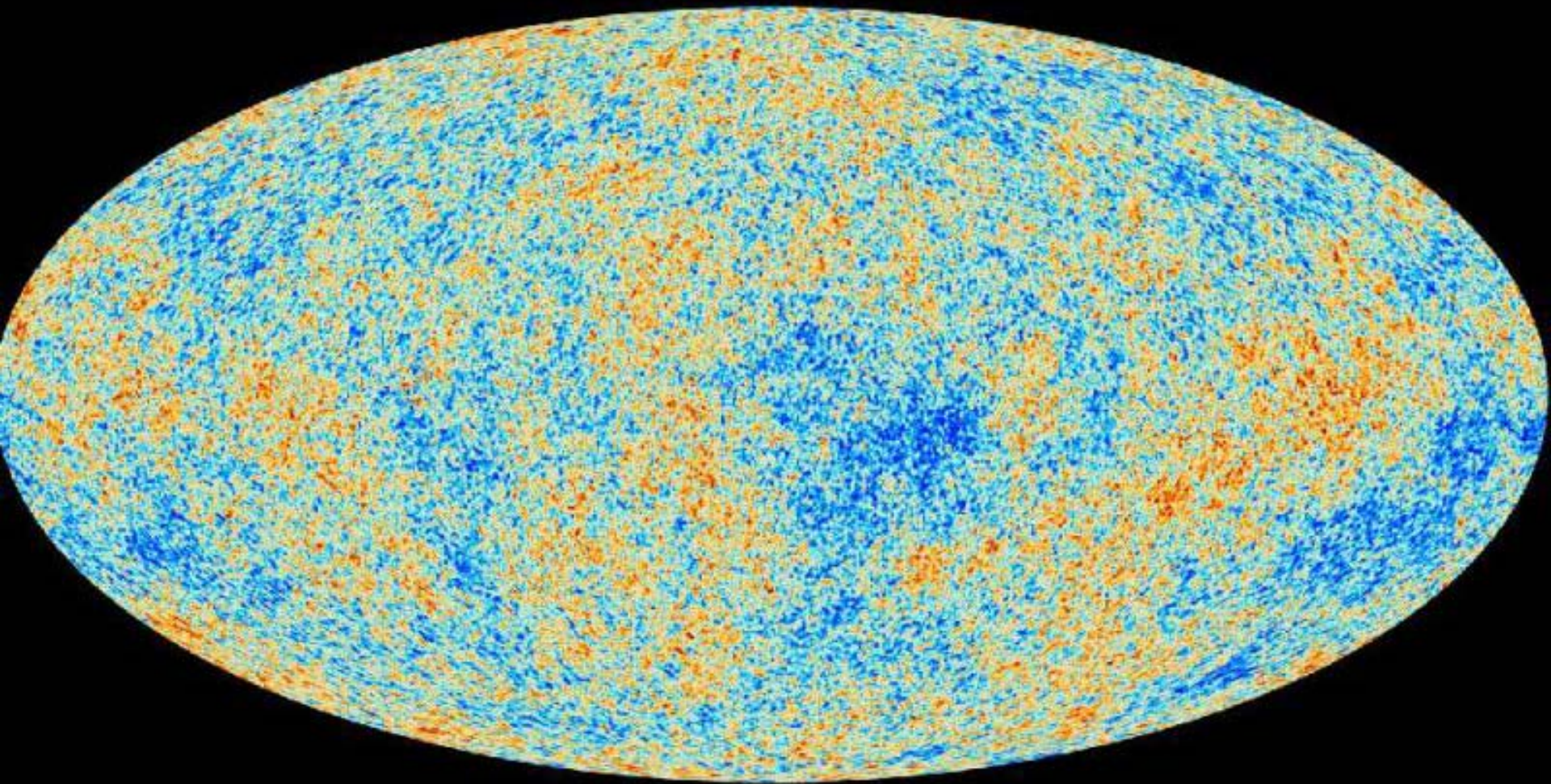
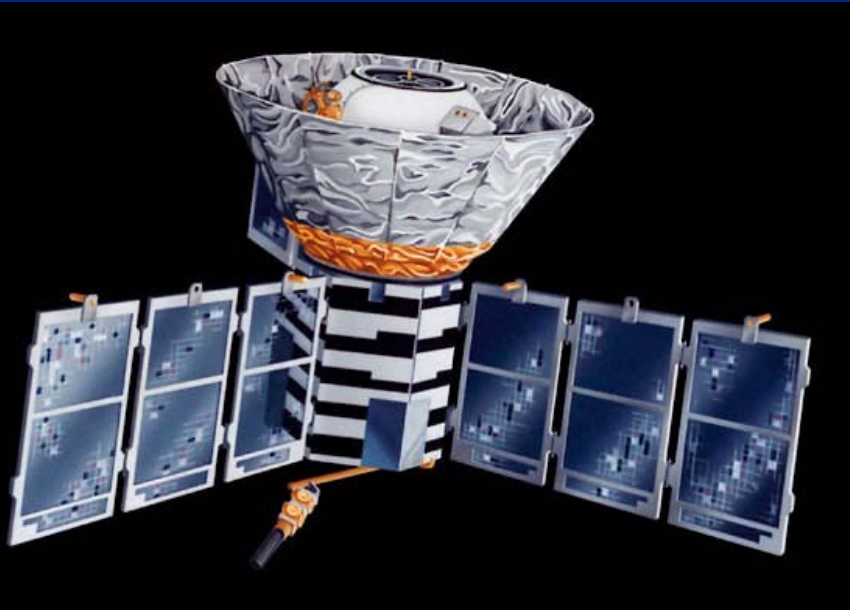


Und es werde Licht

Die kosmische Hintergrundstrahlung



Vermessung der Hintergrundstrahlung



COBE



WMAP

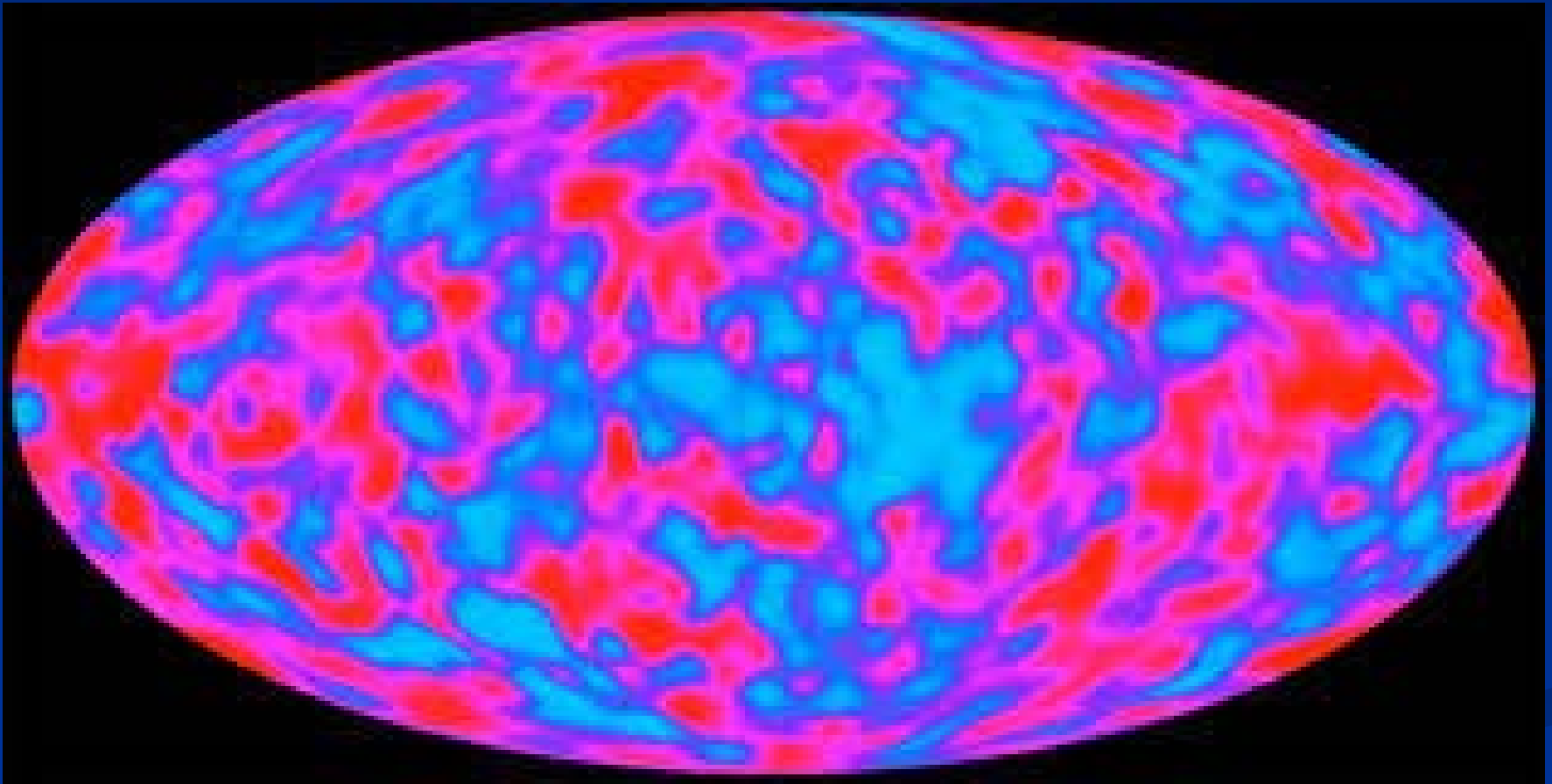


Planck



Planck

Foto des Urknalls



COBE

Foto des Urknalls

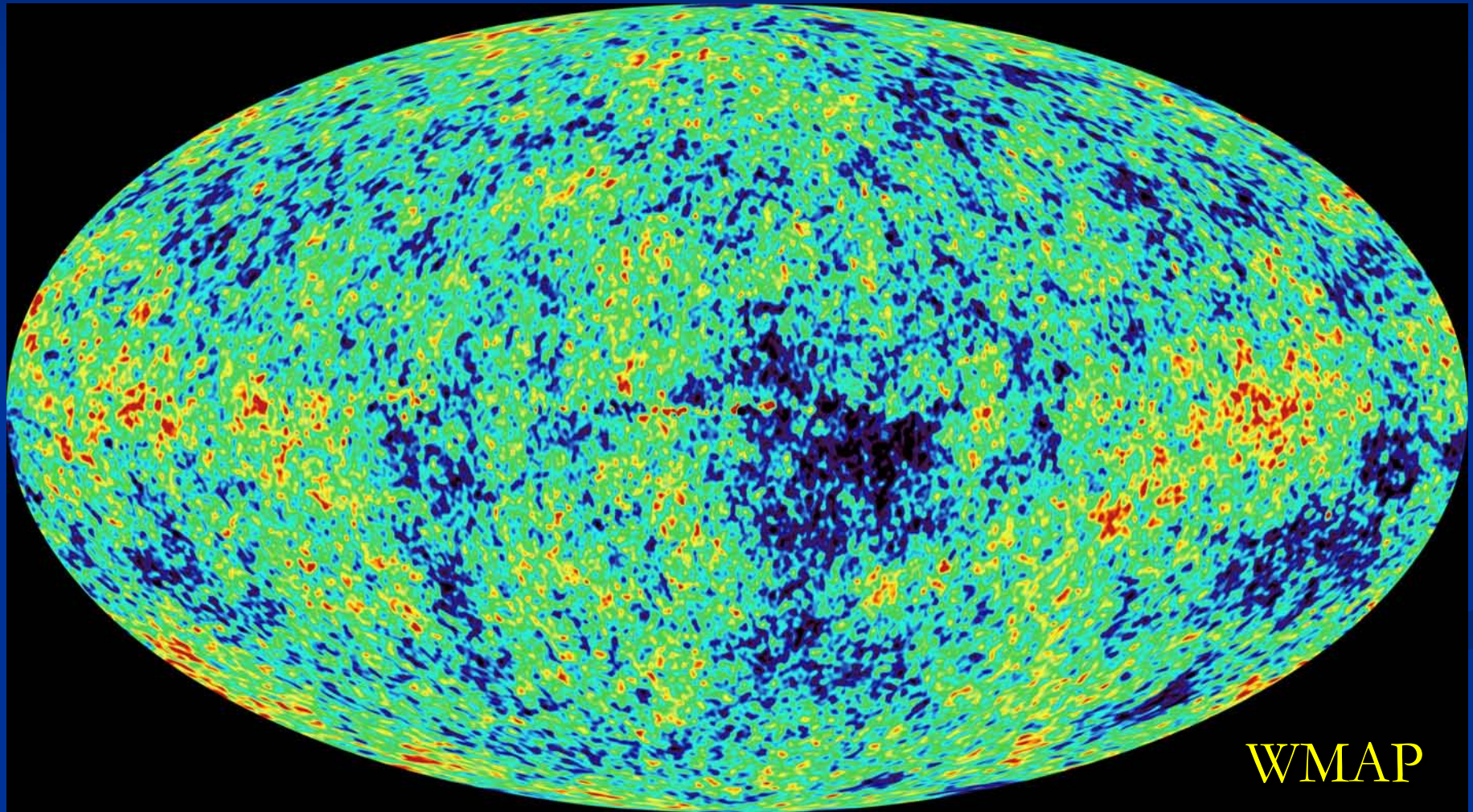
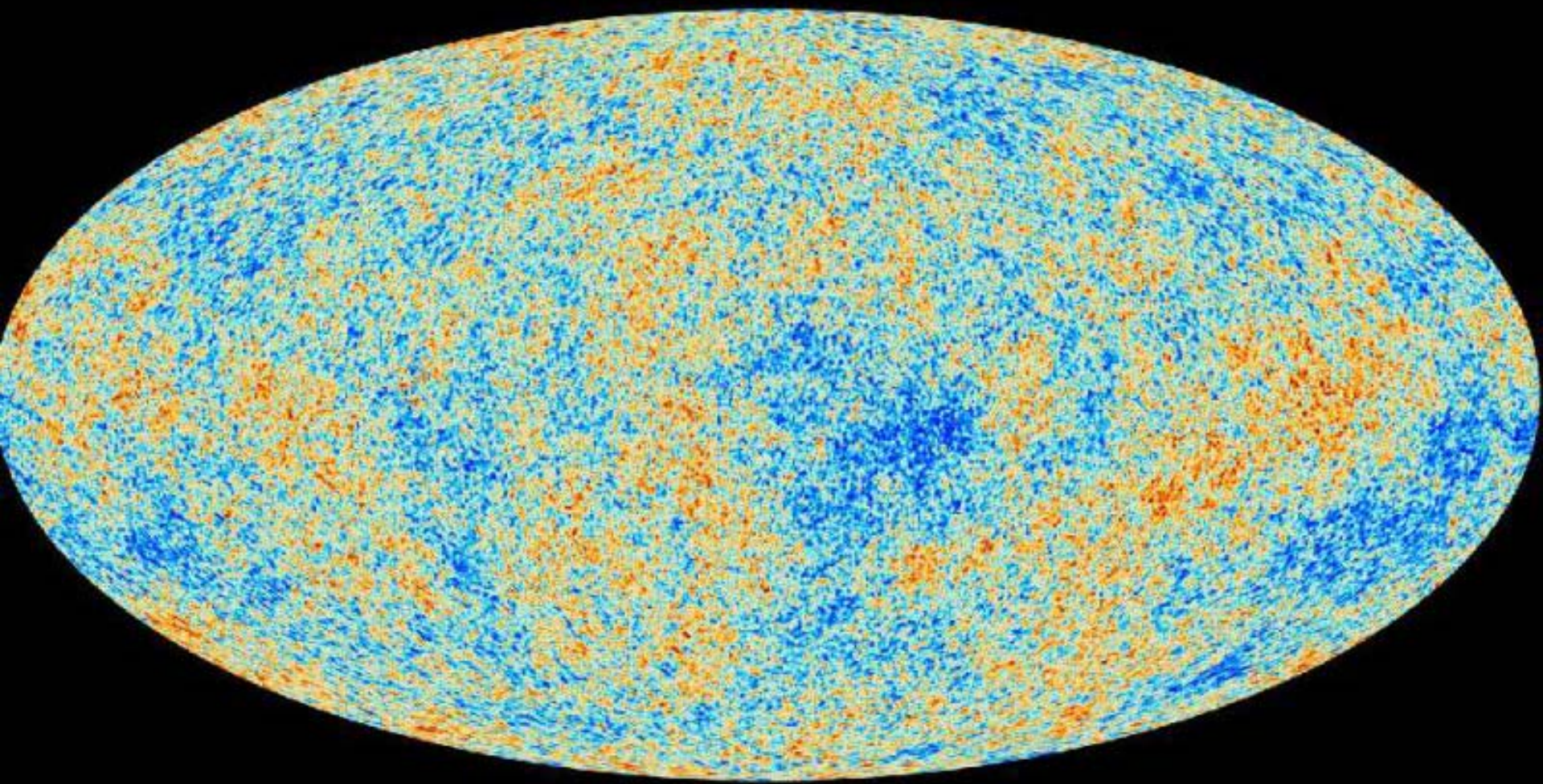


Foto des Urknalls



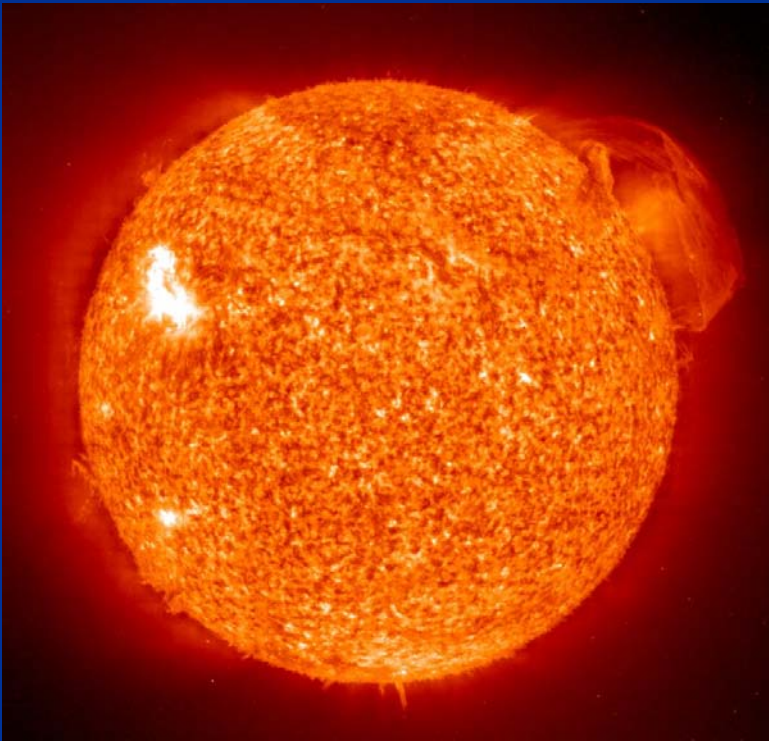
Planck

Was sehen wir ?

