

Öffentliche Vortragsreihe 2013

PHYSIK

die Wissen schafft

im Audimax, Campus Vaihingen

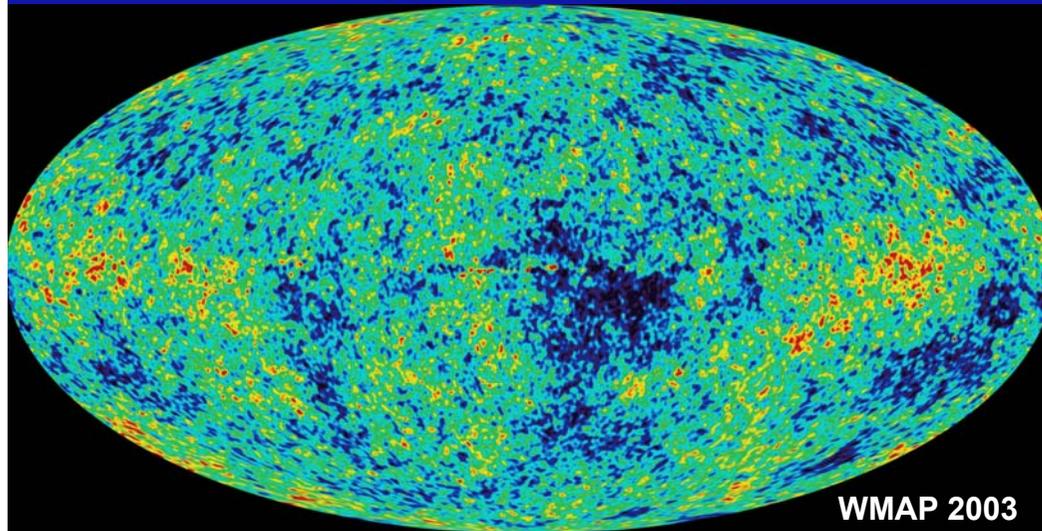
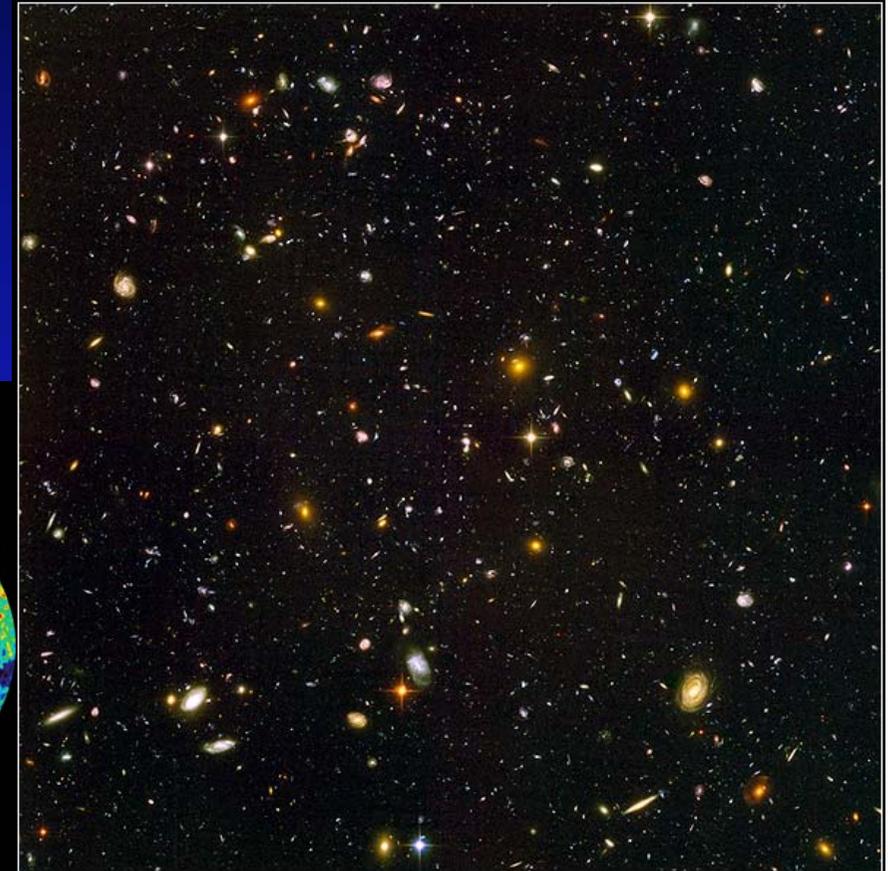
Geheimnisse des Universums: Das Rätsel der Dunklen Materie und Energie