- Zustand des Universums ca 400 000 Jahre nach dem Urknall
- Fluktuationen eines heißen Plasmas

Plasma

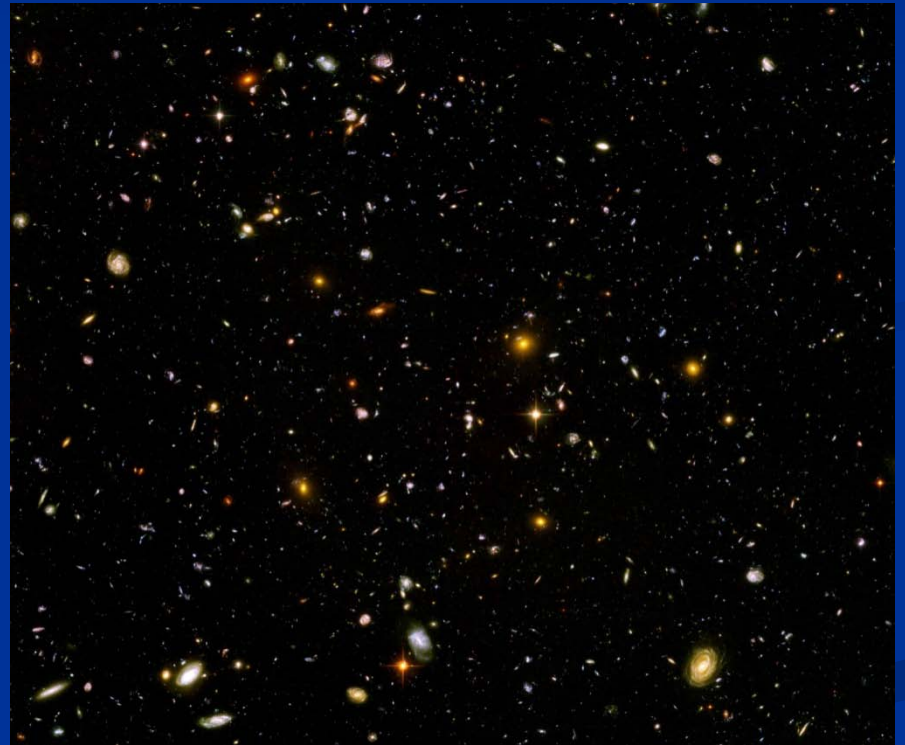
undurchsichtig



wie im Innern der Sonne

Atome

durchsichtig

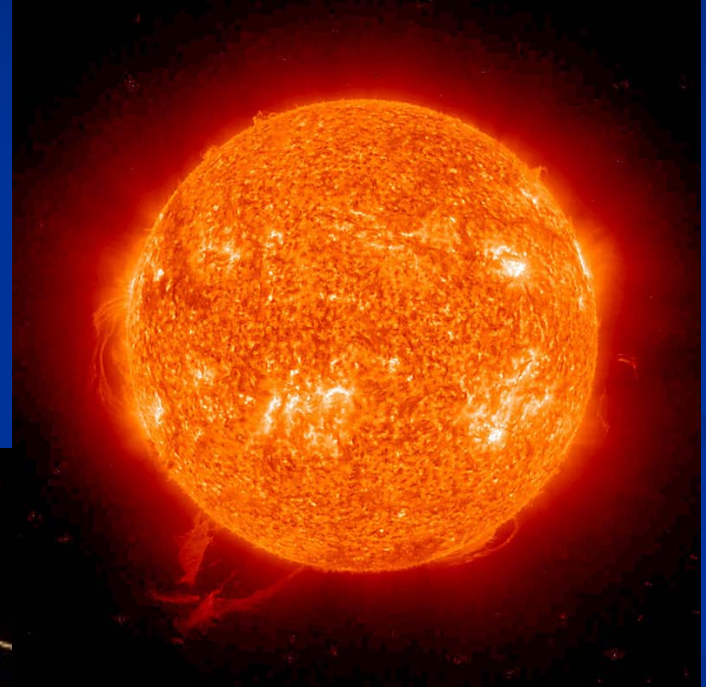


Weltall heute

Was ist Licht ?

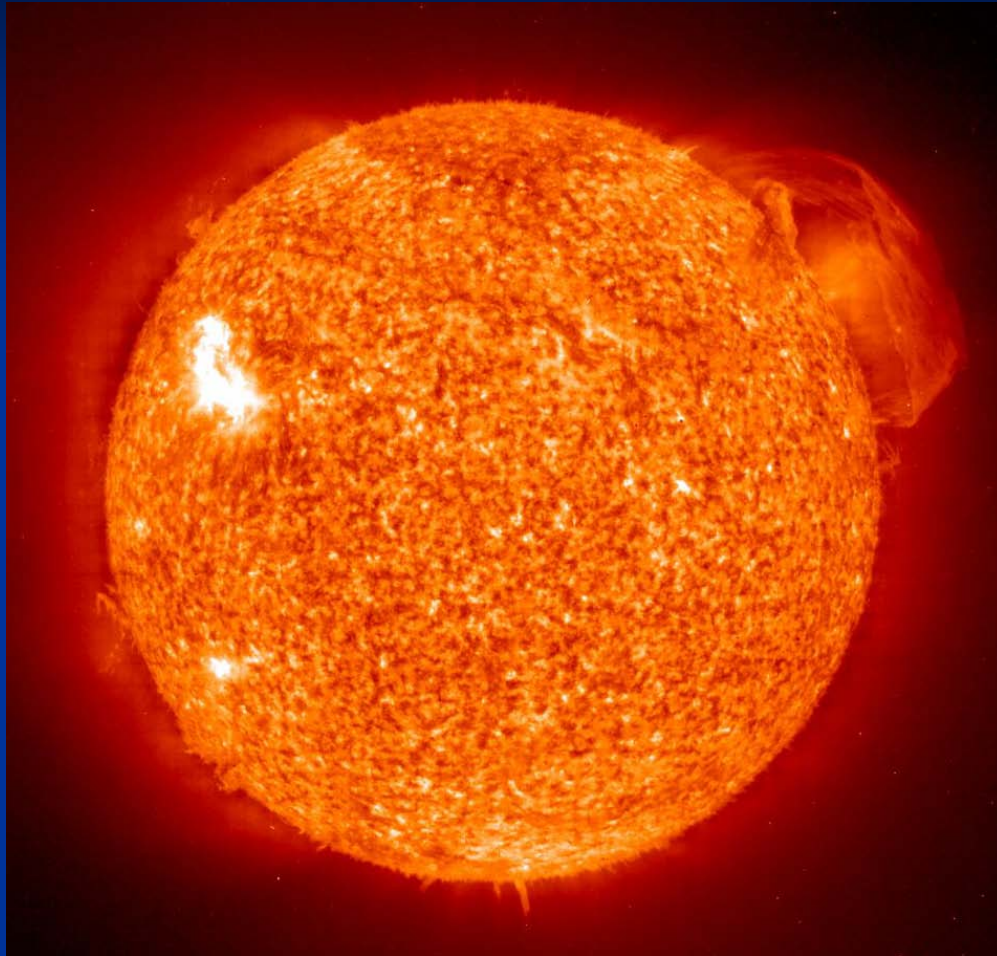
- Welle – Teilchen – Dualität
- Licht-Teilchen : **Photonen**
- Ohne Behinderung : auf (fast) geraden Bahnen:
Lichtstrahlen
- Photonen können gestreut werden, oder absorbiert und emittiert werden

Photon – Streuung in Wolke oder Plasma



undurchsichtig !

Kann man in die Sonne hineinschauen ?



nur Oberfläche der Sonne sichtbar , obwohl viel elektromagnetische Strahlung im Innern !

Bilder nur in durchsichtigem Medium möglich

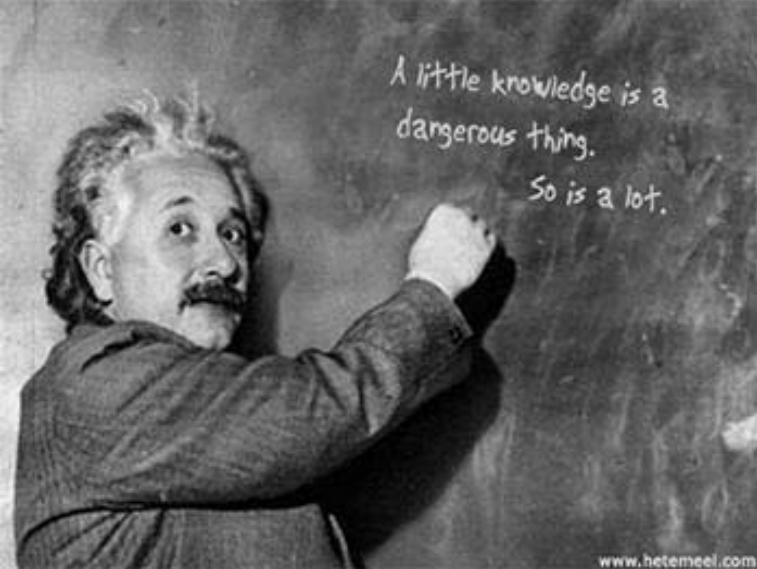
- Frühes Universum bis zu 400 000 Jahre nach Urknall (abb : after big bang): Elektronen und Atomkerne getrennt, häufige Streuung der Photonen , undurchsichtig
- Spätes Universum ab 400 000 Jahre abb : Elektronen und Atomkerne zu elektrisch neutralen Atomen kombiniert, nur sehr seltene Streuung der Photonen, durchsichtig , Lichtstrahlen

Was sehen wir ?

- Zustand des Universums ca 400 000 Jahre nach dem Urknall
- Übergang von Plasma zu Atomen
(Die Wolke löst sich auf .)

Bedeutung der Bilder für Urknall - Theorie

- Lösung der Einstein'schen Gravitationsgleichungen sagt heißes Plasma im frühen Universum voraus
- Beobachtung des Plasmas : entscheidender Test des Urknalls

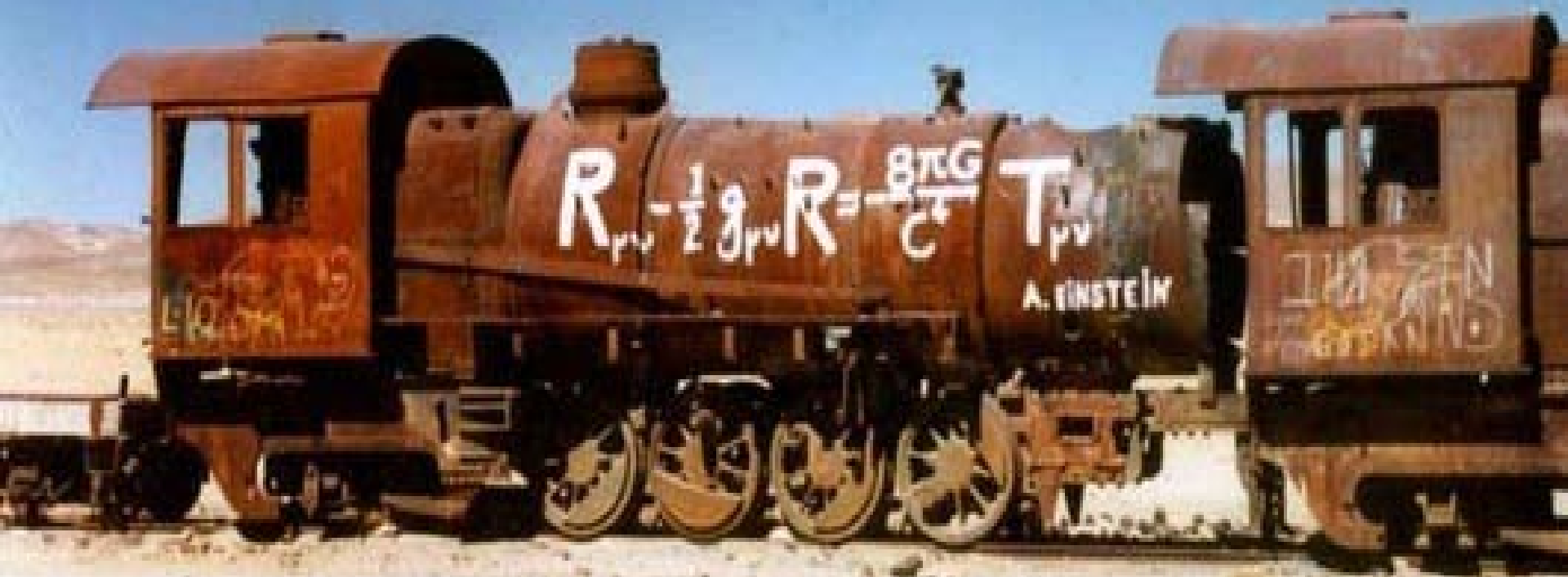


$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$



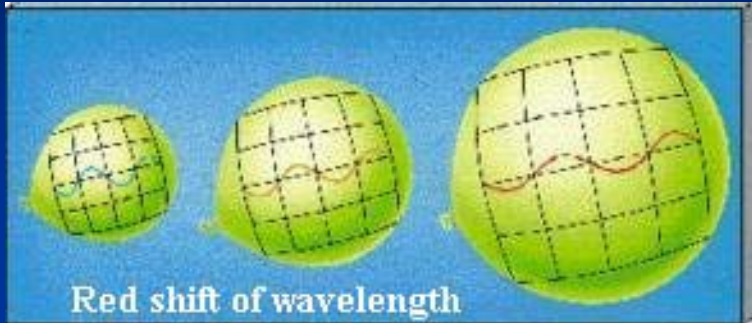
Gravitation regiert die Welt

Einsteins Gleichungen leicht gemacht



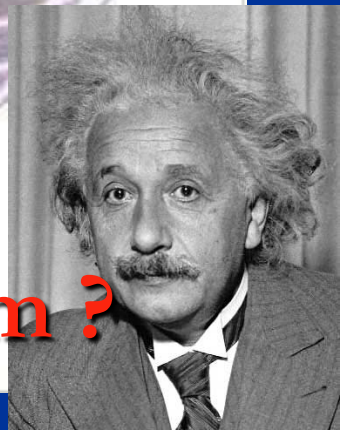
C. Wetterich, Mainz 27.5.

Expansion des Universums



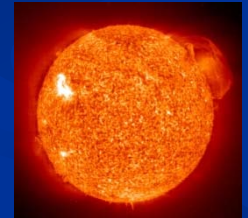
Expanding distance between galaxies

Hmm?



Expansion des Universums

- Der Raum zwischen den Galaxienhaufen dehnt sich aus.
- Früher war das Universum dichter, ... und heißer.
- Zurückverfolgung der Einstein'schen kosmologischen Gleichungen :
Urknall, extrem heißer Feuerball !
- Bis ca 400 000 Jahre nach dem Urknall : heißes Plasma aus Protonen, Elektronen und Strahlung



Zeit seit dem
Urknall (Jahre)

~ 300 Tausend

~ 500 Millionen

~ 1 Milliarde

~ 9 Milliarden

13.7 Milliarden



← Urknall

Universum gefüllt
mit ionisiertem Gas

← Universum wird neutral
und undurchsichtig

Das "Dunkle Zeitalter" beginnt

Erste Galaxien und Quasare
entstehen

Re-Ionisation beginnt

Die kosmische Renaissance:
Ende des "Dunklen Zeitalters"

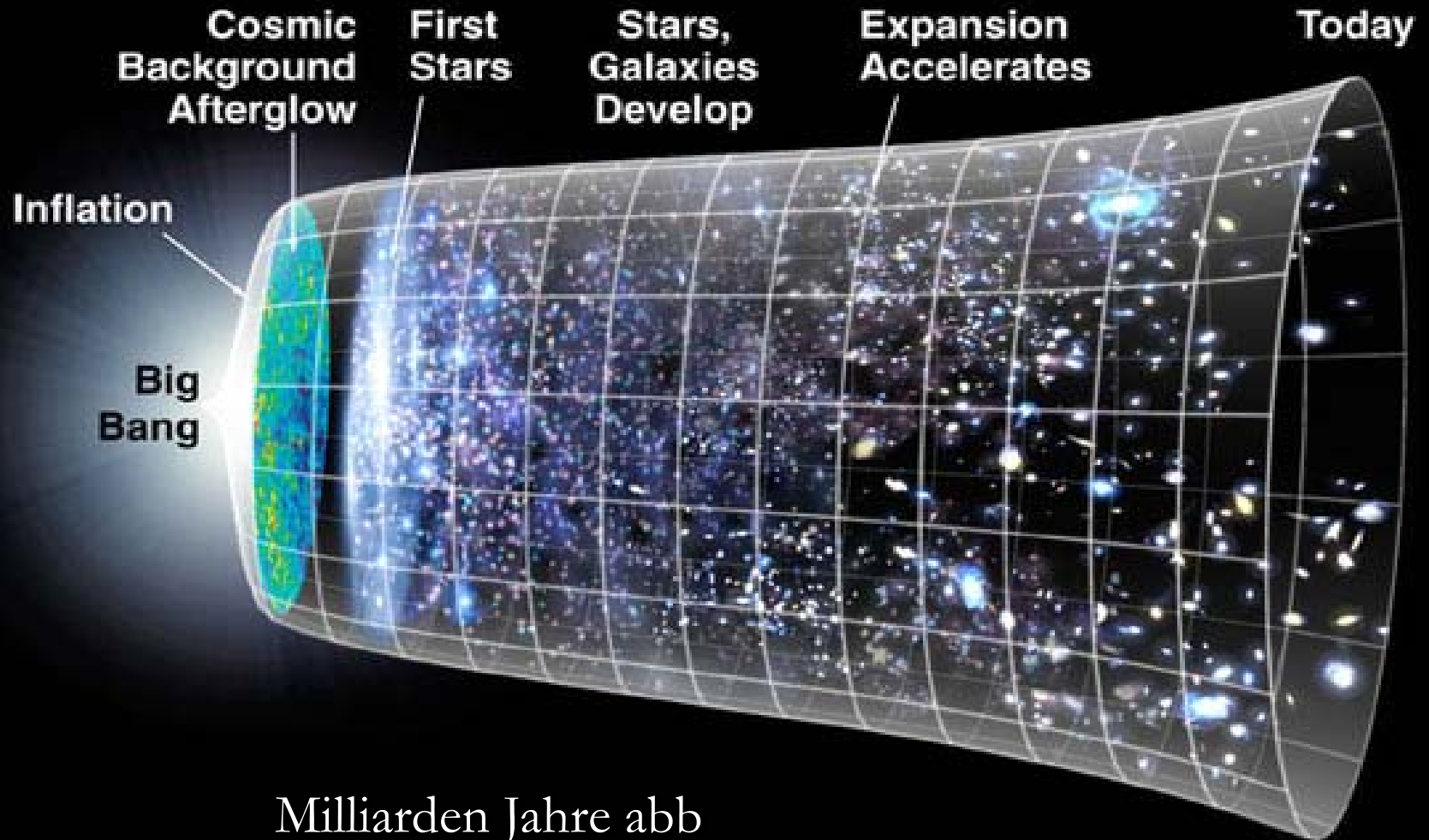
← Reionisation beendet.
Das Universum ist transparent.

Galaxien entwickeln sich

Das Sonnensystem entsteht

Heute: Astronomen
erklären das Universum

Entwicklung des Universums



Feuerball

- heißes Plasma
- Elektronen und Kerne oder Kernbestandteile getrennt
- viel heißer und dichter als die Sonne
- undurchsichtig
- Licht wird fortdauernd gestreut
- Universum kühlt ab
- Ende nach 400 000 Jahren

Kosmische Hintergrundstrahlung

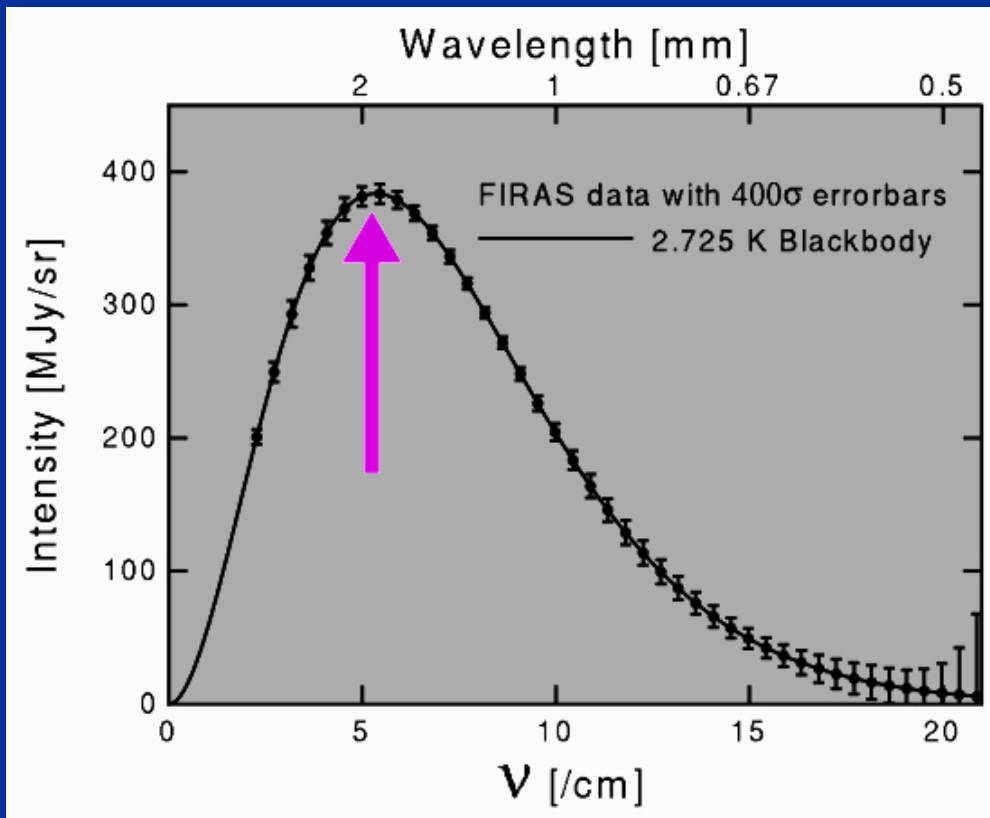
- 400 000 Jahre ab ist Universum genug abgekühlt, so dass sich neutrale Atome bilden können.
- Universum wird durchsichtig
- Vergleich : Wolke löst sich auf

Fiat lux !

Und es werde Licht !

Schnappschuß des Universums,
direkt bevor sich die Atome
gebildet haben

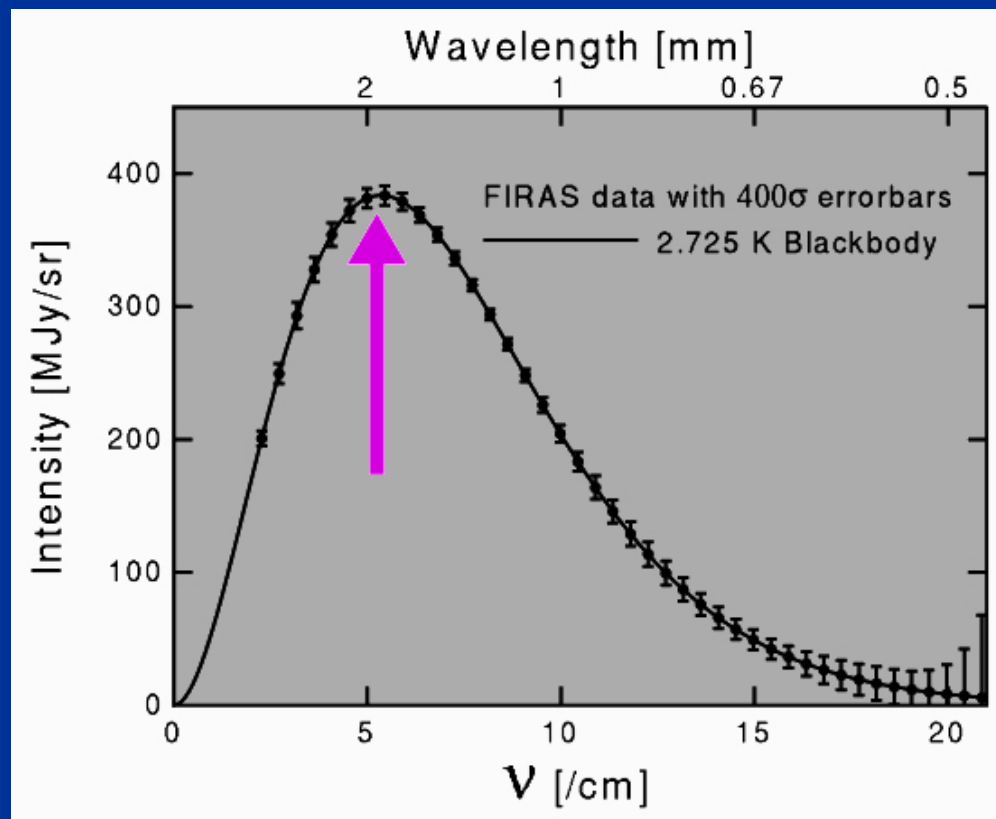
Einfachkeit des frühen Universums: Fluktuierendes Plasma im Temperaturgleichgewicht



Planck – Spektrum
(COBE)

Quantenmechanik
auf
astronomischen
Skalen

(1) Kosmische Hintergrundstrahlung bestätigt Urknall- Theorie: Plasma im frühen Universum



Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung

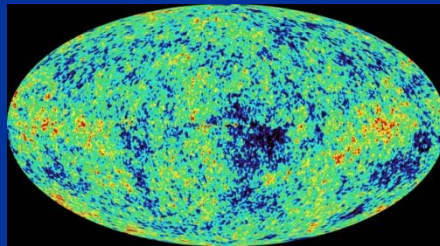


Fluktuationen in der Temperatur der Hintergrundstrahlung

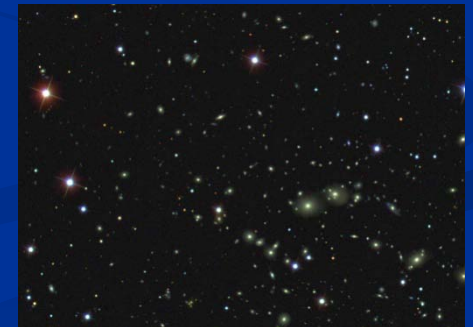


Strukturbildung

Aus winzigen Anisotropien wachsen die
Strukturen des Universums



Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen



The background of the slide is a complex, fractal-like network of purple and yellow lines, representing the cosmic web or the distribution of dark matter in the universe. The lines are thin and interconnected, forming a dense, web-like structure. The colors range from deep purple to bright yellow, with the yellow lines often appearing at the intersections or along the main branches of the web.

Simulationen im Computer : Verteilung der Dunklen Materie im Universum

Millenium simulation , VIRGO project

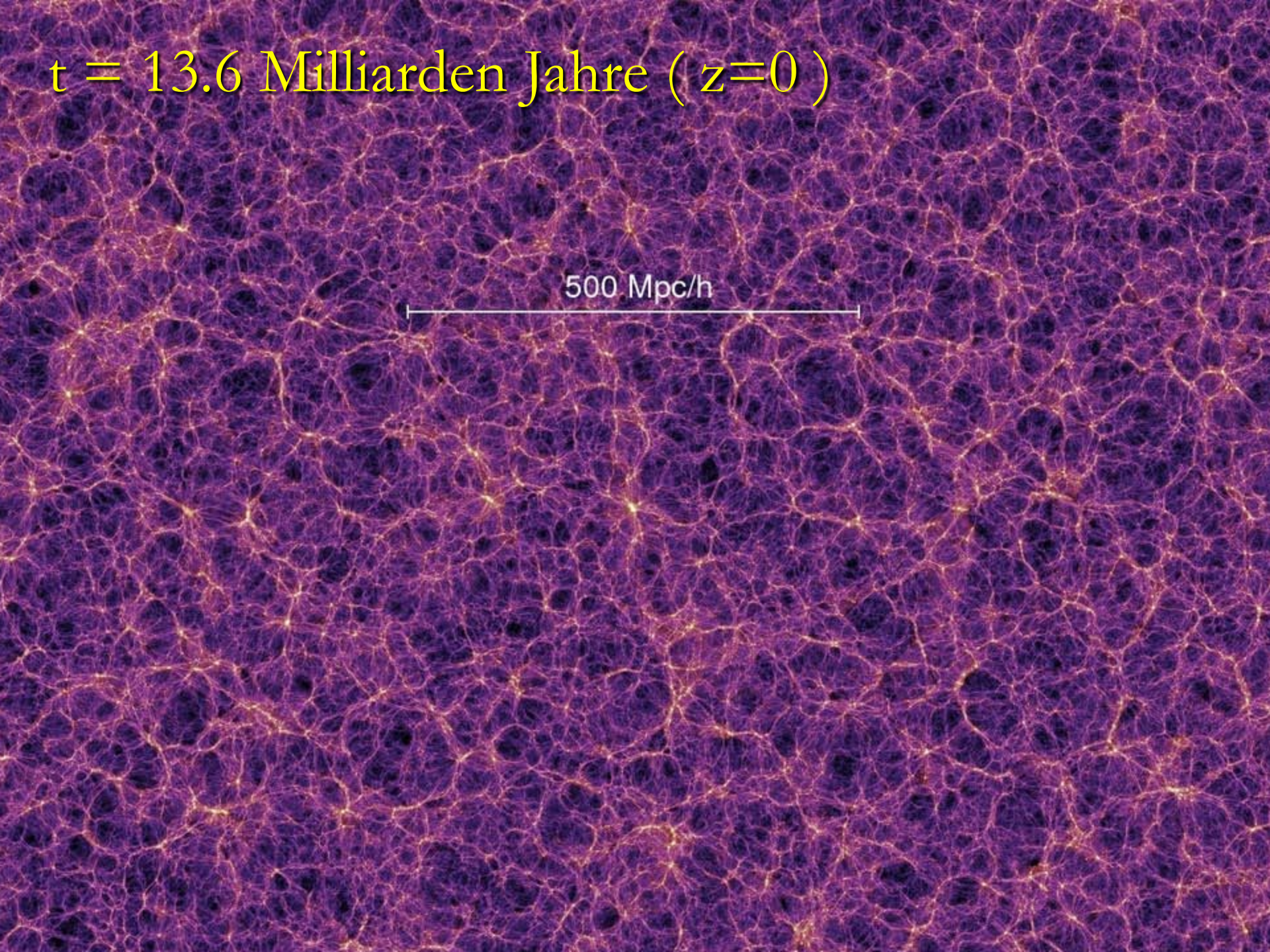
$t = 1$ Milliarde Jahre ($z = 5.7$)

500 Mpc/h



$t = 13.6$ Milliarden Jahre ($z=0$)

500 Mpc/h

A visualization of the cosmic web at redshift z=0, showing a dense network of dark matter filaments and galaxy clusters. The filaments are represented by thin, interconnected lines of varying thickness, with brighter yellow and orange colors indicating higher density. The background is a deep purple. A horizontal scale bar with vertical end-caps is positioned in the upper-middle section of the image.

Kosmische Strukturbildung im Grossrechner

Simon White, Mainz, 1.7.