Das Universum im
Sichtbaren, gesehen vom
Hubble-Weltraumteleskop

Das Universum im Mikrowellenbereich,
gemessen vom WMAP-Satelliten

Hubble Ultra Deep Field

HST • ACS



WMAP 2003

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and The HUDF Team

STScI-PRC04-07a

Öffentliche Vortragsreihe 2013

PHYSIK

die Wissen schafft

im Audimax, Campus Vaihingen

Geheimnisse des Universums: Das Rätsel der Dunklen Materie und Energie

Galaxienhaufen, gesehen mit Röntgenaugen



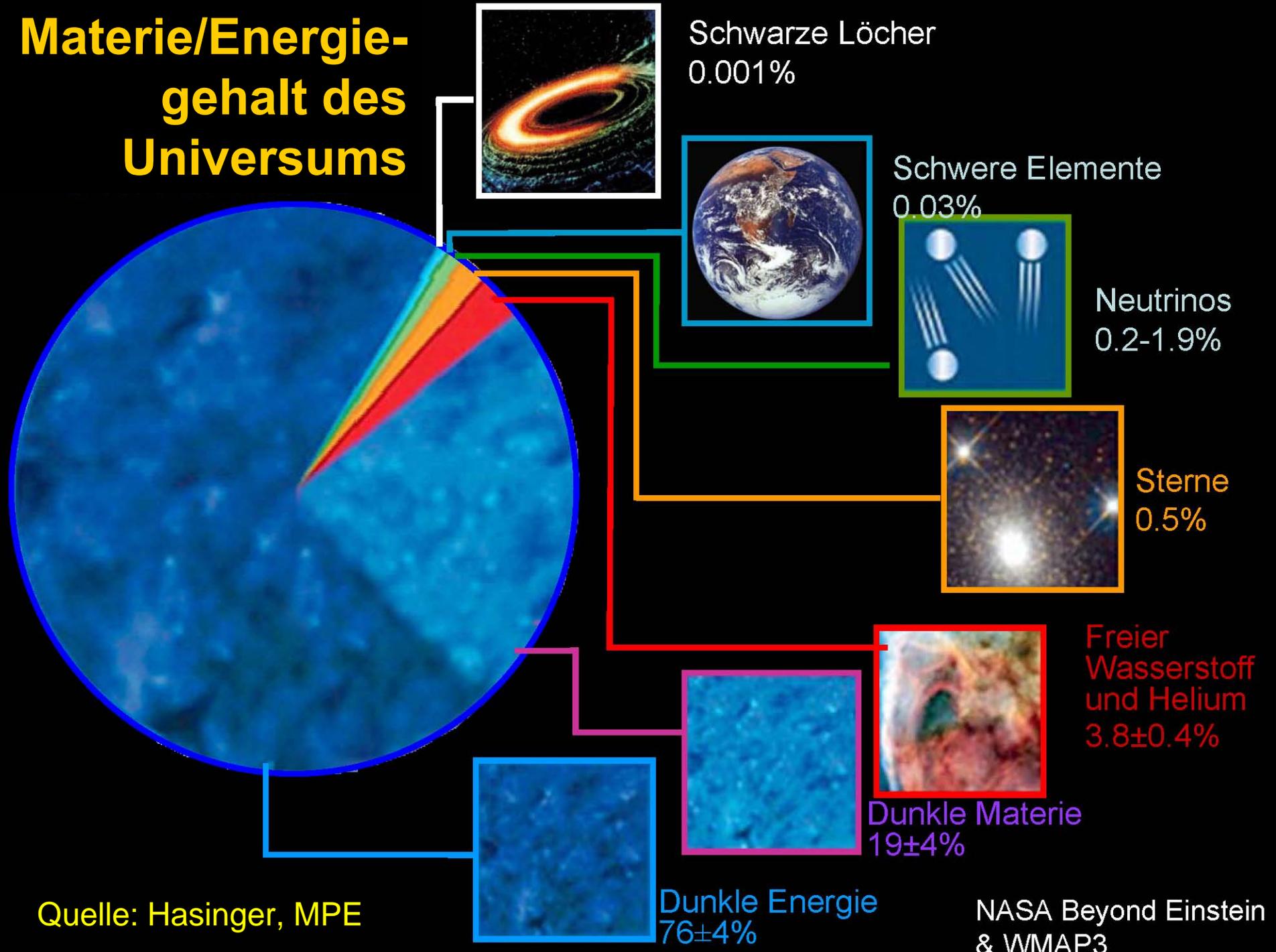
ESO VLT



ESO/ESA/Mullis et al.

XMM-Newton

Materie/Energie- gehalt des Universums



Quelle: Hasinger, MPE

NASA Beyond Einstein
& WMAP3

Was kann man direkt messen?

- Helligkeit m , d.h. Intensität J , einer Strahlungsquelle

Im Sichtbaren entspricht die scheinbare Helligkeit einer Galaxie von 28^m entspricht etwa 10^{-11} der Strahlungsintensität von Wega

- Das Spektrum, die Spektrallinien einer Strahlungsquelle



Was kann man direkt messen?

- Helligkeit m , d.h. Intensität J , einer Strahlungsquelle
Im Sichtbaren entspricht die scheinbare Helligkeit einer Galaxie von 28^m entspricht etwa 10^{-11} der Strahlungsintensität von Wega
- Das Spektrum, die Spektrallinien einer Strahlungsquelle



1929, Edwin Hubble, bahnbrechende Entdeckung:

Je weiter eine Galaxie von uns entfernt ist, umso mehr sind die Spektrallinien zu längeren Wellenlängen verschoben