500 Mpc/h



Fluktuationen als Keime für Entstehung der kosmischen Strukturen nötig

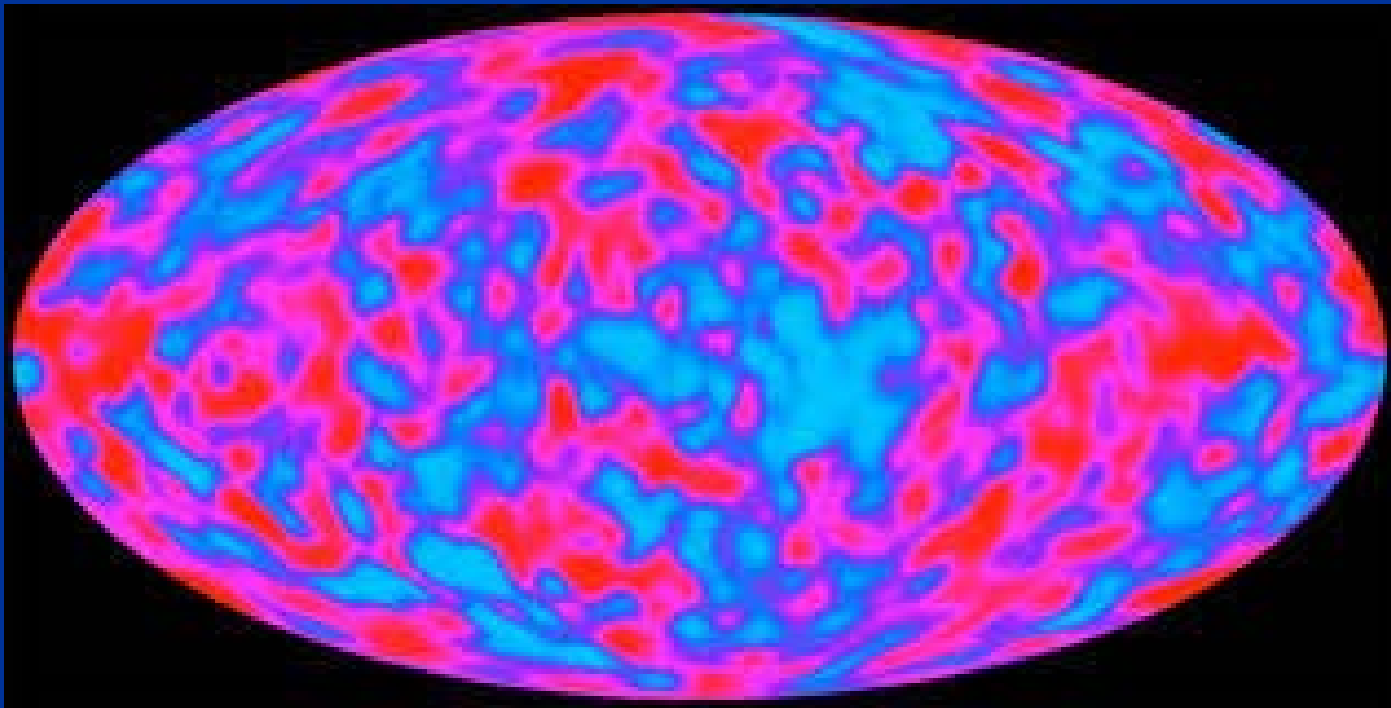


Foto des Urknalls

als sich die Atome bildeten : ca 400 000 Jahre abb

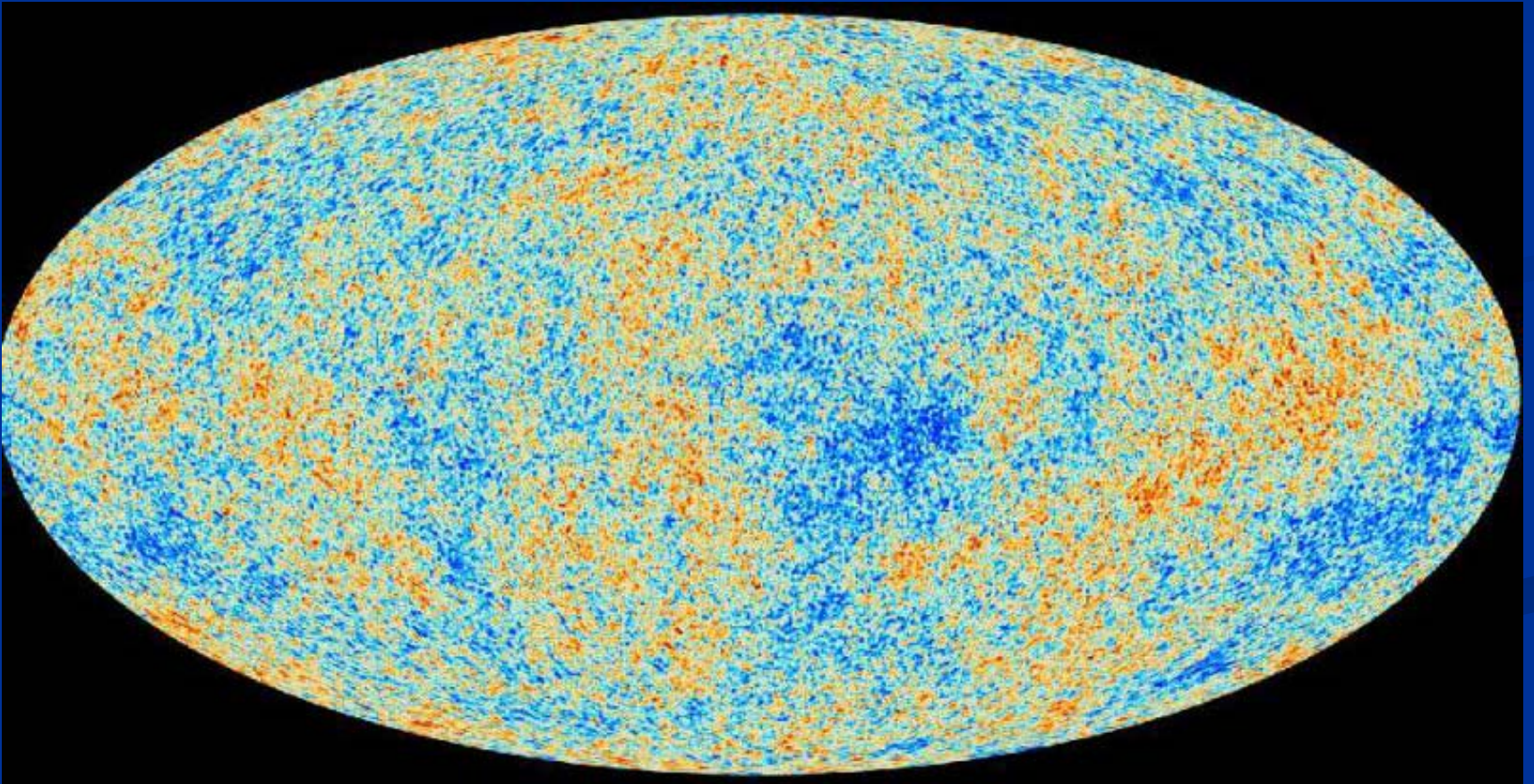
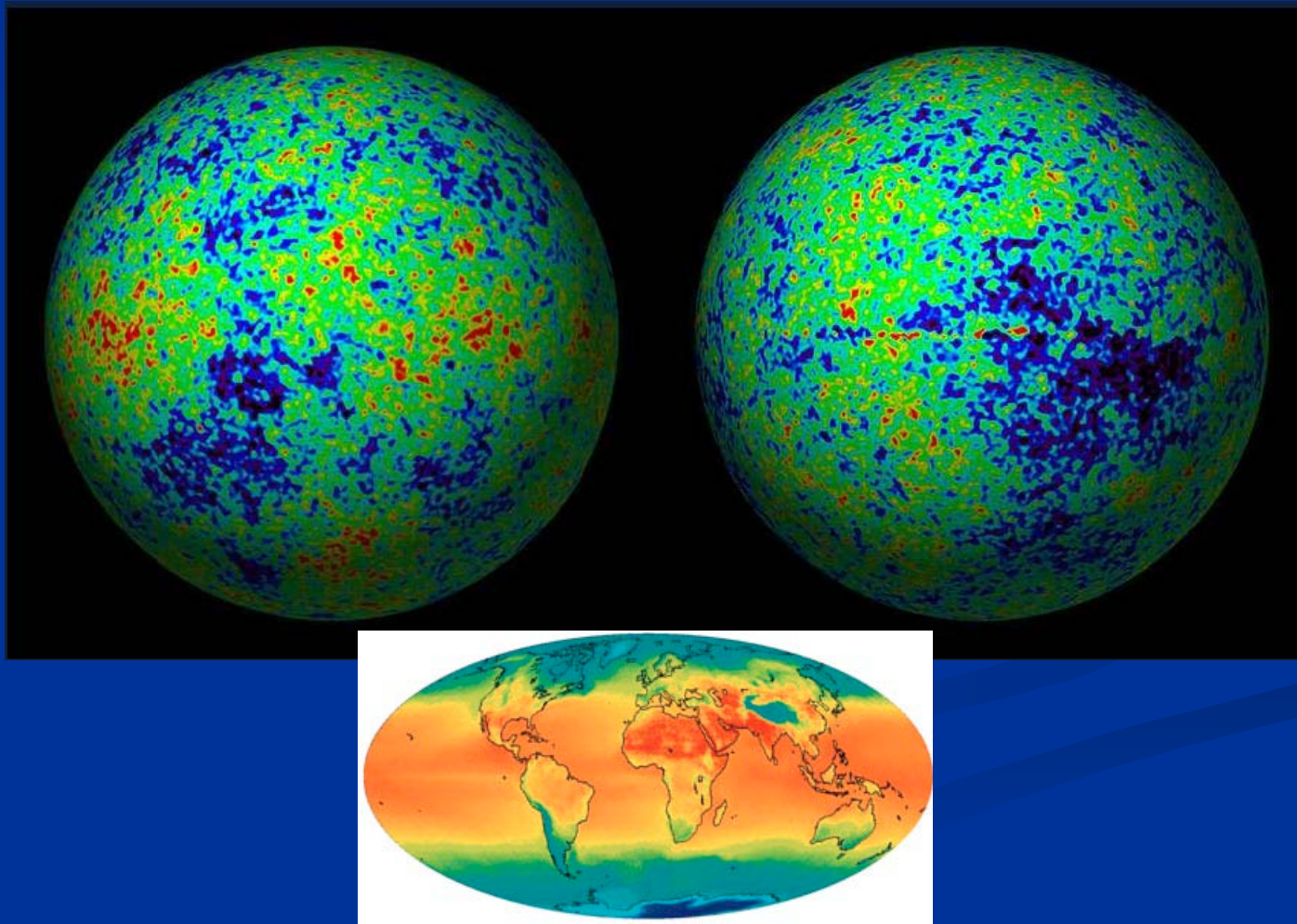
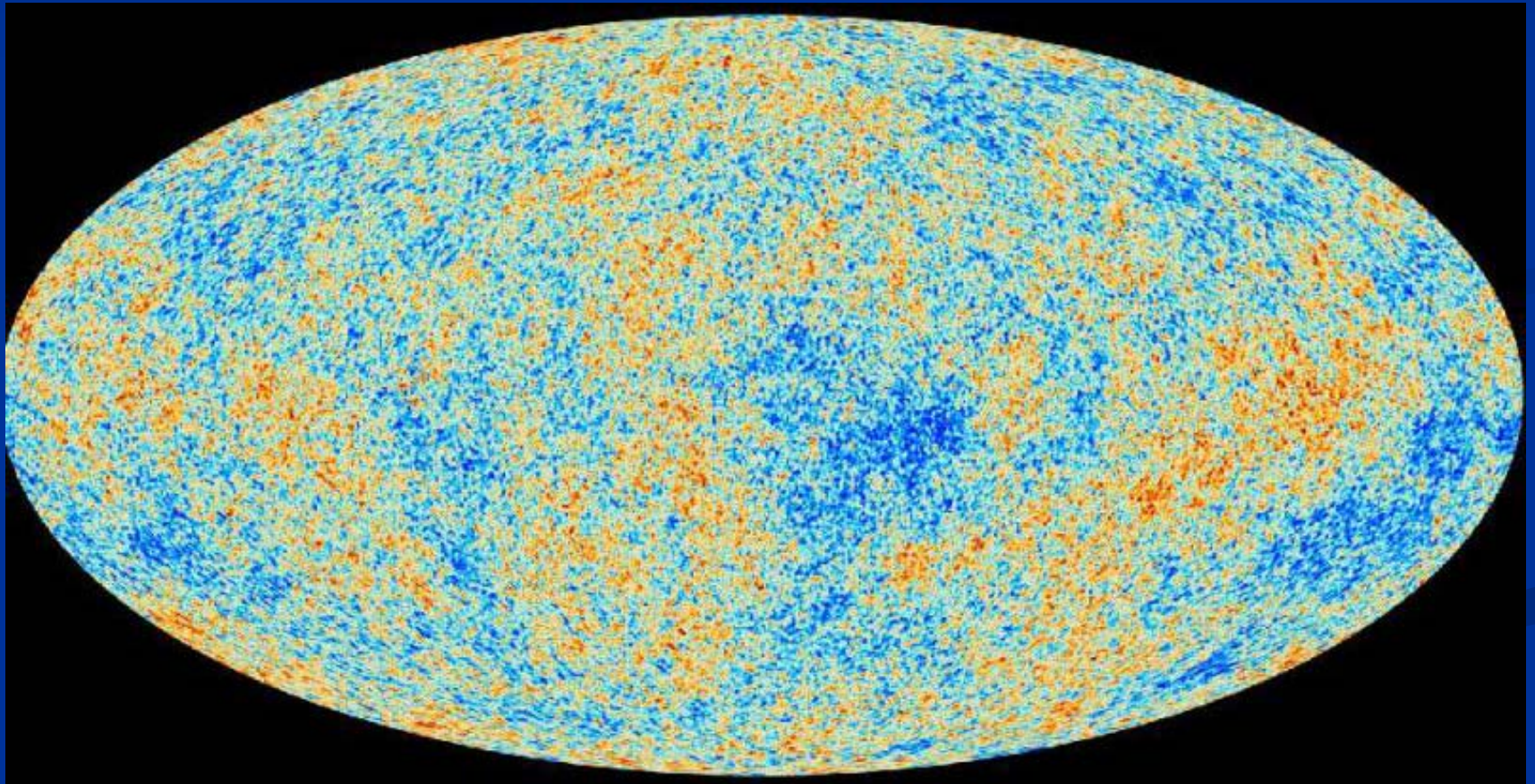


Bild einer Kugeloberfläche von innen winzige Temperatur-schwankungen der Hintergrundstrahlung



(2) Anisotropie der Hintergrundstrahlung: Keime der kosmischen Strukturen



Vermessung des Universums :

Woraus besteht das Universum ?

Energiedichte

- Energiedichte = Energie/Volumen
- Energie = Masse ($E=mc^2$, $c=1$)
- Einheit : kritische Energiedichte
- Symbol für Energiedichte : ρ

Kritische Dichte

- $\rho_c = 3 H^2 M^2$

Kritische Energiedichte des
Universums

(M : reduzierte Planck-Masse , $M^{-2} = 8 \pi G$;

H : Hubble Parameter $H = \dot{a}/a$)

- $\Omega_b = \rho_b / \rho_c$

Anteil der Atome (Baryonen) an der
(kritischen) Energiedichte

Kritische Dichte

Ω_{tot} bestimmt die Geometrie des Universums : kann vermessen werden

$\Omega_{\text{tot}} = 1$ flaches Universum

$\Omega_{\text{tot}} > 1$ Geometrie wie Kugeloberfläche

$\Omega_{\text{tot}} < 1$ hyperbolische Geometrie

Kritische Dichte

$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$

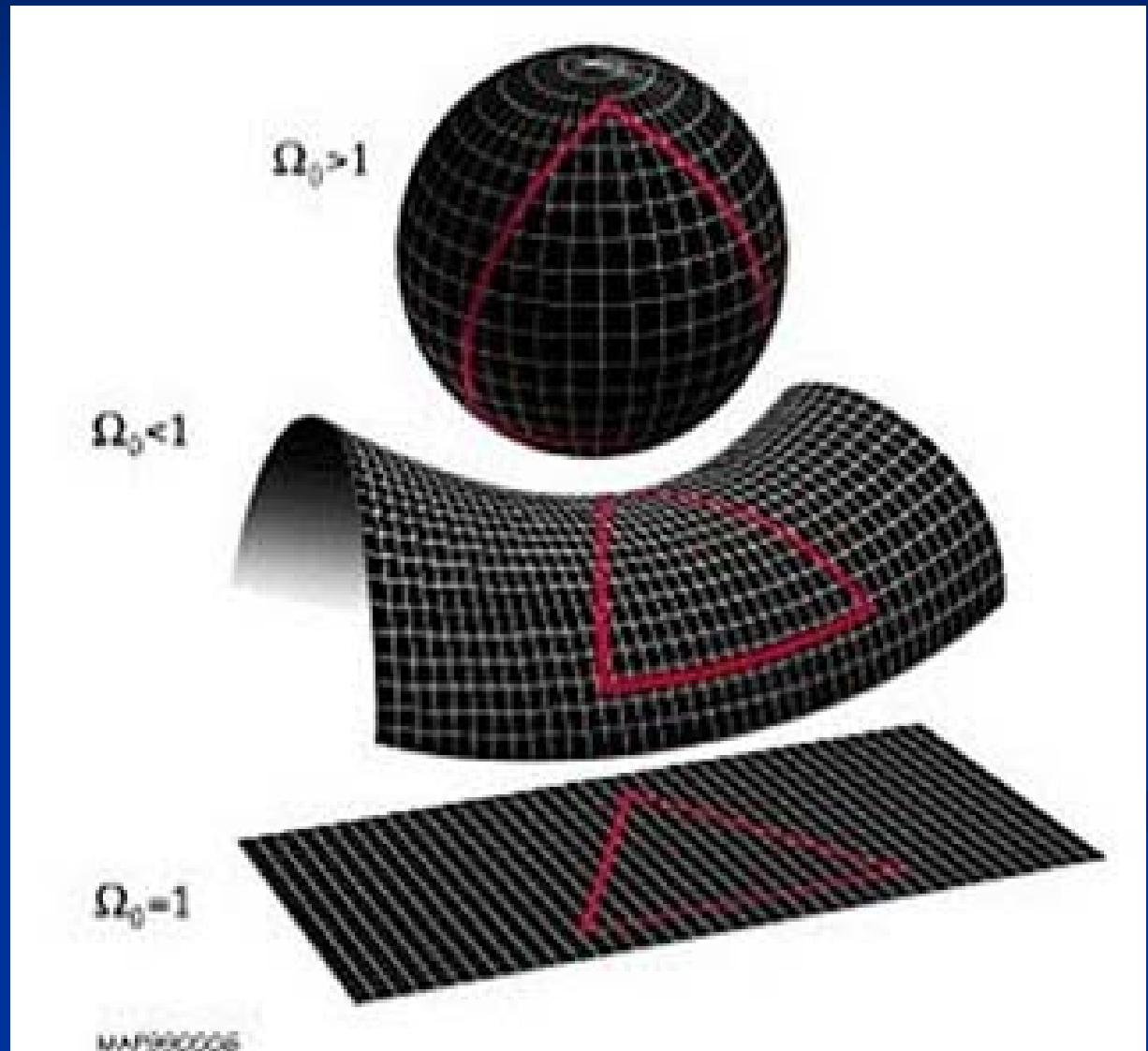
flaches Universum

$$\Omega_{\text{tot}} > 1$$

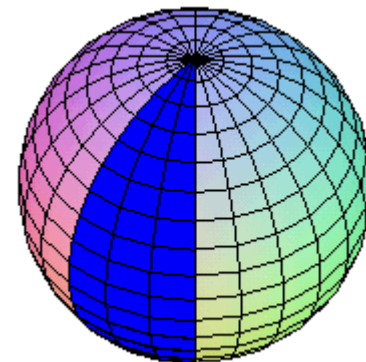
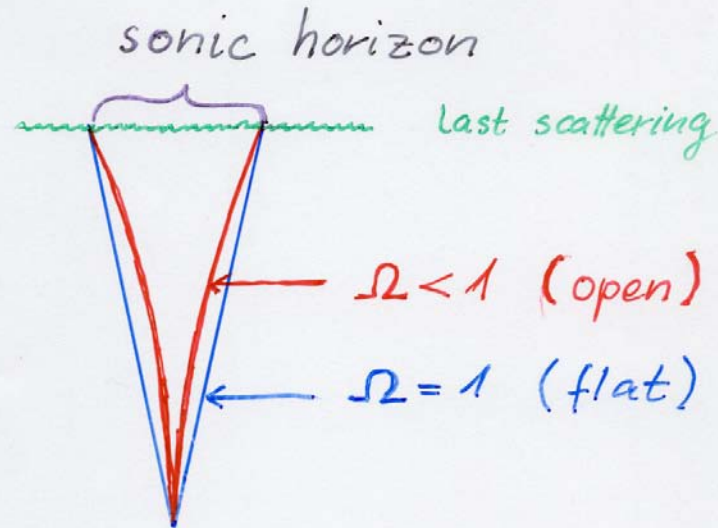
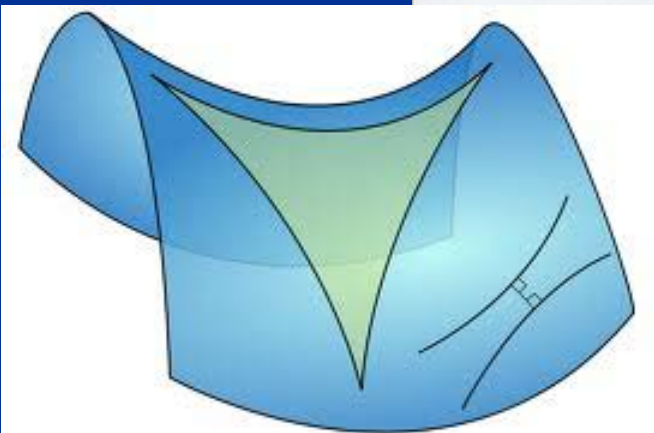
Kugeloberfläche

$$\Omega_{\text{tot}} < 1$$

hyperbolische
Geometrie

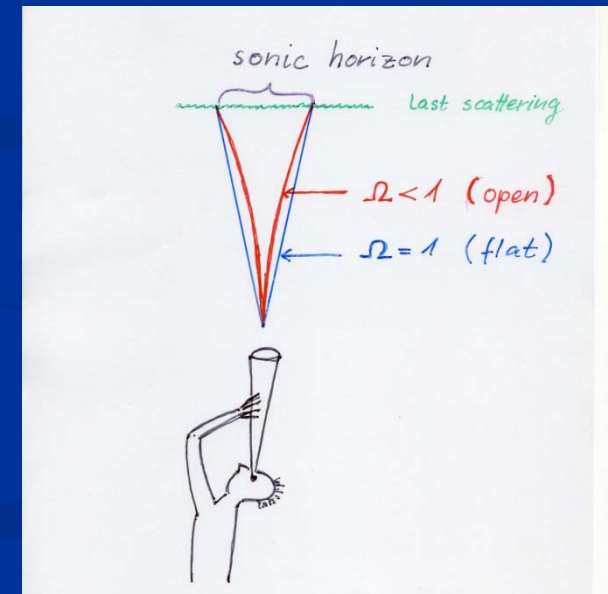


gekrümmte Bahnen der Lichtstrahlen

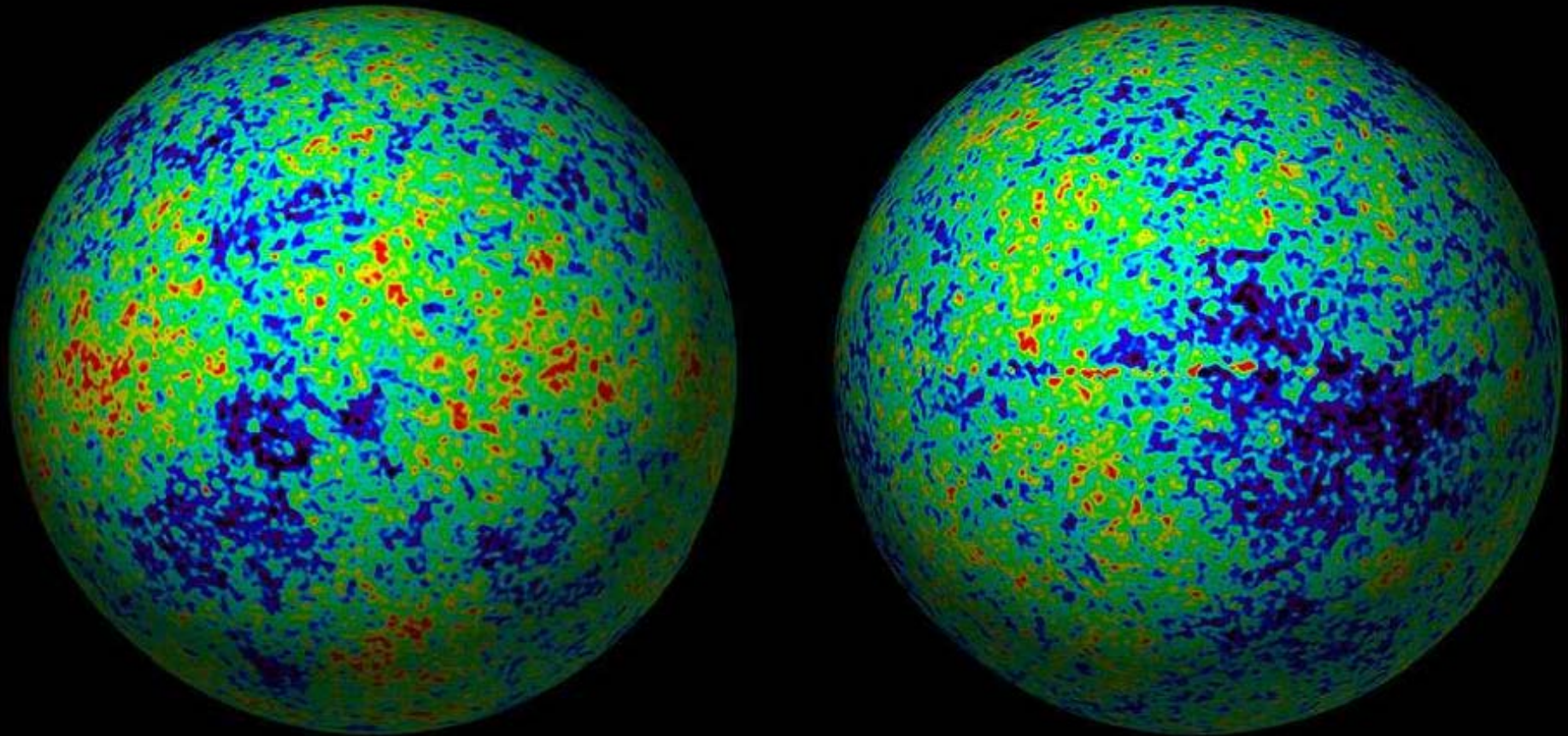


Zur Vermessung der Geometrie: charakteristischer Abstand (Lineal) und Winkel

- Abstand : Größe des Horizonts zum Zeitpunkt der Emission der Hintergrundstrahlung : berechenbar aus Einstein Gleichung
(Horizont : Wie weit Signale sich seit dem Urknall ausbreiten konnten)
- Winkel : aus beobachteten Anisotropien