Rotverschiebung: $(\lambda_1 - \lambda_0)/\lambda_0 = z$

für kleine z : $z = \text{Fluchtgeschwindigkeit } v/c$

**Galaxie
in**

**Entfernung in
Mio.-Lichtjahren**

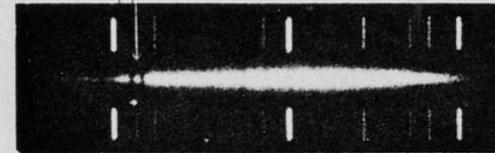
**Rotverschobenes
Spektrum**

z



VIRGO

70



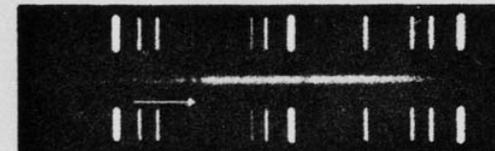
1200 km/sec

0,004



URSA MAJOR

880



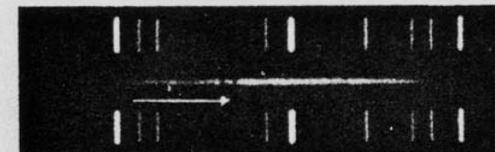
15,000 km/sec

0,050



CORONA BOREALIS

1.300



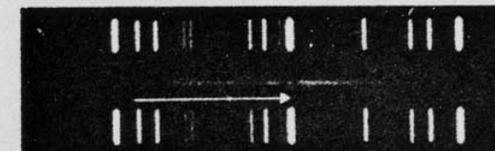
22,000 km/sec

0,073



BOOTES

2.300



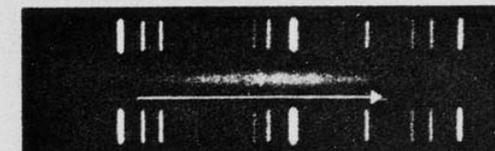
39,000 km/sec

0,13



HYDRA

3.600



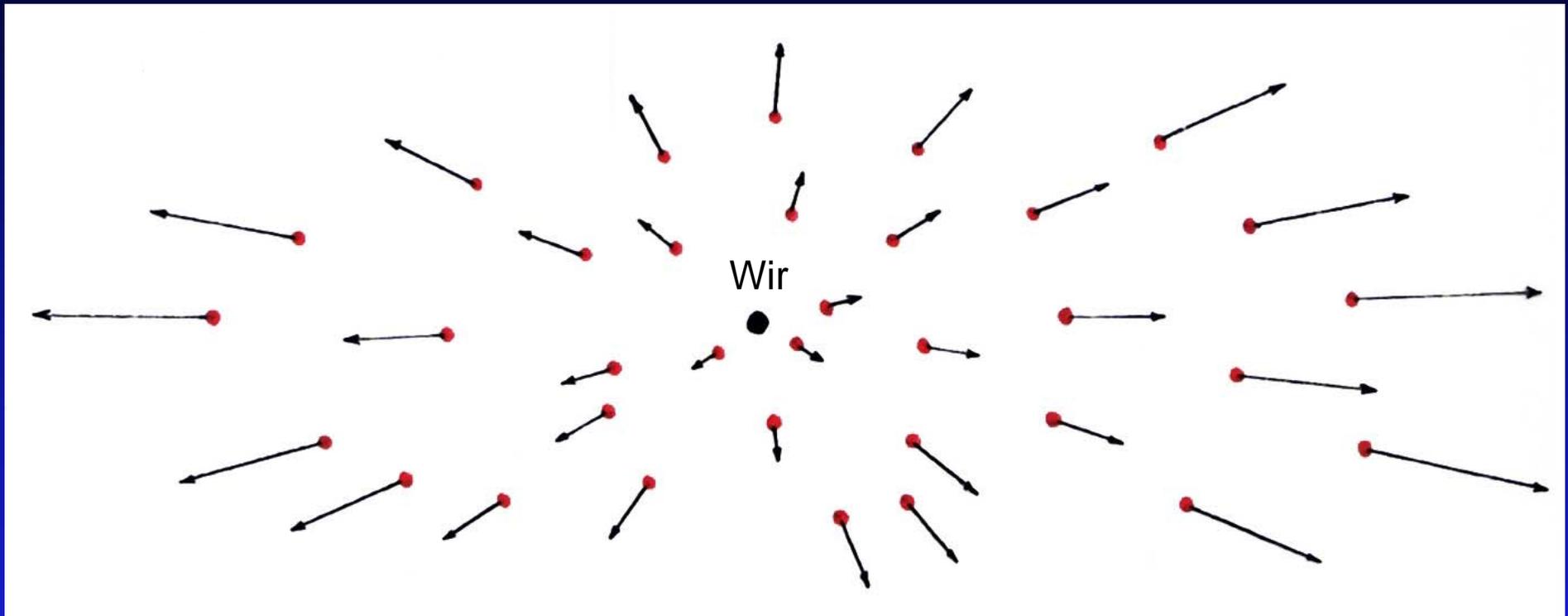
61,000 km/sec

0,20

Erdgebundene Beobachtungen

Die Fluchtgeschwindigkeit wächst proportional zum Abstand

Hubble-Gesetz: $v = H_0 d$, H_0 : Hubble-Konstante



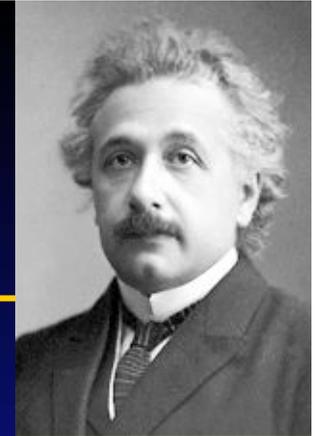
Evidenz für die Expansion des Universums

„Urknall“ vor ca. $t_H \sim 1/H_0$ Jahren, t_H Hubble-Zeit

Heutiger Wert: $H_0 = 71_{-3}^{+4}$ km/s/Mpc, 1 Mpc = 3,2 Mio Lichtjahre

$1/H_0 \sim 14$ Milliarden Jahre

Kosmologie: Theorie



Kosmologisches Prinzip

Einstein 1917: „Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie“

“Prinzip der menschlichen Bescheidenheit:“

Der Raum ist homogen – kein Punkt ist ausgezeichnet

und isotrop – keine Richtung ist ausgezeichnet.

Annahme:

Materie (Energie) ist homogen im (expandierenden) Raum verteilt.

Allgemeine Metrik der kosmischen Raum-Zeit

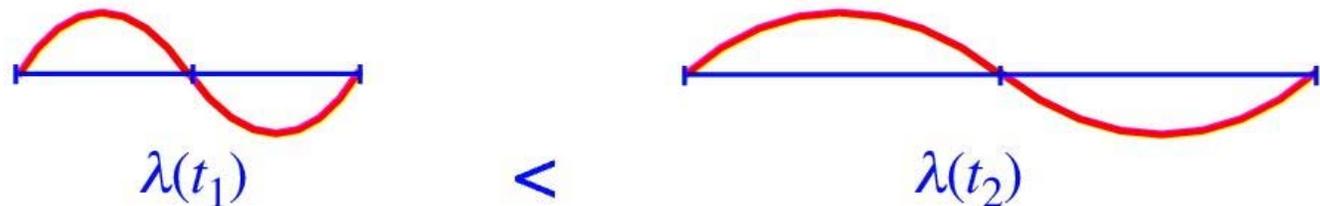
- t kosmische Zeit, die überall gleich verstreicht (Eigenzeit der Materie)
- $a(t)$ globaler räumlicher Skalenfaktor, der angibt, wie sich physikalische Abstände $d(t)$ zwischen Raumpunkten mit der Zeit ändern
- dl^2 3d-Linienelement räumlicher Geometrie mit konstanter Krümmung $q = 0, \pm 1$: Robertson-Walker-Metrik

Aufgabe der Kosmologie: die Funktion $a(t)$ und die Krümmung q bestimmen

Lichtausbreitung in der RW-Metrik: Kosmologische Rotverschiebung

Wellenlängen werden bei der Expansion „auseinandergezogen“

Rotverschiebung:
$$z = \frac{\lambda(t) - \lambda(t_1)}{\lambda(t_1)} = \frac{a(t)}{a(t_1)} - 1$$



Zusammenhang zwischen den „Weltradien“ a zum Zeitpunkt t_1 der Emission der Strahlung und zum Zeitpunkt t_2 der Beobachtung der Strahlung

**Theoretische Beschreibung der Expansion:
Einsteinsche Feldgleichungen der ART mit
kosmologischem Glied**

Friedmann-LeMaitre Universen (materiedominiert)

Friedmann-Gleichung

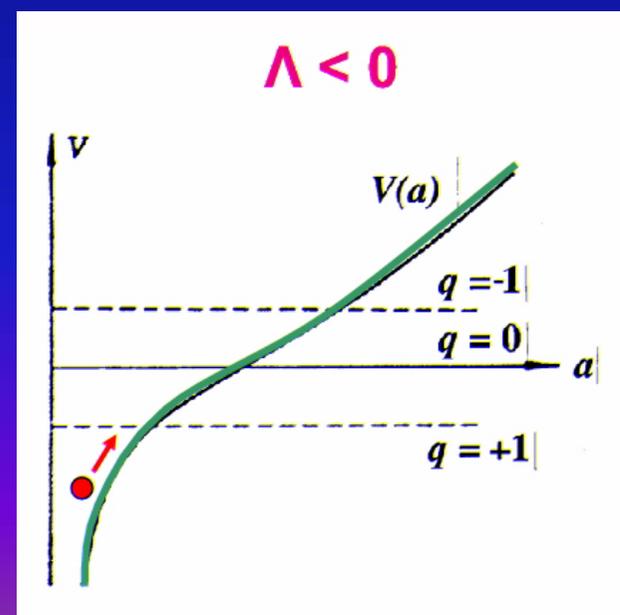
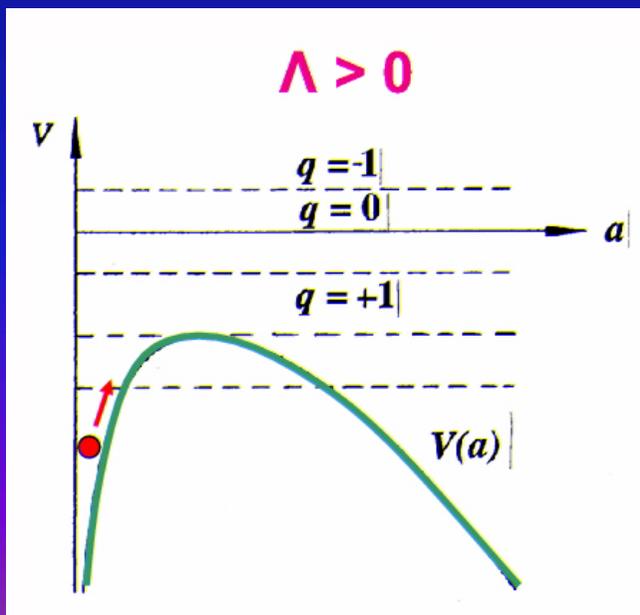


1922

$$\dot{a}^2 - \underbrace{\frac{8\pi}{3} G \frac{M}{a} - \frac{\Lambda c^2}{3} a^2}_{V_{\text{pot}}} = -q c^2$$

$$\frac{m}{2} v^2 + V_{\text{pot}} = E$$

Λ : kosmologische Konstante, effektives Potential:



Kennzeichnung der Universen durch die kosmologischen Parameter

$t = t_0 = \text{heute:}$

Friedmann
Gleichung:

$$H_0^2 = \left(\frac{\dot{a}(t_0)}{a(t_0)} \right)^2 = \frac{8\pi}{3} G \sigma + \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{q c^2}{a^2}$$

Normierung:

$$1 = \underbrace{\frac{8\pi G}{3 H_0^2}}_{1/\sigma_{\text{crit}}} \sigma + \frac{\Lambda c^2}{3 H_0^2} - \frac{q c^2}{a^2 H_0^2}$$

$$H_0 = h \cdot 100 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$$

kritische Dichte:

$$\sigma_{\text{crit}} = h^2 1.9 \times 10^{-26} \text{kg/m}^3 = 8 \times 10^{-27} \text{kg/m}^3$$

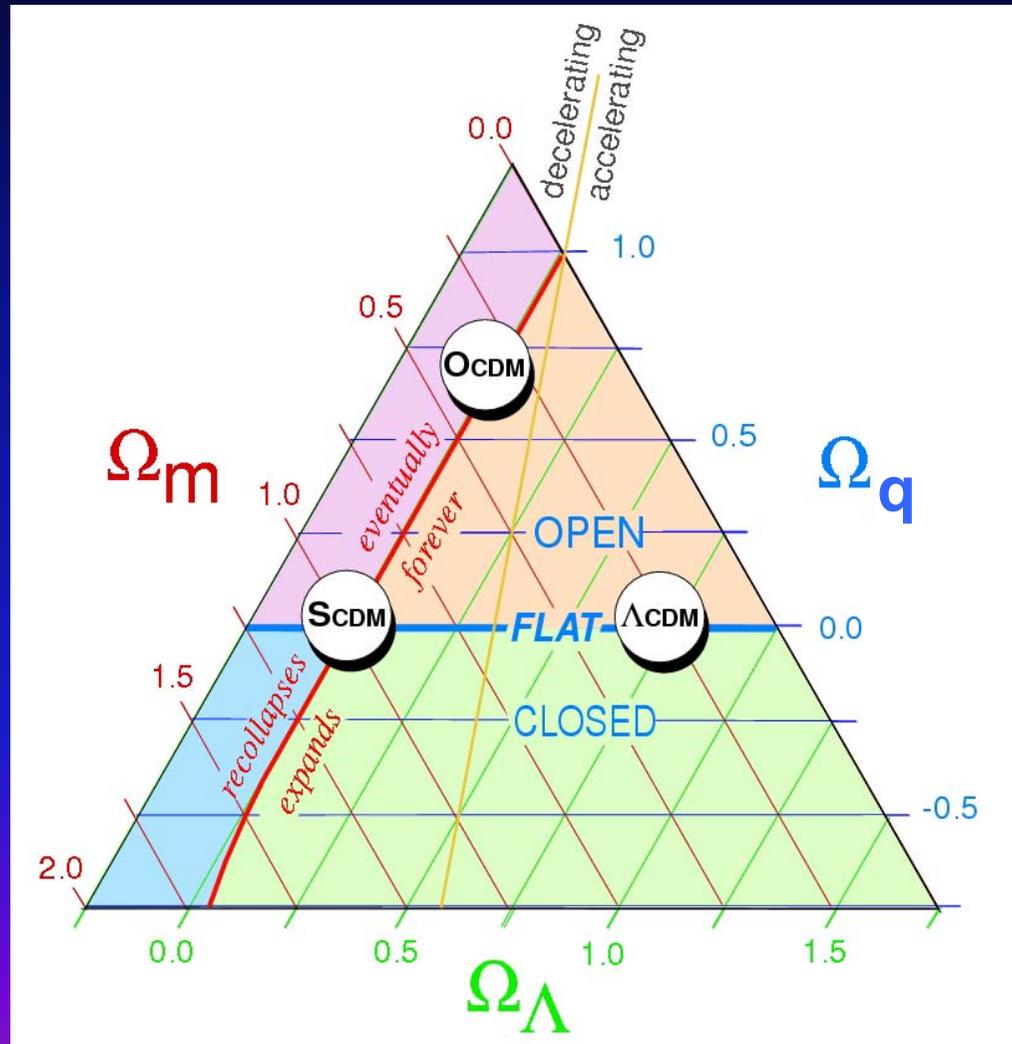
Dimensionslose
Größen:

$$\Omega_m = \frac{\sigma_m}{\sigma_{\text{crit}}}, \quad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3 H_0^2} = \frac{\sigma_\Lambda}{\sigma_{\text{crit}}}, \quad \Omega_q = \frac{-q c^2}{(a H_0)^2}$$

Summenregel:

$$1 = \Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_q$$

Das kosmologische Dreieck



Kosmologie: Beobachtung

Supernova Cosmology Project

Perlmutter et al., Berkeley

1998 Science Breakthrough of the Year

2011 Nobelpreis „für die Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums durch Beobachtung entfernter Supernovae“



High-z Supernova Search Team

Garnavich, Riess, Schmidt et al.



Supernova Typ Ia als Standardkerzen zur Bestimmung der Entfernung (der Rotverschiebung) von Galaxien

Supernova Typ Ia:

Weißer Zwerg sammelt Gas von Begleiter, Masse überkritisch:
explosive thermonukleare Zündung von C

identische Ursache → identische Wirkung:

- identische absolute Maximums-Helligkeit
- identisches zeitliches Abklingverhalten