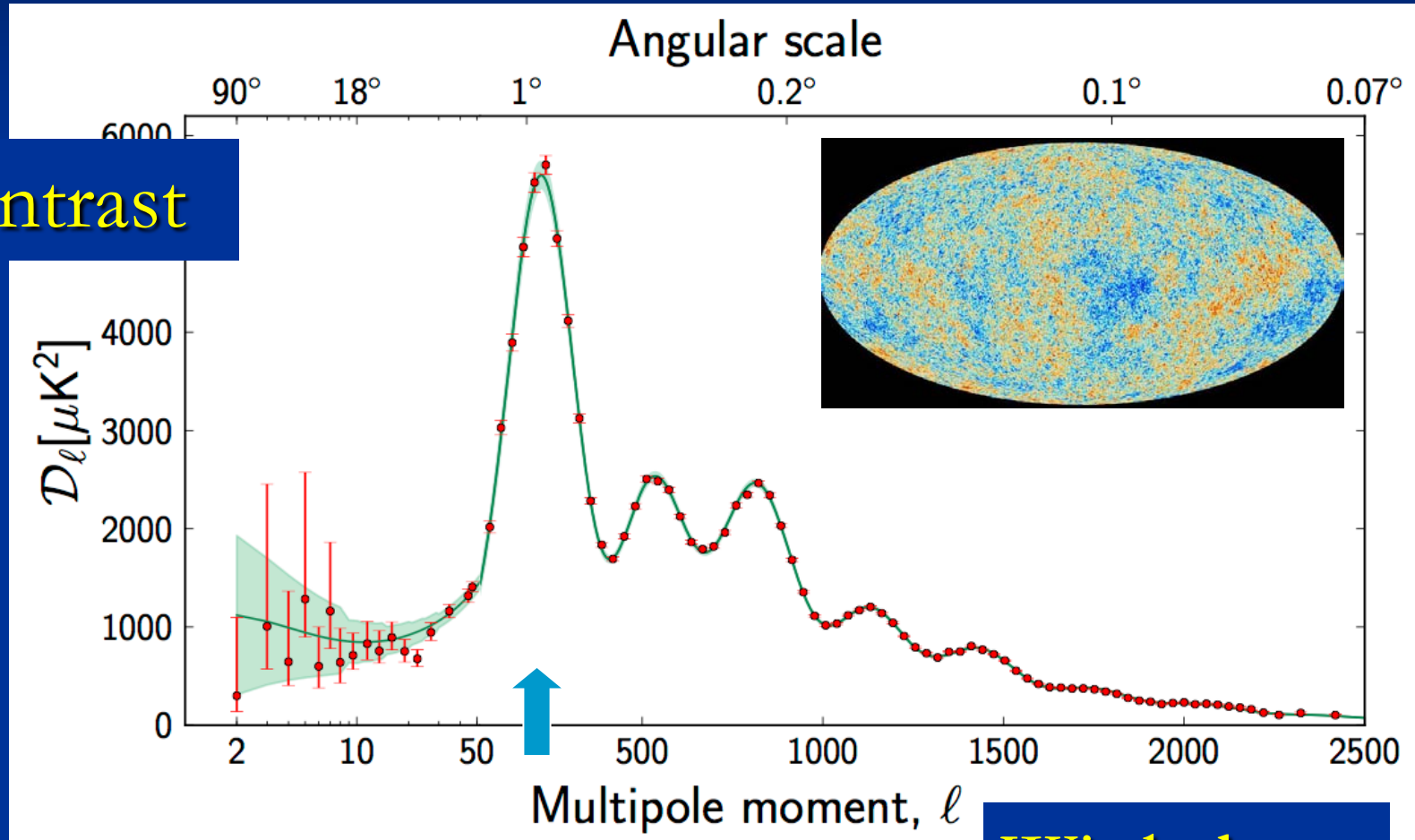


Anisotropie der Hintergrundstrahlung : Fleckengröße



Stärke der Temperaturschwankung in Abhängigkeit von Fleckengröße (im Winkel)

Kontrast



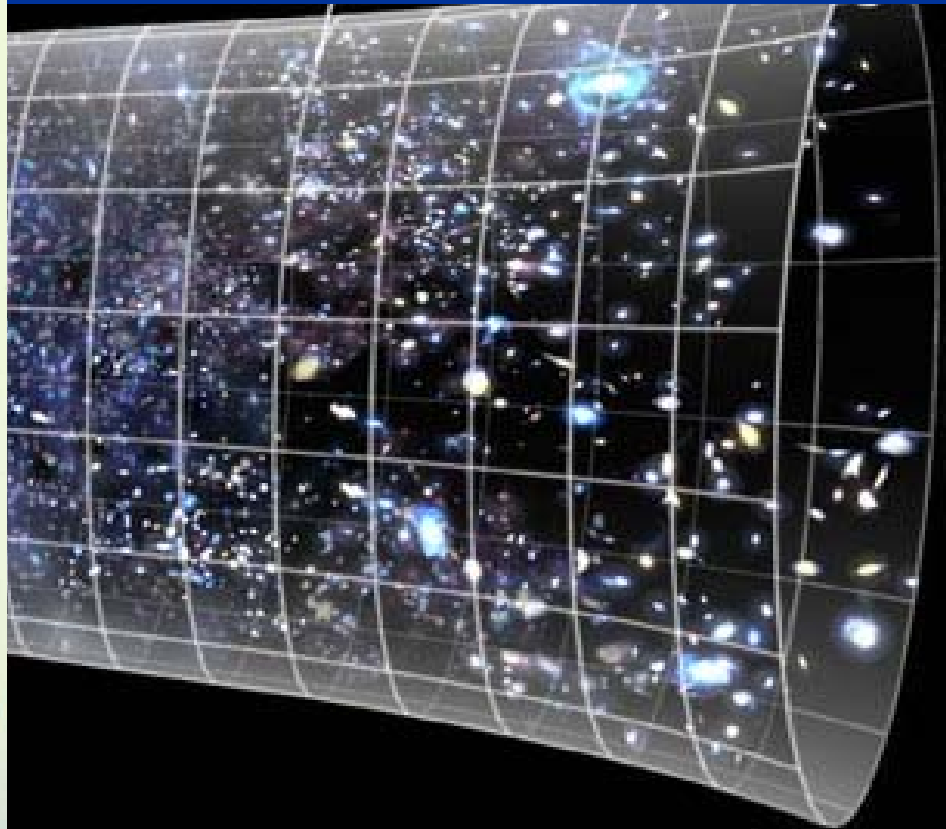
ca 10 Grad

ca 1 Grad

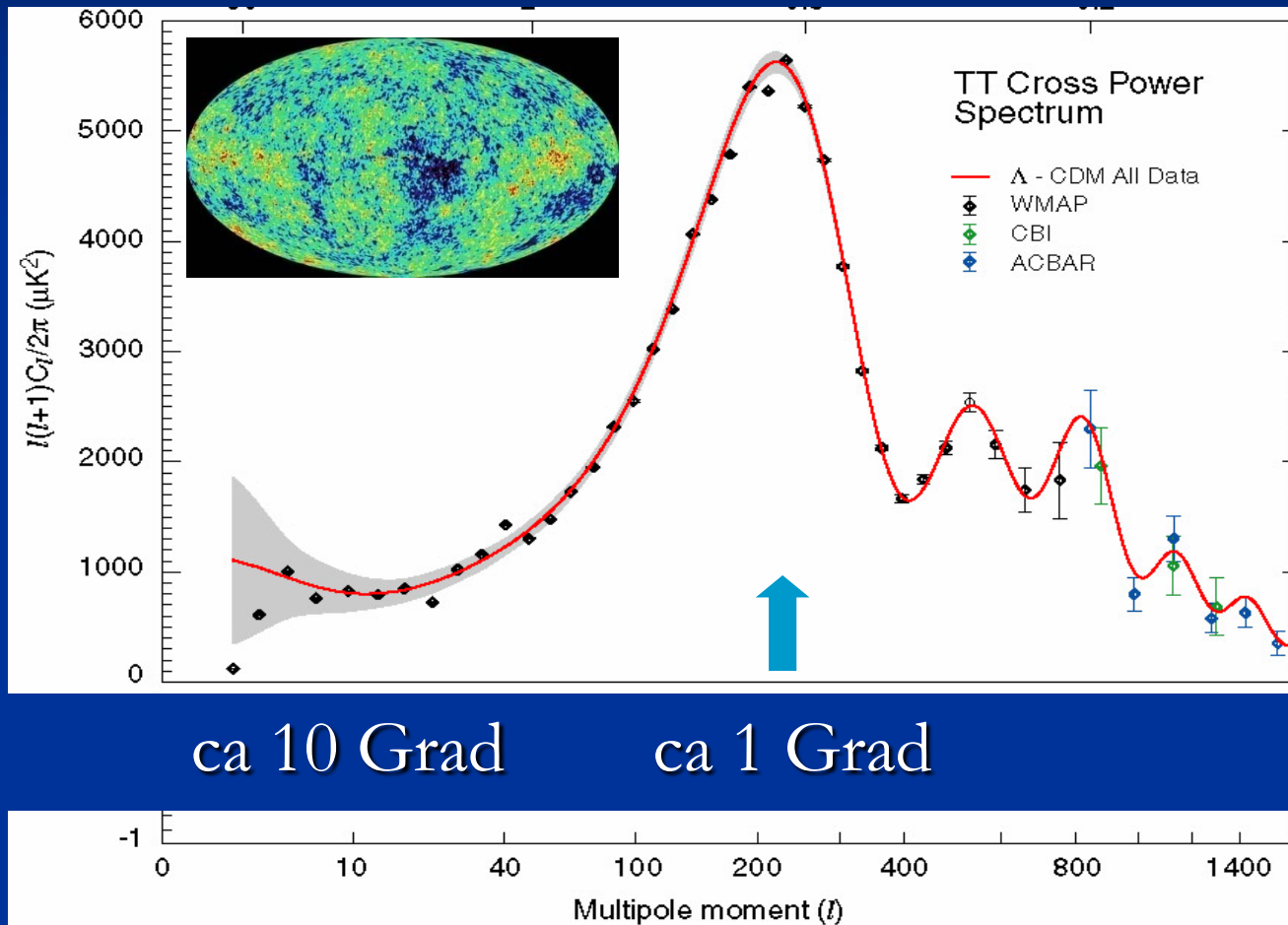
Winkel

Schallwellen im frühen Universum

Länge
berechen-
bar



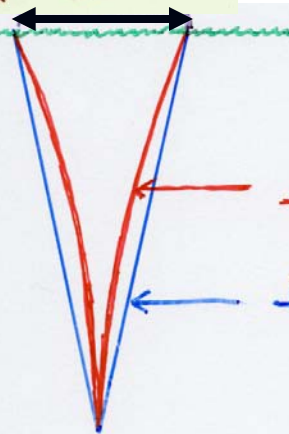
Schallwellen im Plasma



$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$



last scattering



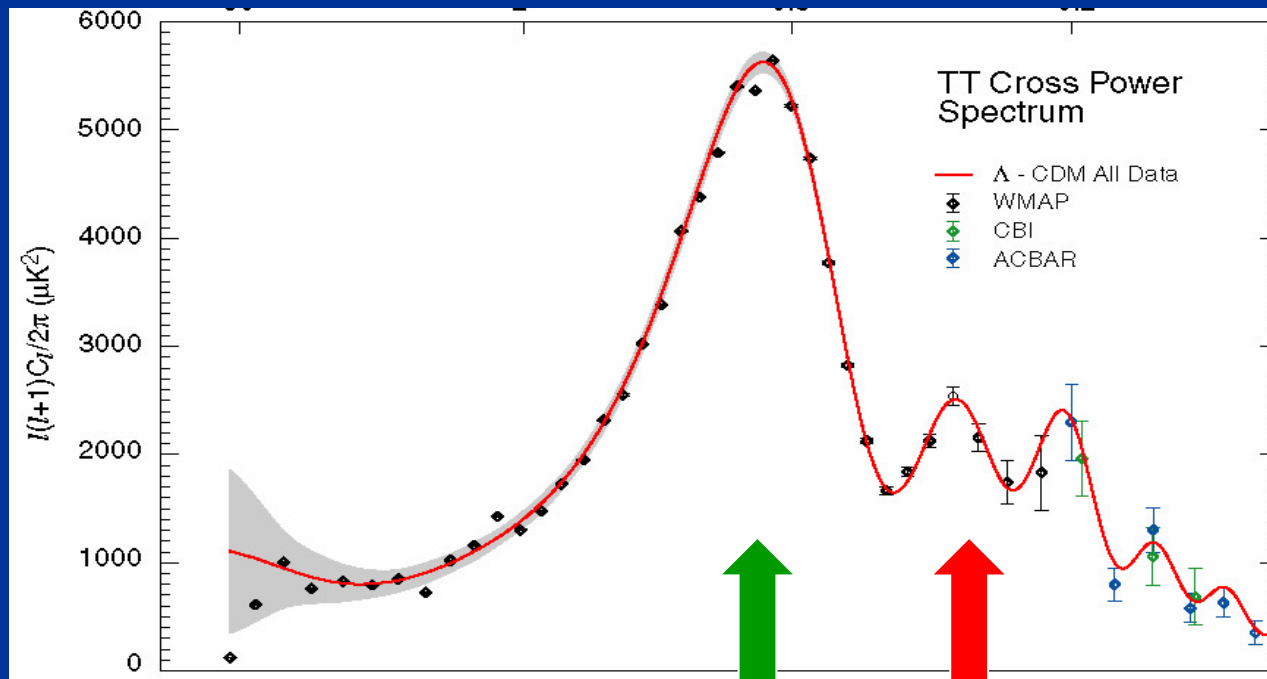
$\Omega < 1$ (open)

$\Omega = 1$ (flat)



Räumlich flaches Universum

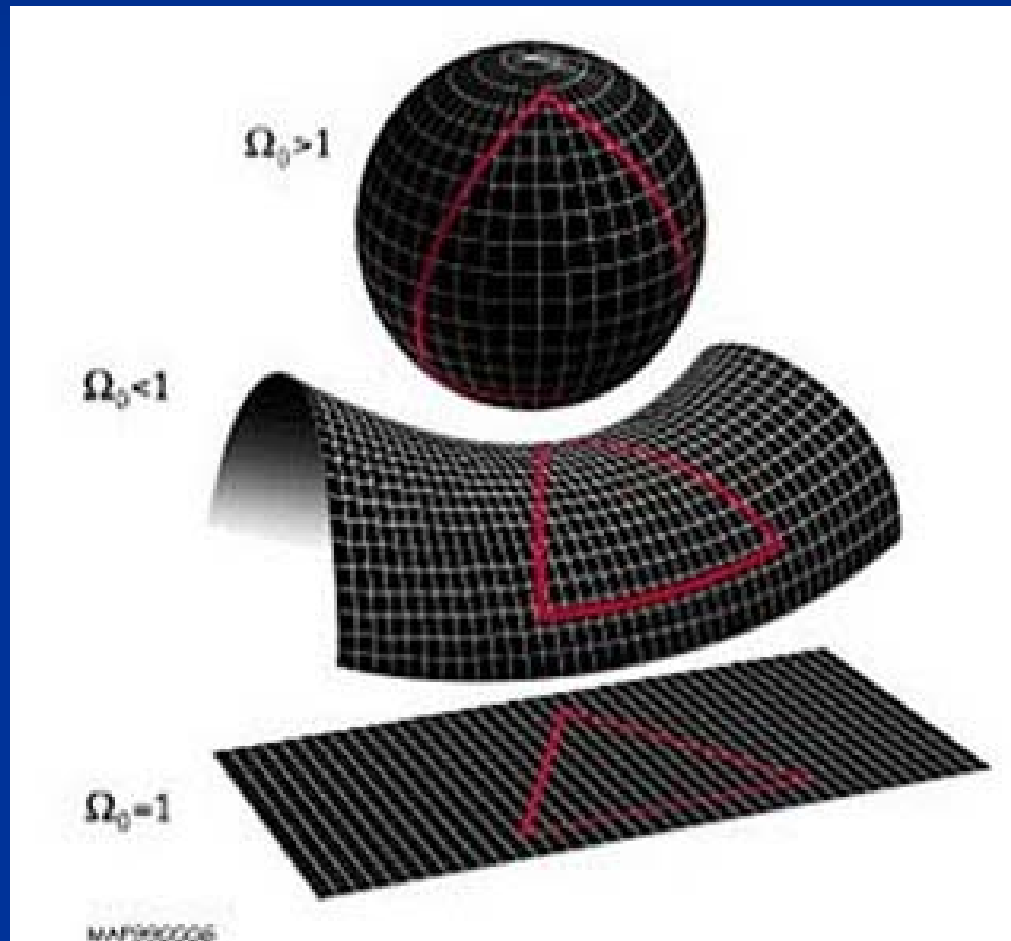
$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$



$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$

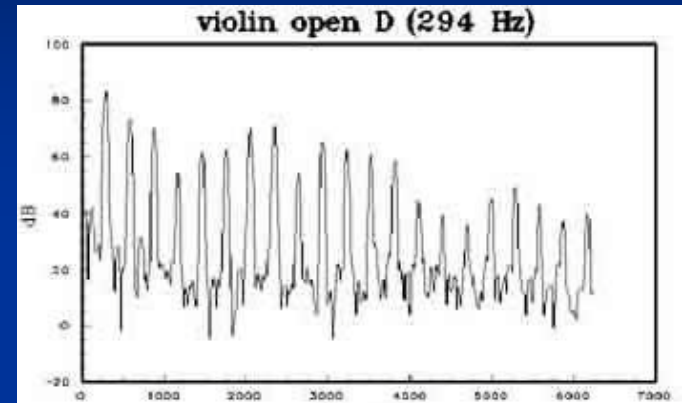
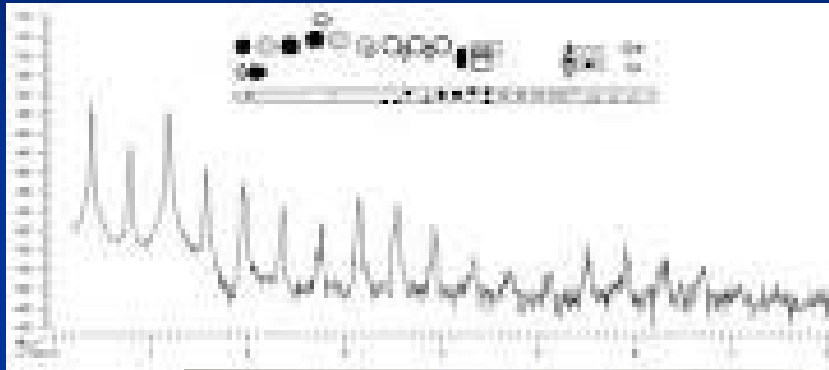
$$\Omega_{\text{tot}} = 0.25$$

(3) Vermessung des Universums: Räumliche Geometrie ist nicht gekrümmt.