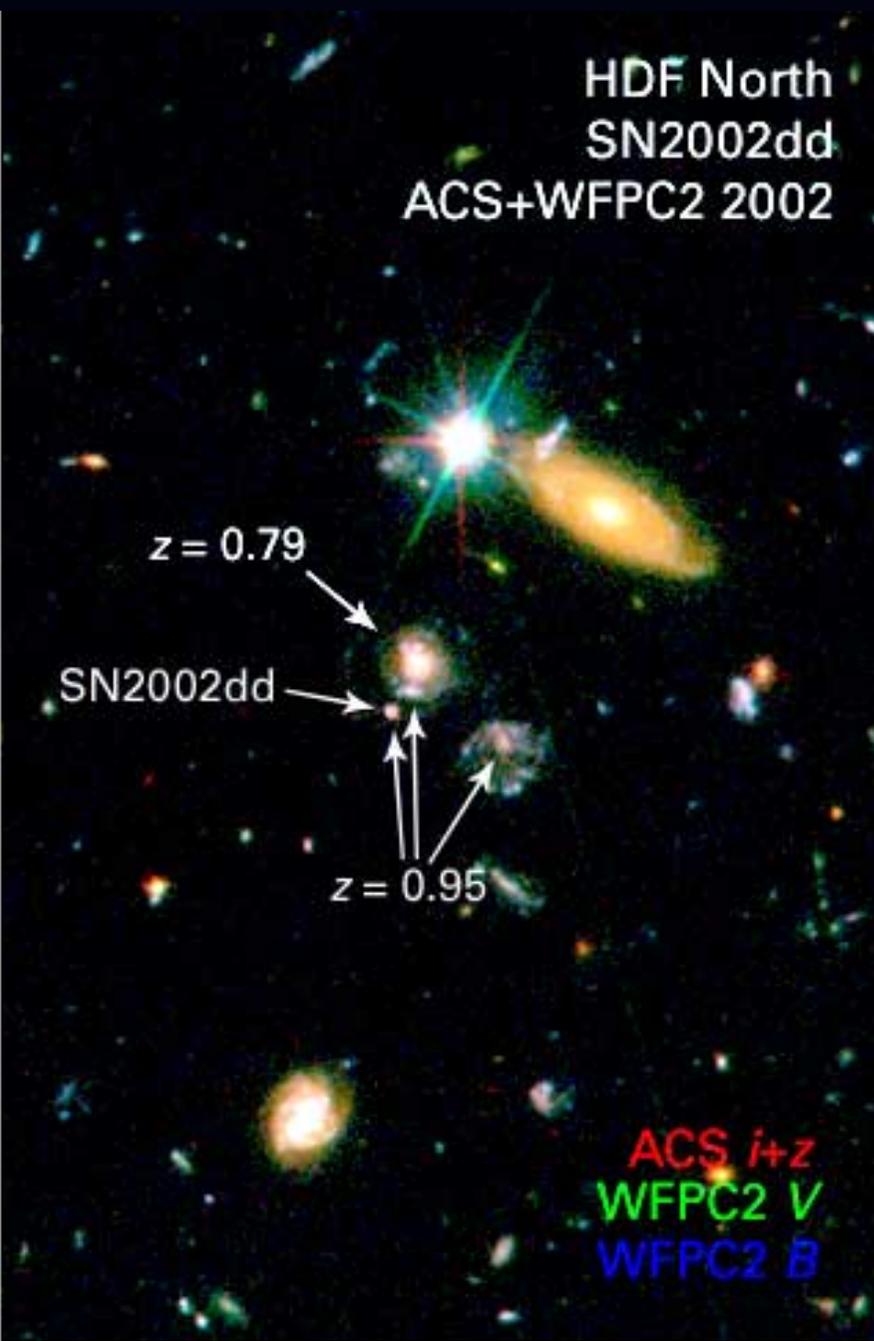
Vorteil des Hubble-Teleskops: Auflösung von SN-Explosionen auch in größter Entfernung ($z \sim 1$, $z > 1$)

HDF North
SN2002dd
WFPC2 1995



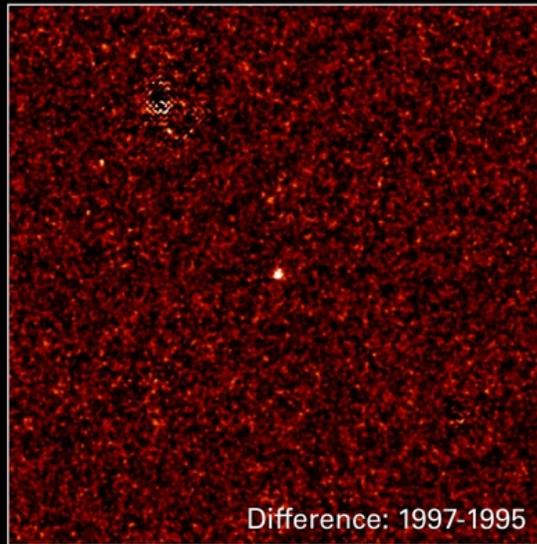
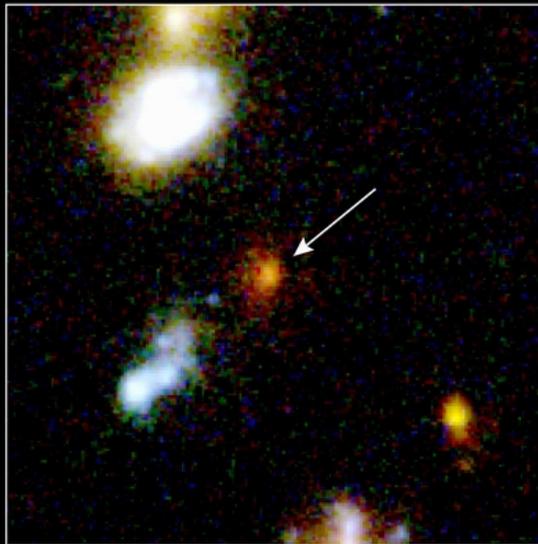
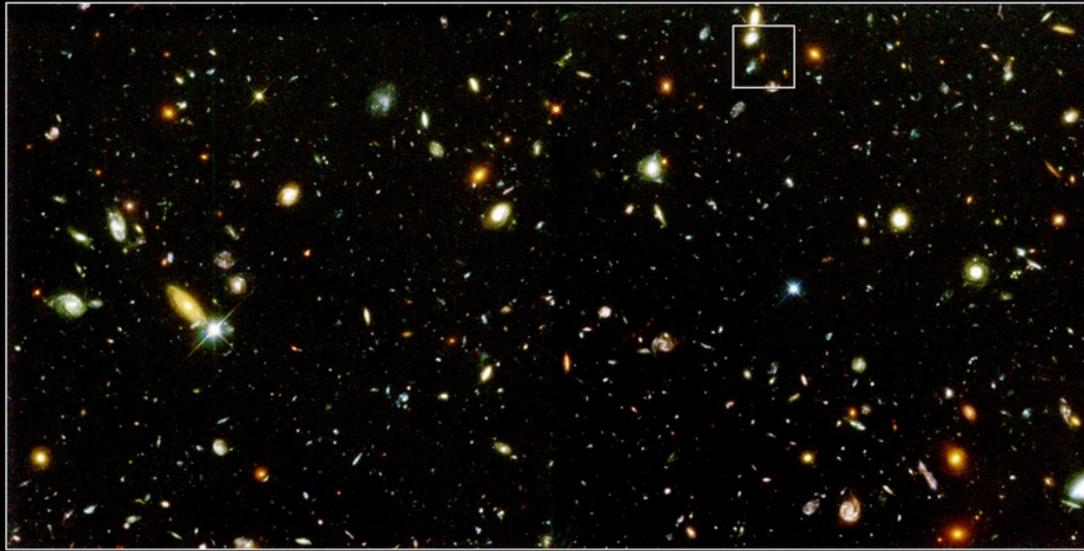
WFPC2 I
WFPC2 V
WFPC2 B

HDF North
SN2002dd
ACS+WFPC2 2002



$z = 0.79$
SN2002dd
 $z = 0.95$

ACS i+z
WFPC2 V
WFPC2 B

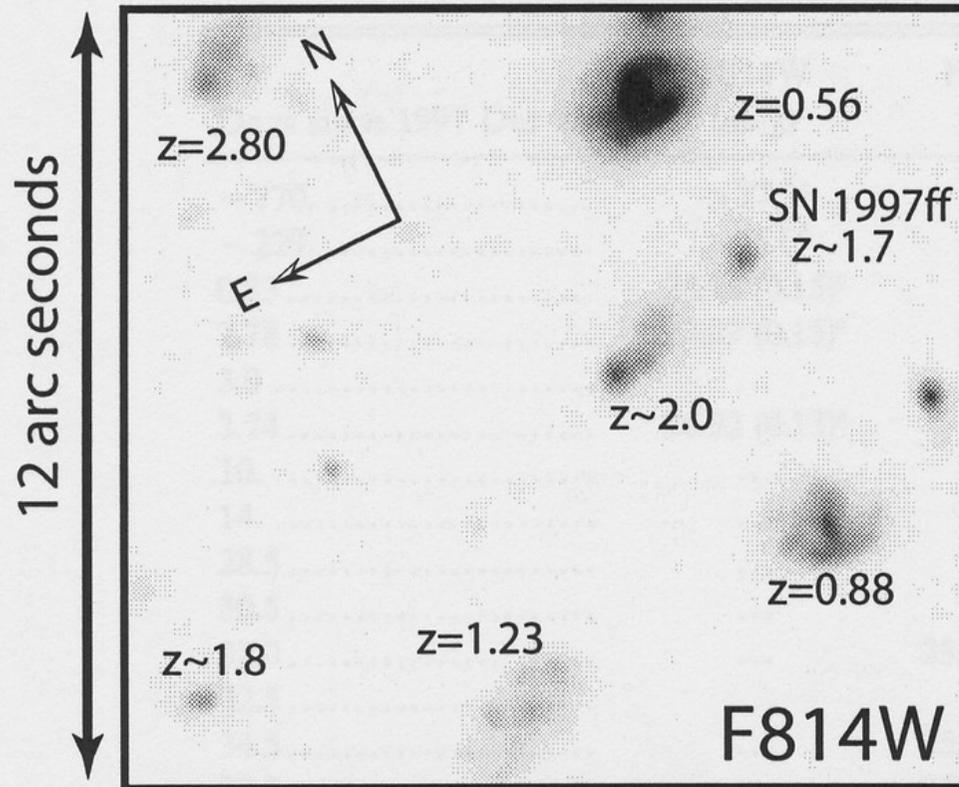


**Distant Supernova in the Hubble Deep Field
Hubble Space Telescope • WFPC2**

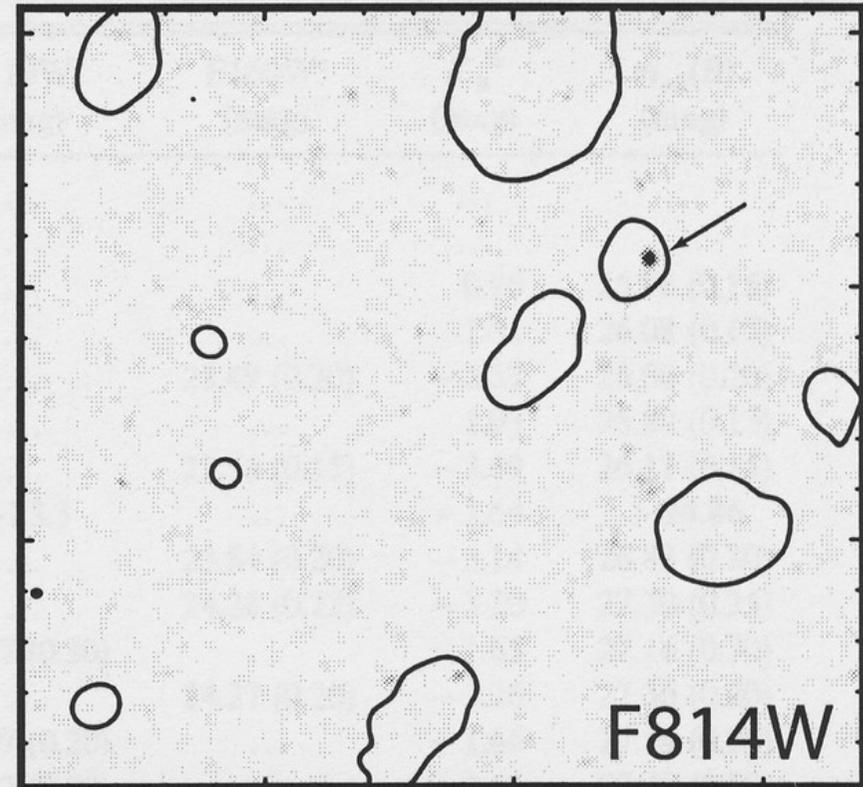
NASA and A. Riess (STScI) • STScI-PRC01-09