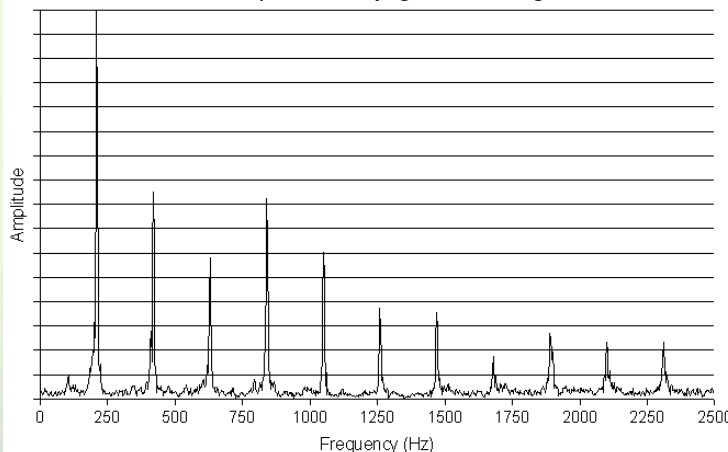


Zusammensetzung des Universums

Frequenzpektrum der Musikinstrumente



Cello Spectrum - Playing G# on D String



*gibt Details über
Eigenschaften des
Instruments*



Winkelspektrum der Hintergrundstrahlung

*gibt Details über Eigenschaften
des Universums*

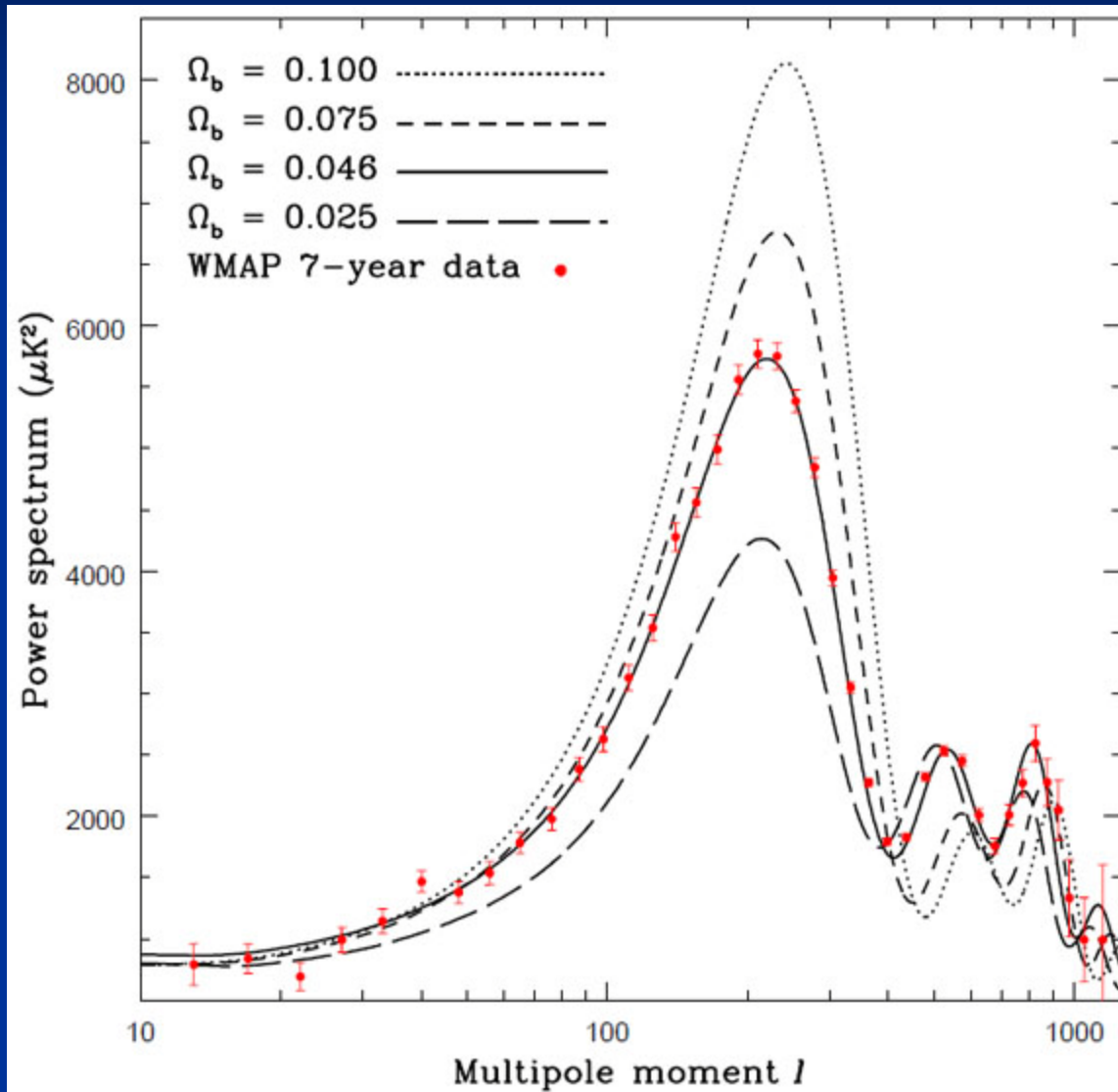
Zusammensetzung des Universums

Atome : 5 %

Dunkle Materie : 25 %

Dunkle Energie : 70 %

Anteil Atome



Bestimmung kosmologischer Parameter (Planck)

$$\Omega_{\text{tot}} = 0.999 \pm 0.006$$

Materie :

$$\Omega_{\text{m}} = 0.31 \pm 0.01$$

Atome :

$$\Omega_{\text{b}} = 0.048 \pm 0.005$$

Dunkle Materie :

$$\Omega_{\text{dm}} = 0.26 \pm 0.01$$

Dunkle Energie :

$$\Omega_{\text{de}} = 0.69 \pm 0.01$$

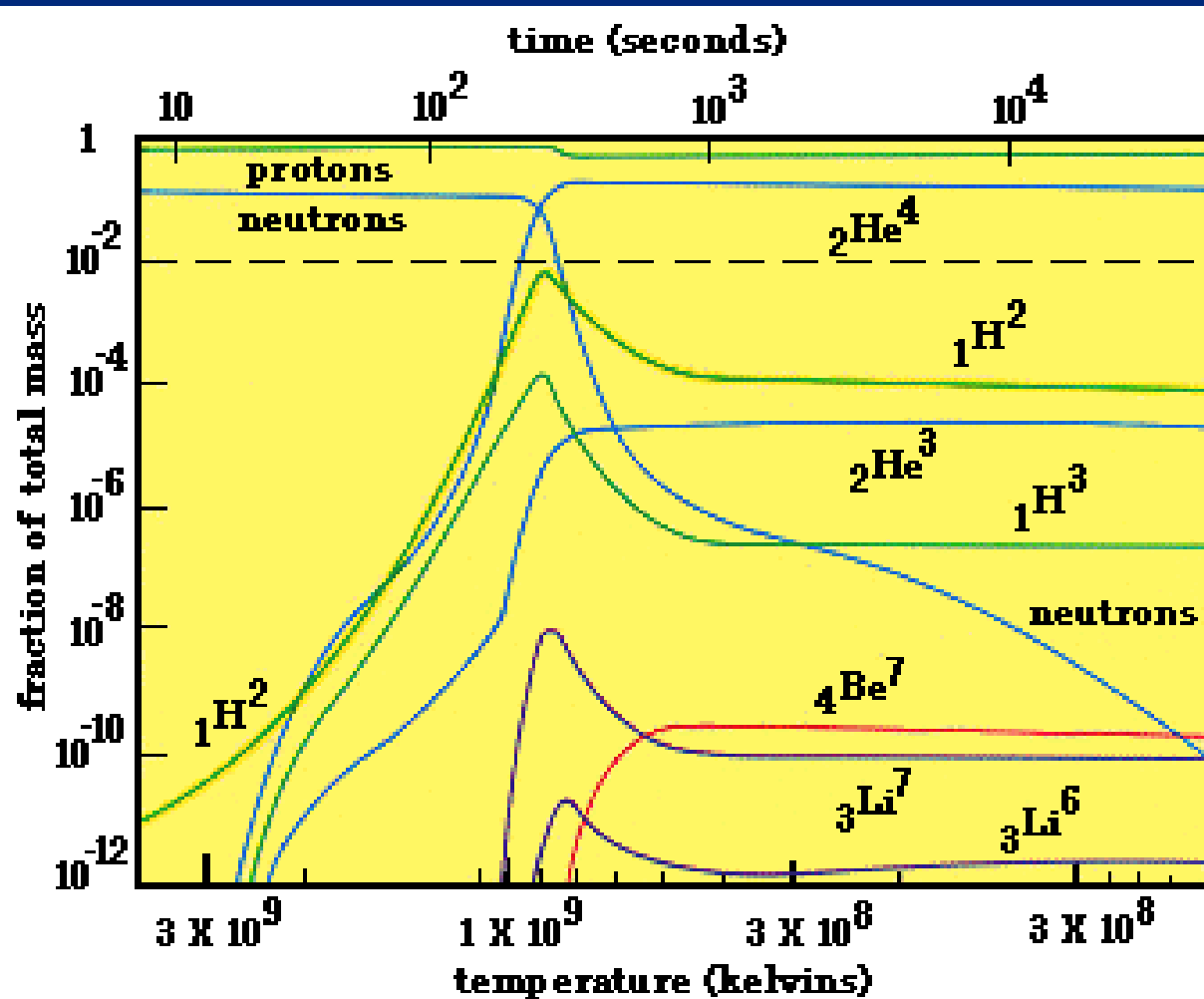
$$\text{Alter} = 13.80 \pm 0.05$$

Milliarden Jahre

Nukleosynthese

- Eine Sekunde nach dem Urknall war das Universum so heiß, dass keine Atomkerne existieren konnten.
 - nur Protonen , Neutronen
 - bei Abkühlung : Entstehung der leichten Atomkerne
 - Beginn der Chemie
-
- Chemie stimmt, wenn Atome 5% der kritischen Energiedichte des Universums ausmachen.

Nukleosynthese



Signale des Urknalls

■ Hintergrundstrahlung

Es werde Licht !

(Fiat lux)

(400 000 Jahre abb)

■ Primordiale Elementsynthese (Nukleosynthese)

Beginn der Chemie

(10 Minuten abb)

Übereinstimmung !

Nur 5% des Universums bestehen aus Atomen :

bekannt von

Hintergrundstrahlung

400 000 Jahre abb
Atomphysik

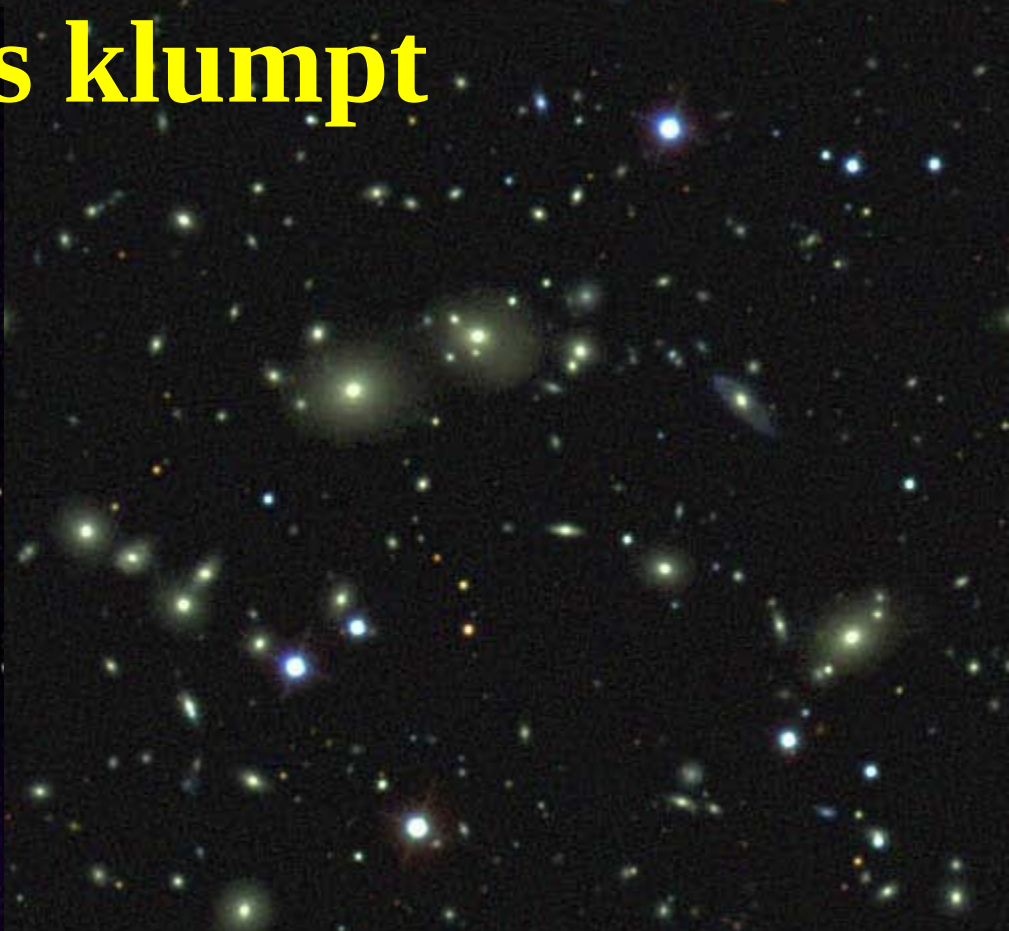
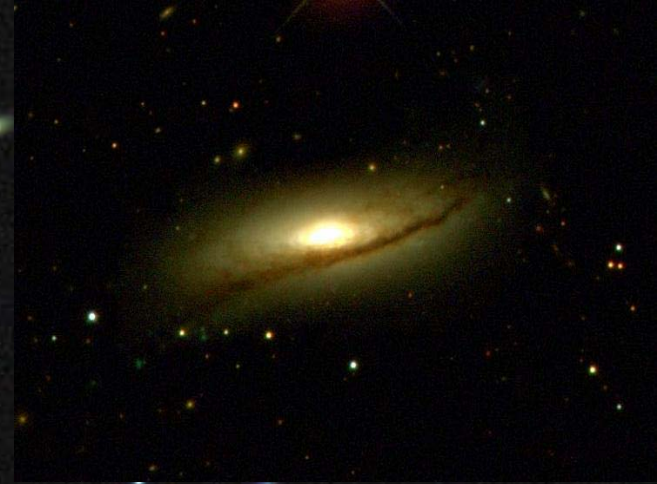
Nukleosynthese

10 Minuten abb
Kernphysik



Materie :

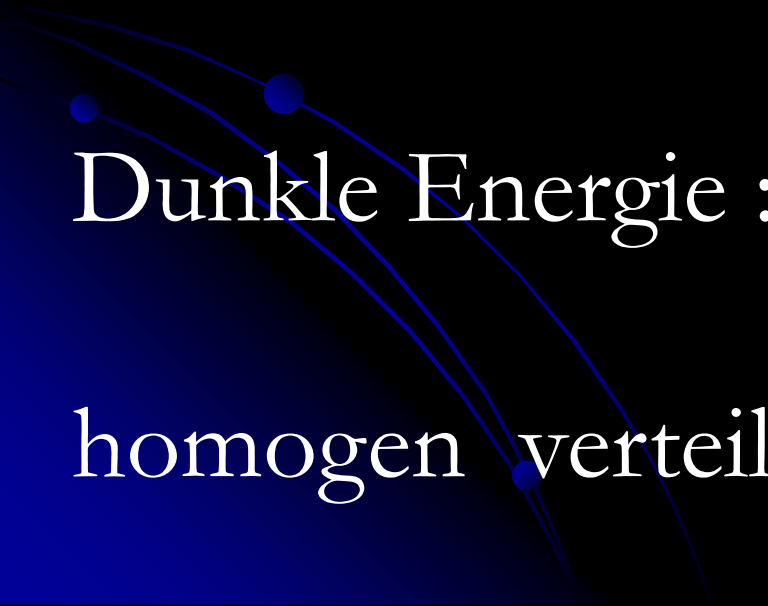
Alles , was klumpt



Dunkle Materie

- Anteil der “Materie” insgesamt : 30 %
- Die meiste Materie ist dunkel !
- Bisher nur durch Gravitation spürbar
- Alles was klumpt!  Gravitationspotential

(4) Das Universum besteht zu 70% aus Dunkler Energie

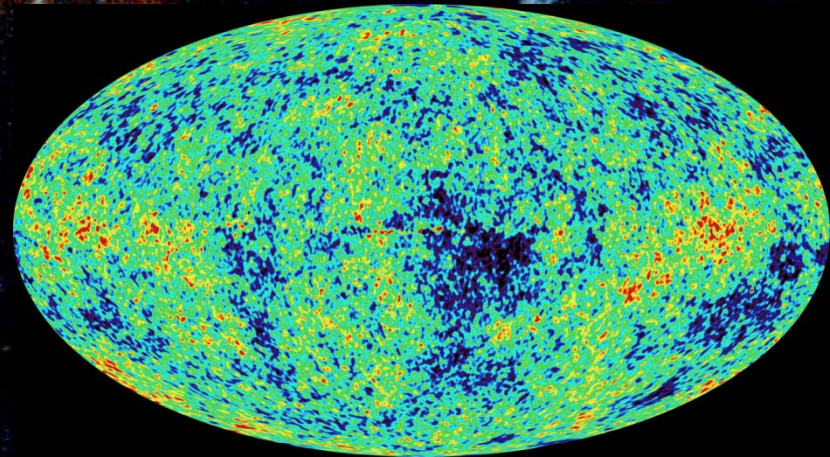


Dunkle Energie :

homogen verteilt

Dunkle Energie – ein kosmisches Rätsel

C.Wetterich, Mainz 13.5.

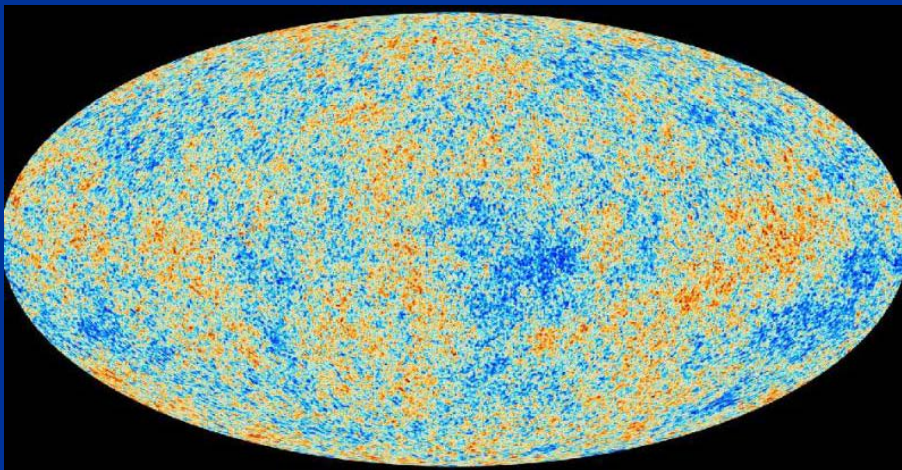
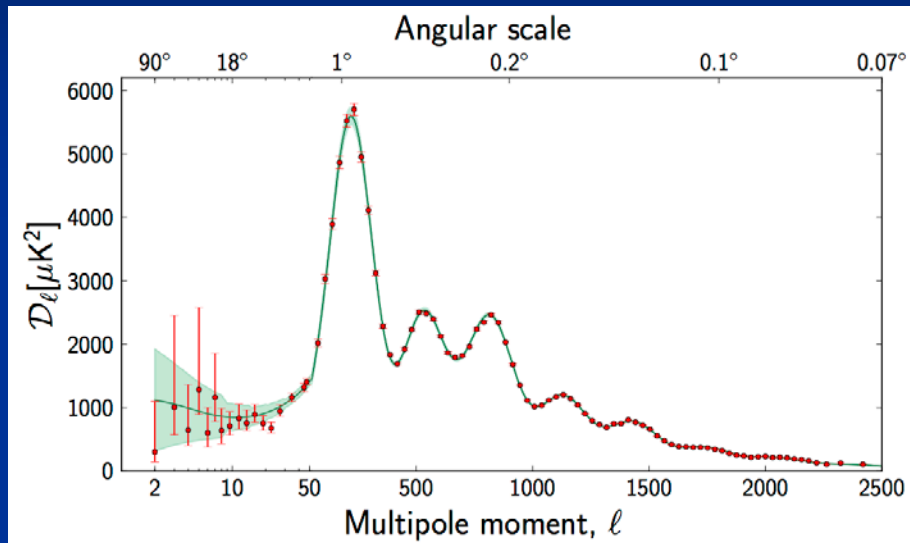


Statistische Verteilung von
Fluktuationen :
viele unabhängige Messungen

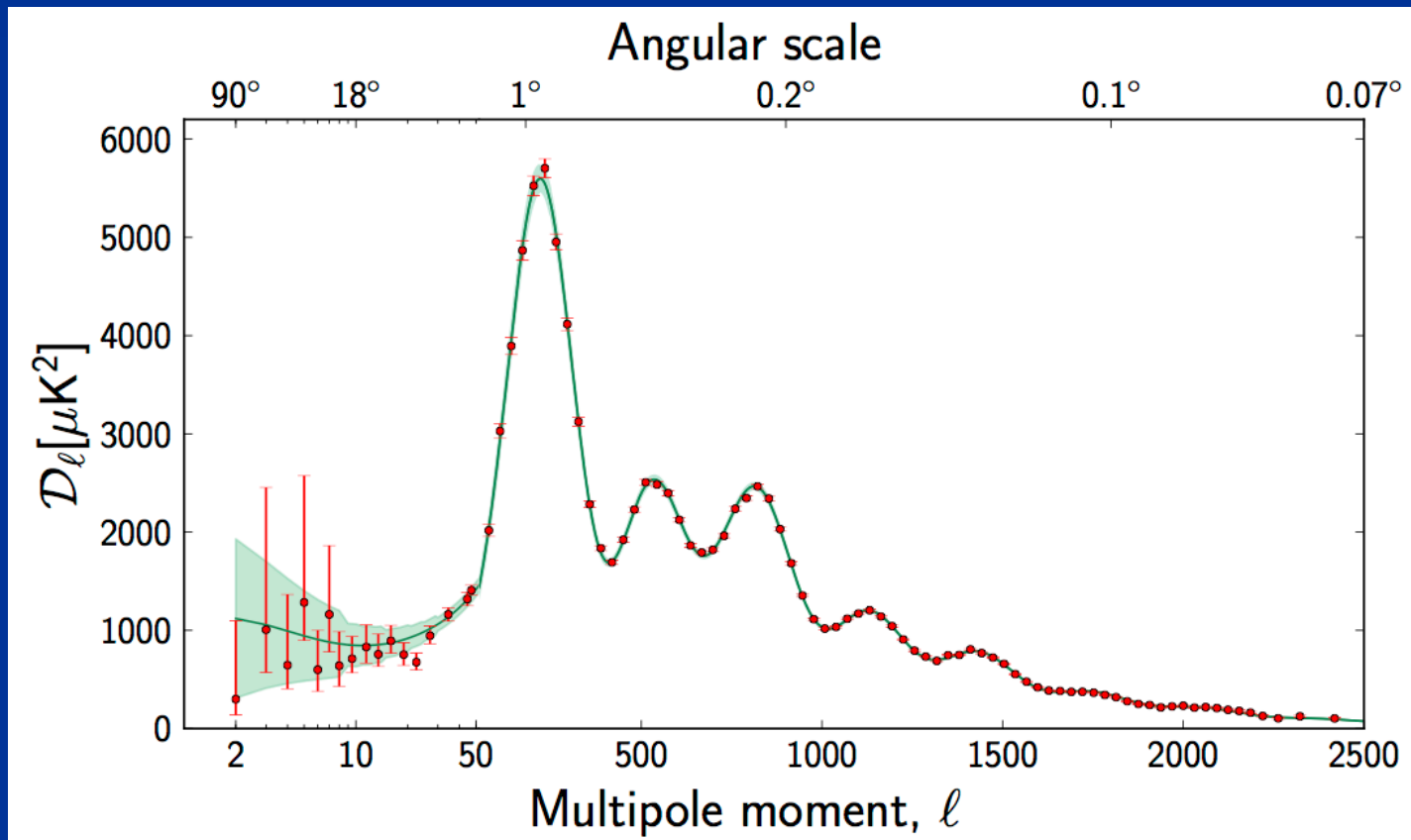


Präzisions - Kosmologie

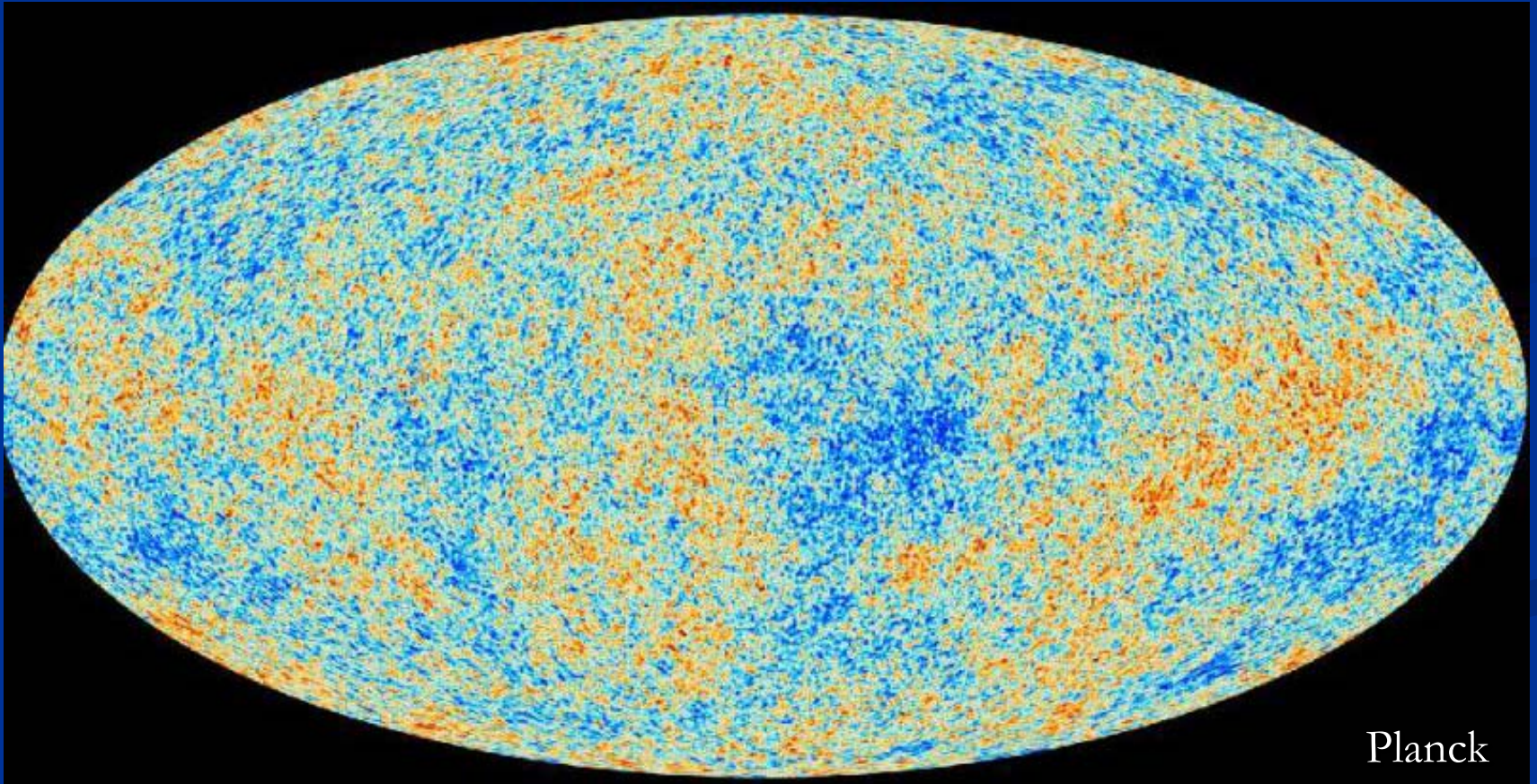
Korrelations-Funktion



(5) „Probabilistisches Universum“ erlaubt Präzisions-Kosmologie



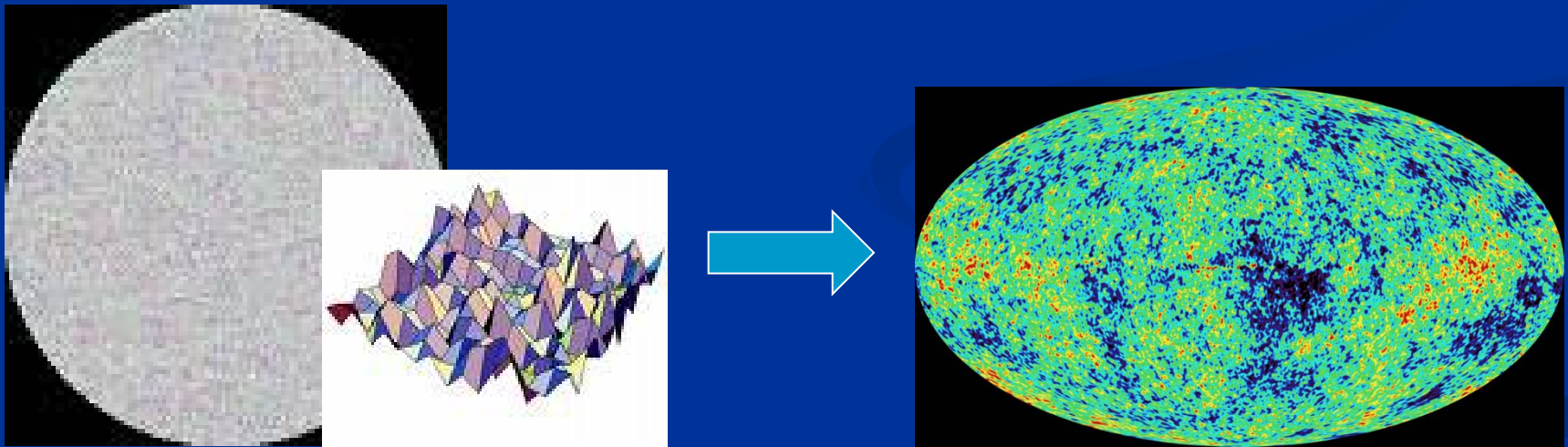
Woher kommen die Temperatur - Fluktuationen ?



Planck

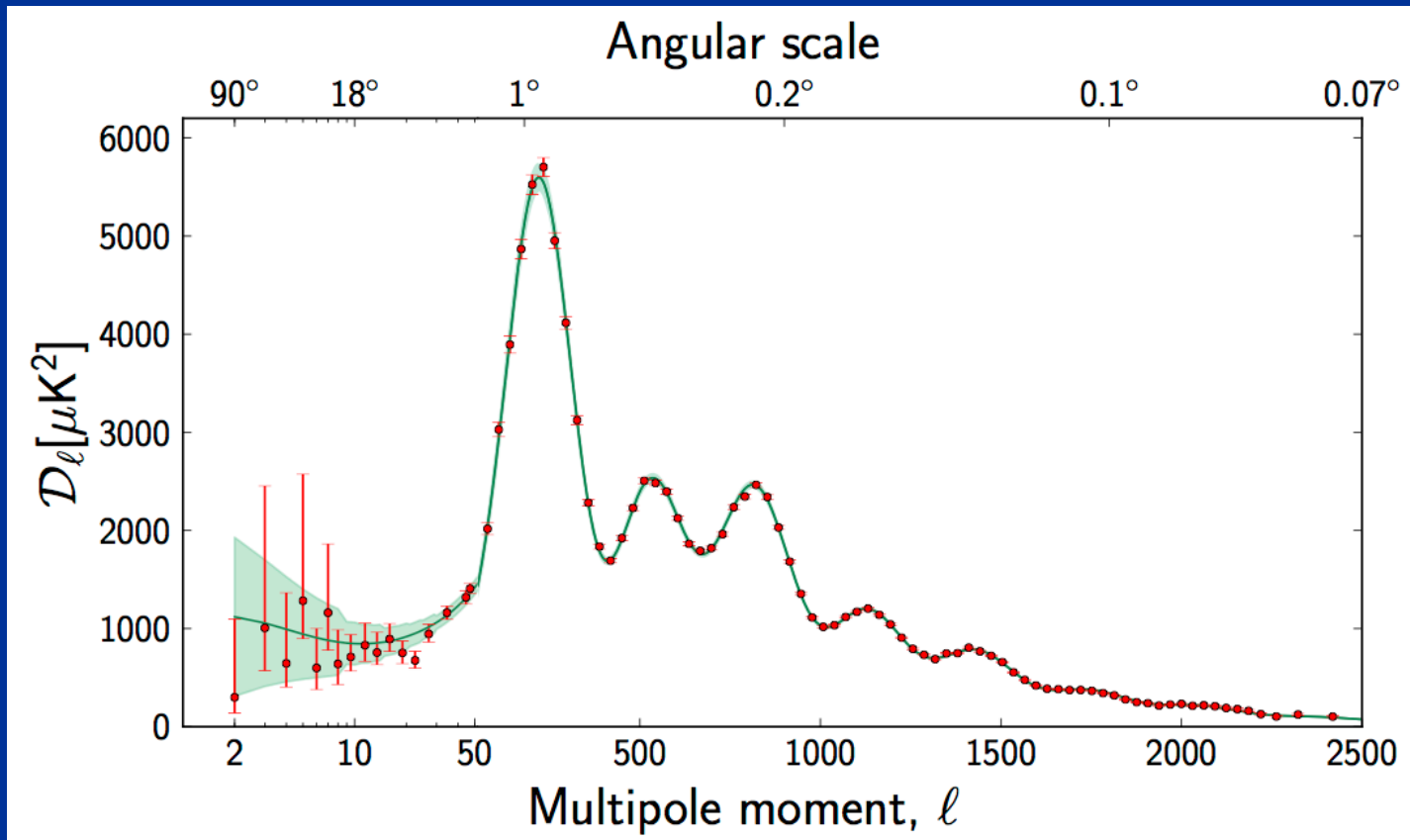
Inflationäres Universum

- Ca 10^{-30} - 10^{-40} Sekunden abb
- Entstehung der primordialen Fluktuationen aus Quantenfluktuationen



Signale vom Urknall !

Quantenfluktuationen in der Anfangsphase des Universums werden heute beobachtbar !



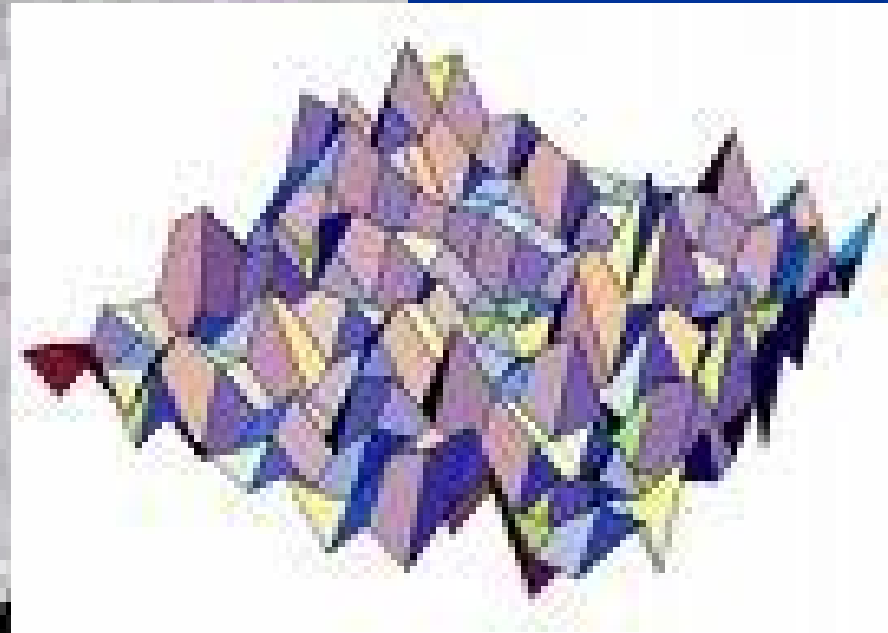
Vorhersagen der Inflation

- Universum hat kritische Dichte ☺
- Quantenfluktuationen aus der Zeit der Inflation werden zu “Schallwellen“ zum Zeitpunkt der Entstehung der kosmischen Hintergrundstrahlung ☺
- Primordiale Gravitationswellen : vielleicht gefunden ! (BICEP)

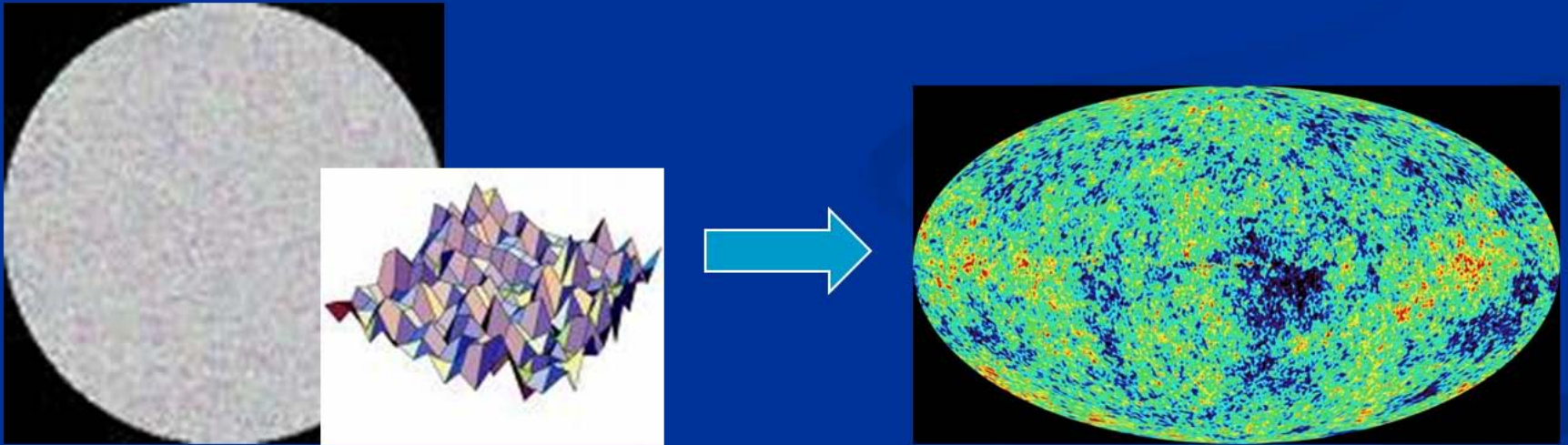
Der Urknall

**Wie unser Universum aus fast
nichts entstand**

C. Wetterich,
Mainz, 24.6.

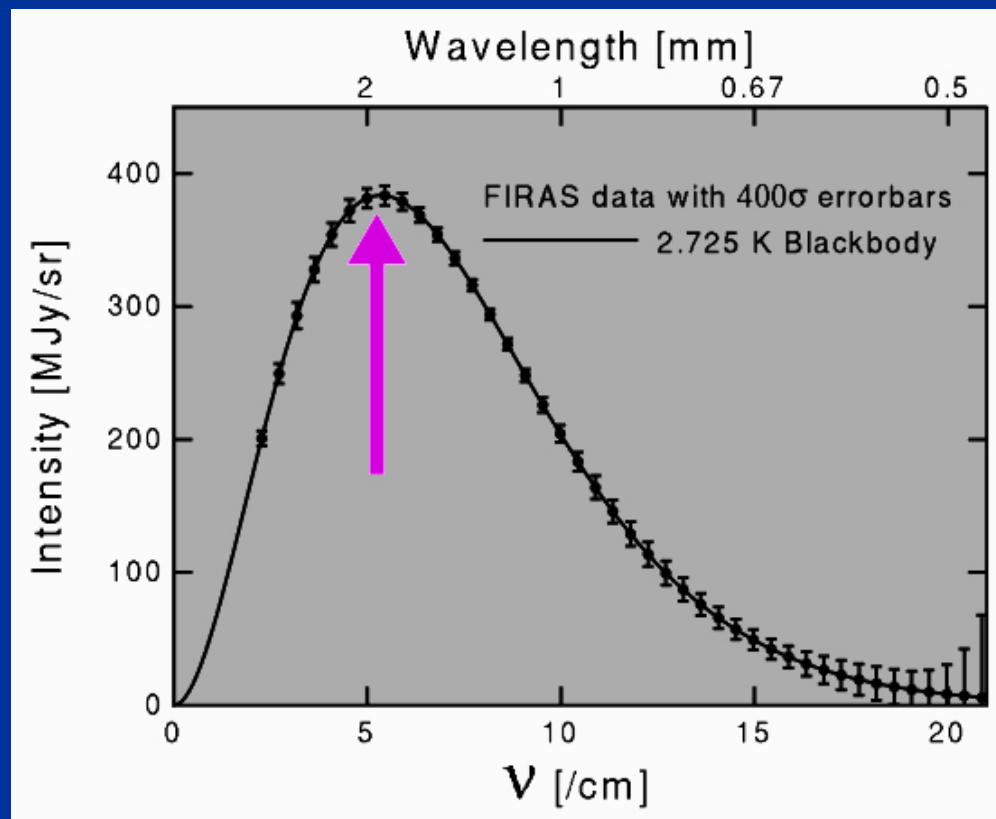


**(6) Beobachtung der Anisotropien der
kosmischen Hintergrundstrahlung
testen Modelle der inflationären
Kosmologie unmittelbar am Urknall**