SN 1997ff, 10 Milliarden Jahre

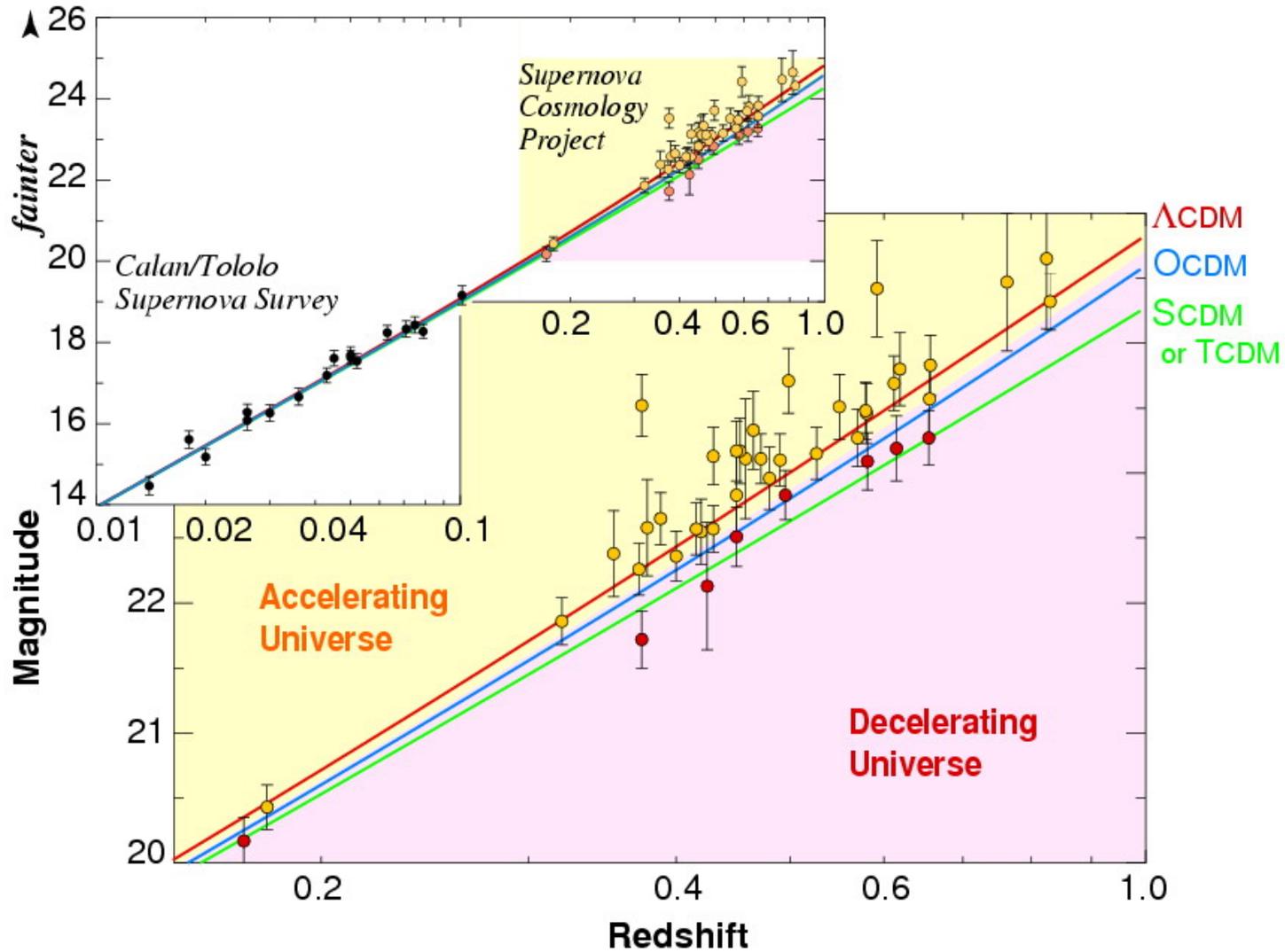
Template



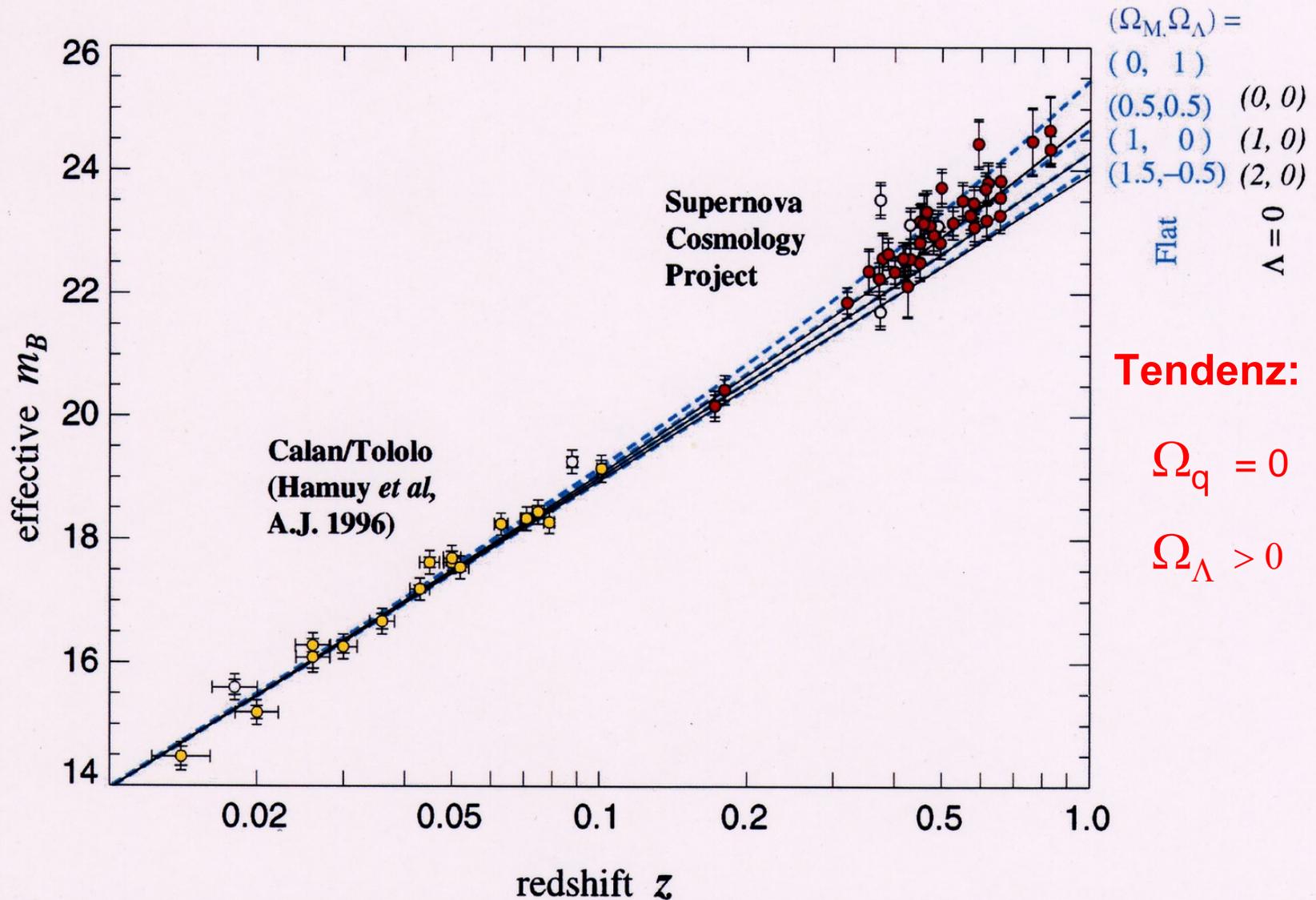
Subtraction



Supernovae Typ Ia: Ergebnisse



Supernovae Typ Ia: Ergebnisse



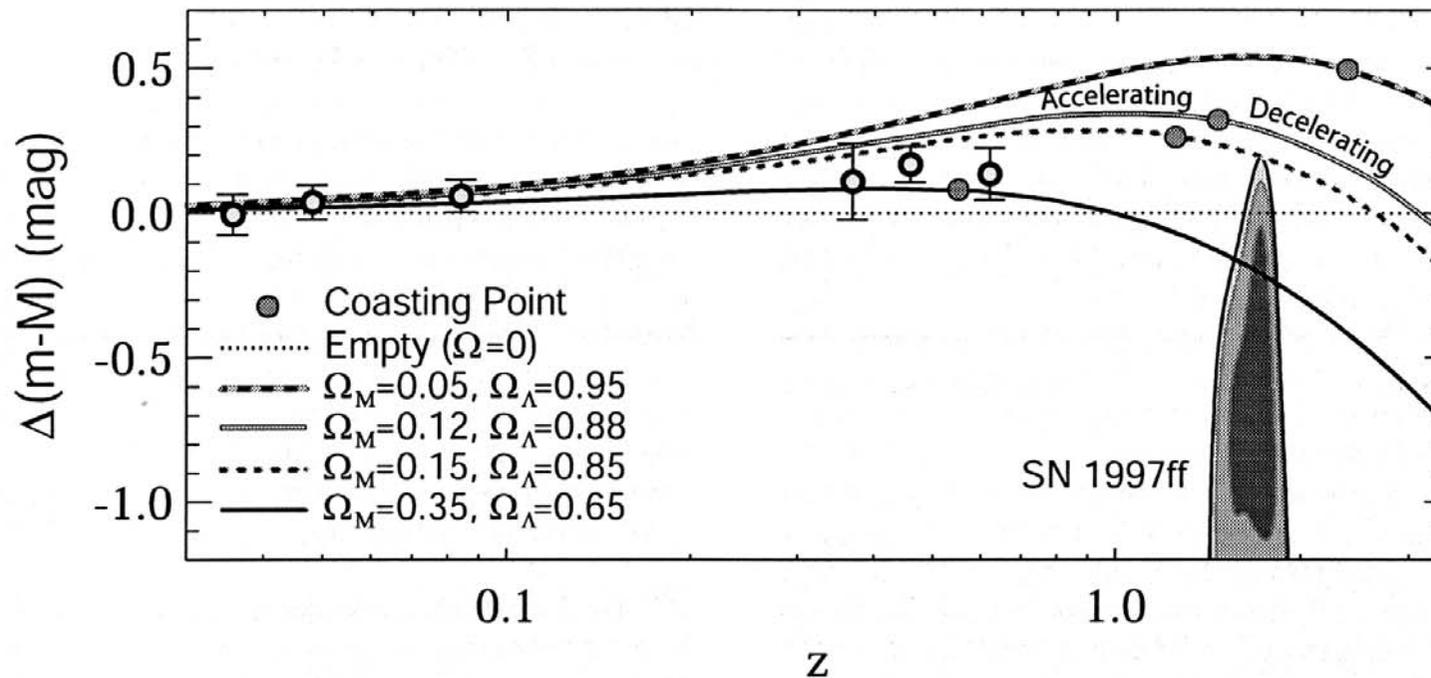


FIG. 12.—Same as Fig. 11 with the inclusion of a family of plausible, flat Ω_Λ cosmologies. The transition redshift (i.e., the coasting point) between the accelerating and decelerating phases is indicated and is given as $[2\Omega_\Lambda/\Omega_M]^{1/3} - 1$. SN 1997ff is seen to lie within the epoch of deceleration. This conclusion is drawn from the result that the apparent brightness of SN 1997ff is inconsistent with values of $\Omega_\Lambda \geq 0.9$ and, hence, a transition redshift greater than that of SN 1997ff. [See the electronic edition of the Journal for a color version of this figure.]