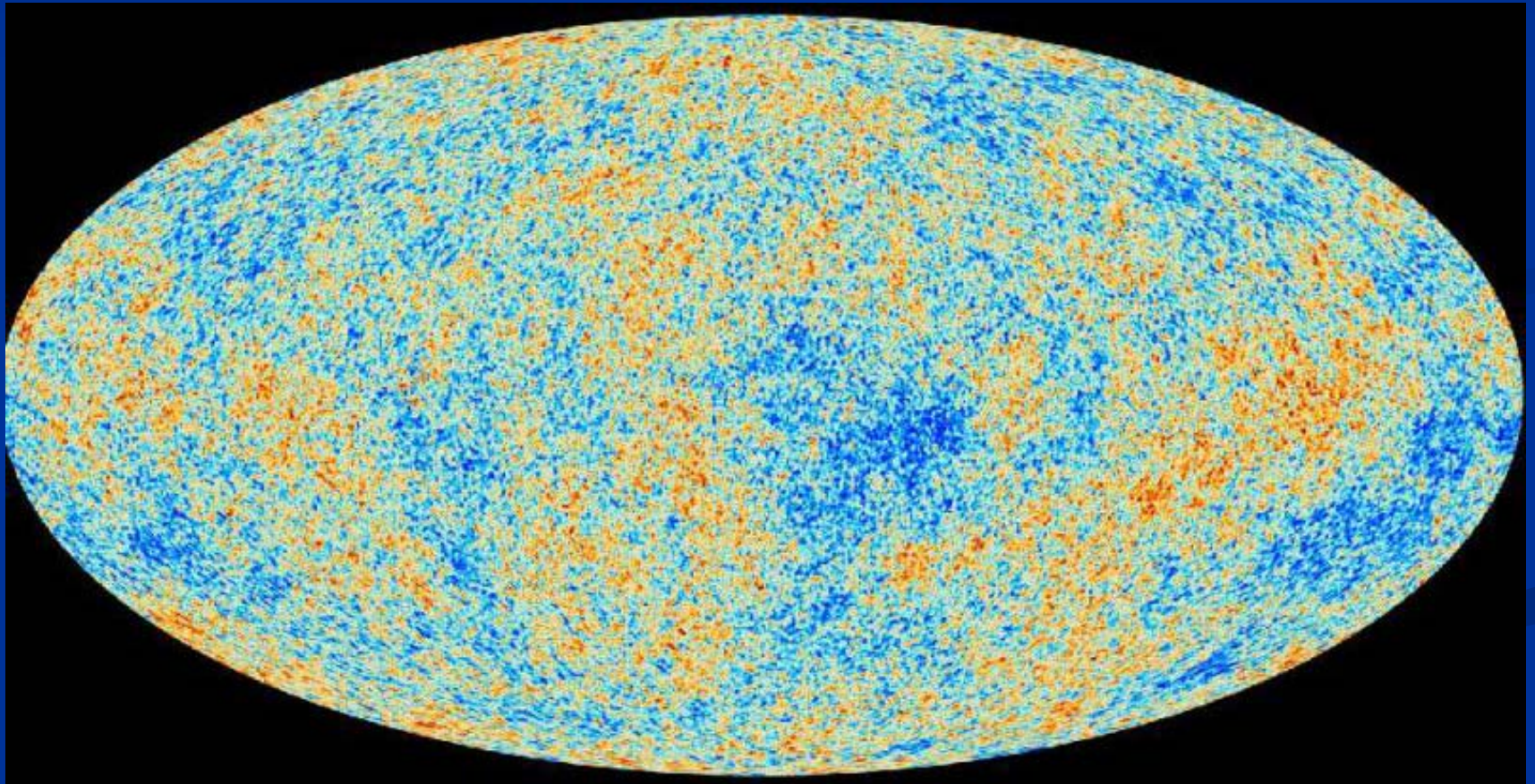


Zusammenfassung

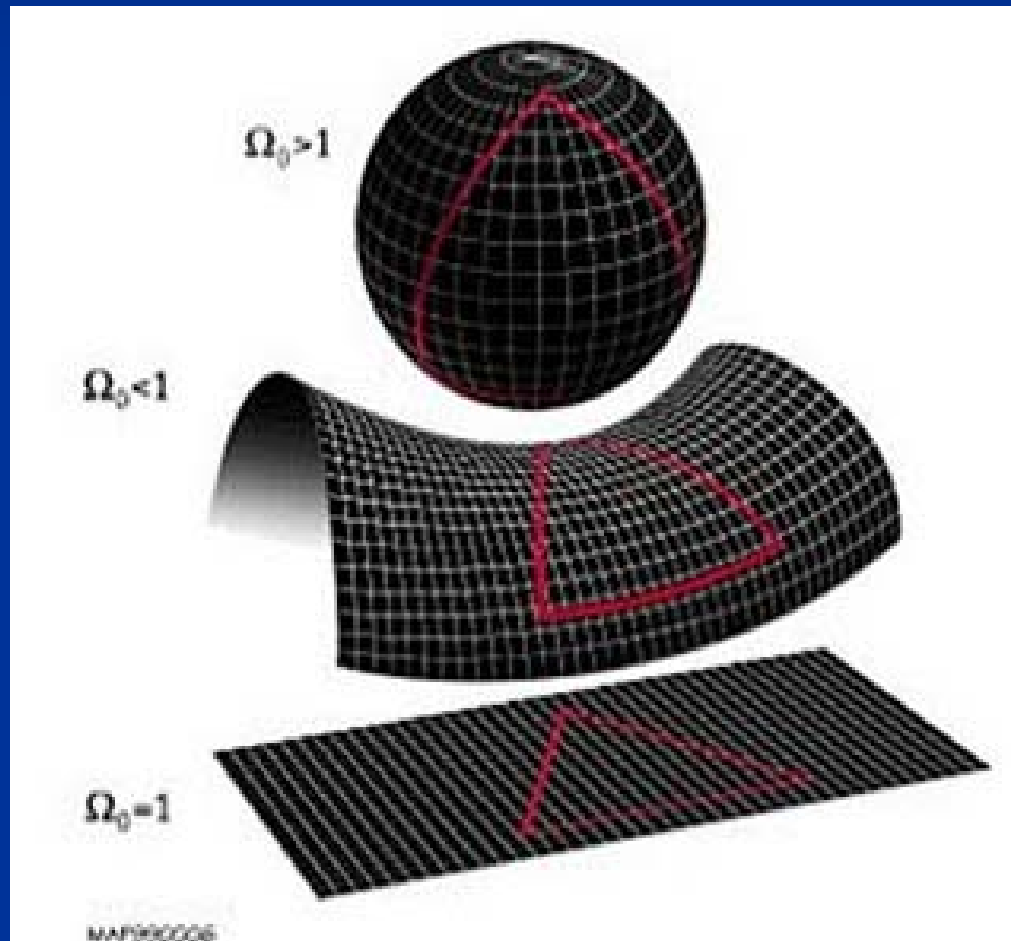
(1) Kosmische Hintergrundstrahlung bestätigt Urknall- Theorie: Plasma im frühen Universum



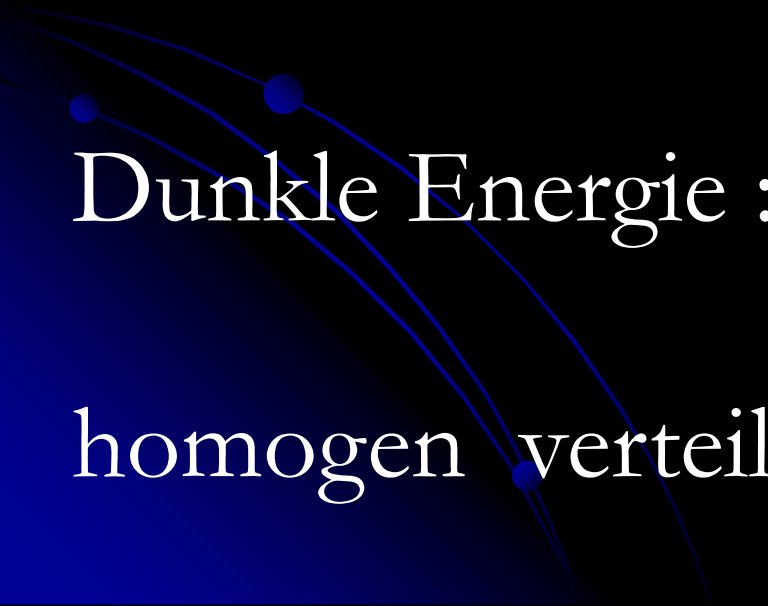
(2) Anisotropie der Hintergrundstrahlung: Keime der kosmischen Strukturen



(3) Vermessung des Universums: Räumliche Geometrie ist nicht gekrümmt.



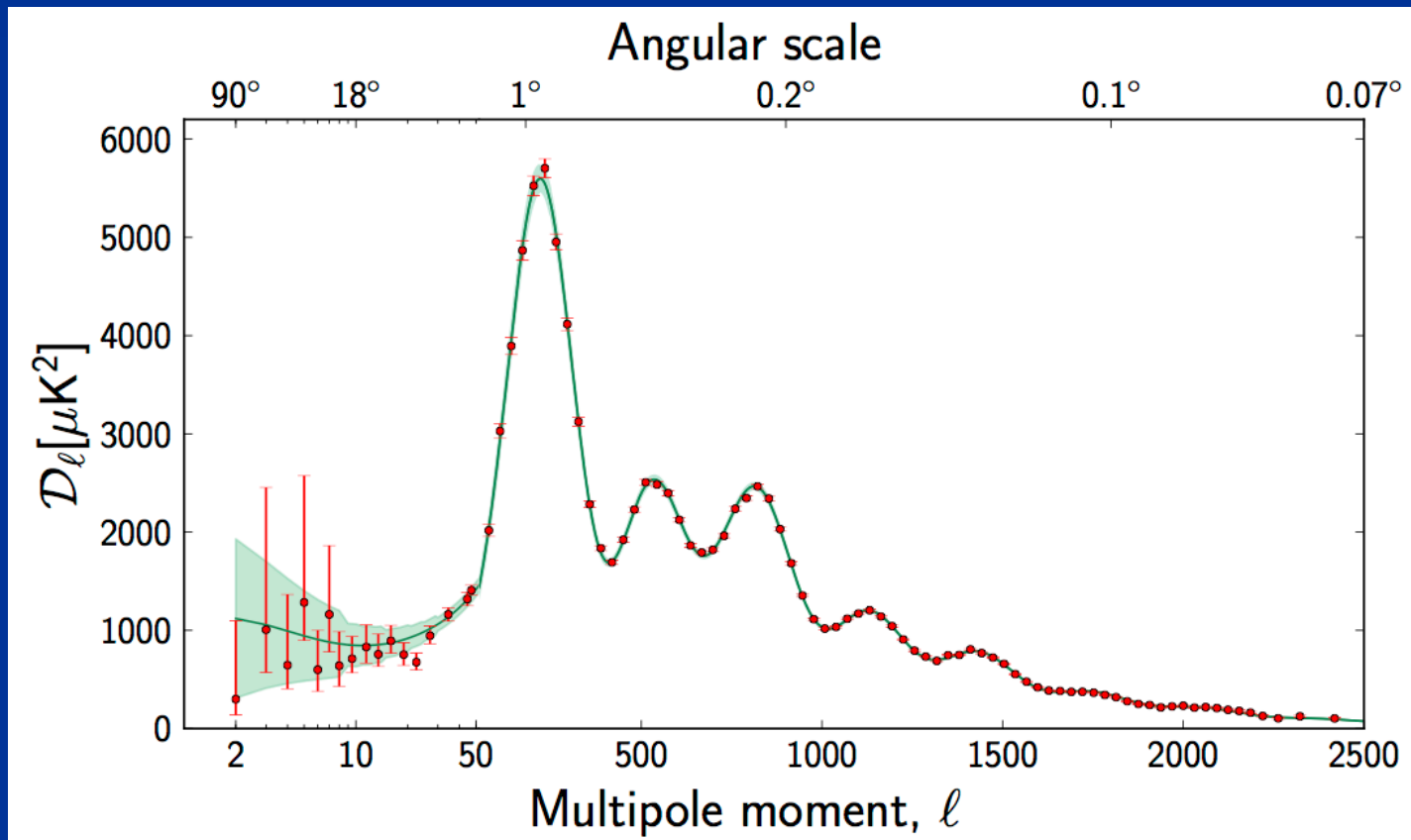
(4) Das Universum besteht zu 70% aus Dunkler Energie



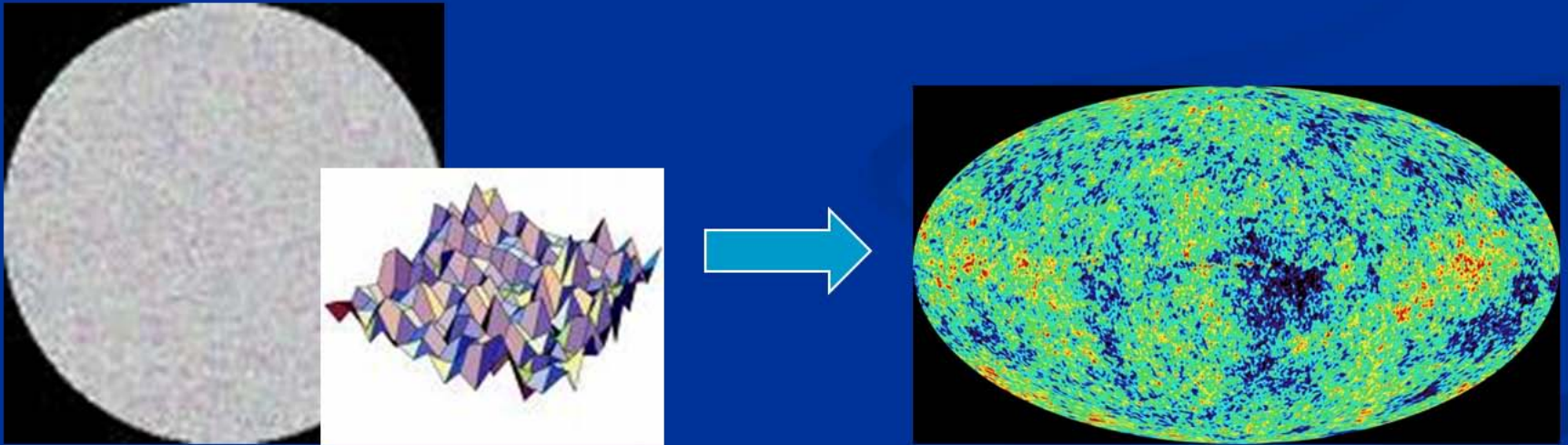
Dunkle Energie :

homogen verteilt

(5) „Probabilistisches Universum“ erlaubt Präzisions-Kosmologie



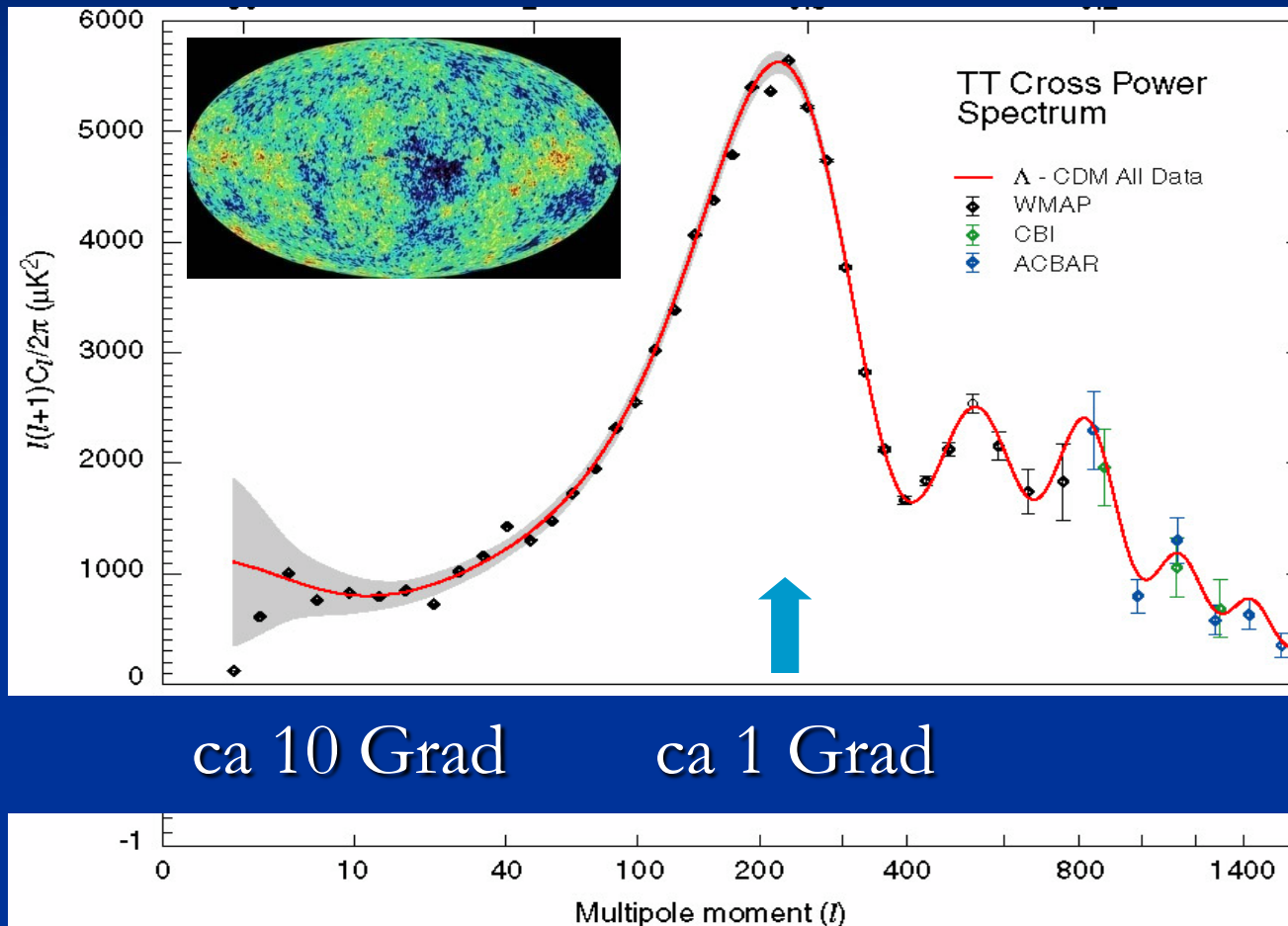
**(6) Beobachtung der Anisotropien der
kosmischen Hintergrundstrahlung
testen Modelle der inflationären
Kosmologie unmittelbar am Urknall**



Three decorative, wavy, light blue lines that curve upwards from the bottom right towards the top right of the slide.

end

Bestimmung kosmologischer Parameter



Mittelwerte
WMAP 2003

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02$$

$$\Omega_{\text{m}} = 0.27$$

$$\Omega_{\text{b}} = 0.045$$

$$\Omega_{\text{dm}} = 0.225$$