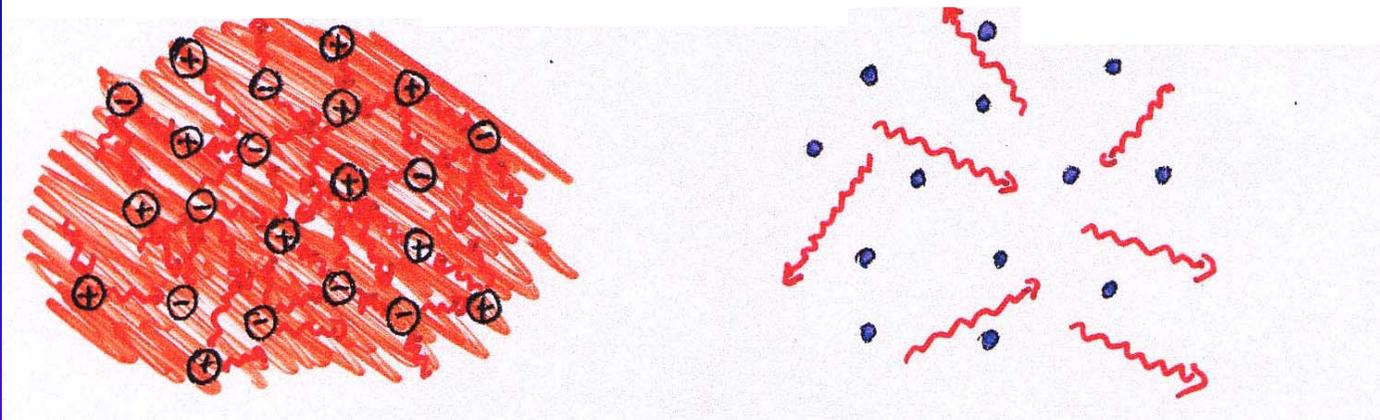
Also: $\Omega_\Lambda > 0$, beschleunigt expandierend,
und $\Omega_q = 0$

Warum $\Omega_q = 0$, flacher Raum ?

Kosmische 2,7 Kelvin Mikrowellen-Hintergrundstrahlung

Entkopplung Strahlung - Materie
380.000 Jahre nach dem Urknall

Protonen+Elektronen+Photonen Wasserstoffatome + Photonen



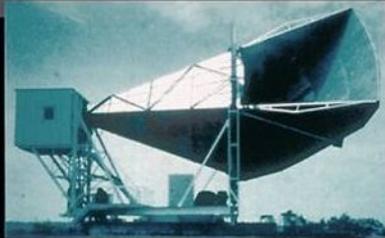
$T > 3000 \text{ K}$

$T < 3000 \text{ K}$

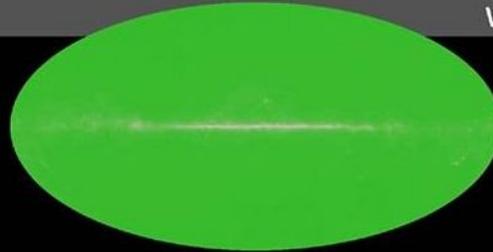
Vorhergesagt durch Gamov 1946: Temperatur heute $T \sim 50 \text{ K}$

Entdeckung der Mikrowellenhintergrundstrahlung

1965



Penzias and
Wilson

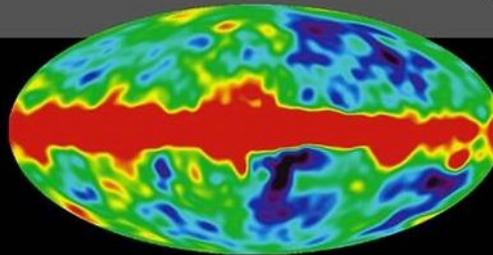


gleichförmig & isotrop,
Planckspektrum $T \sim 3$ K,
Nobelpreis 1978

1992

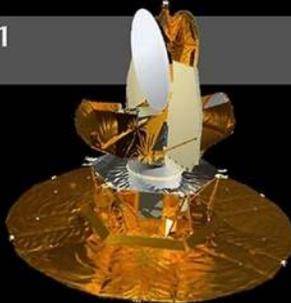


COBE

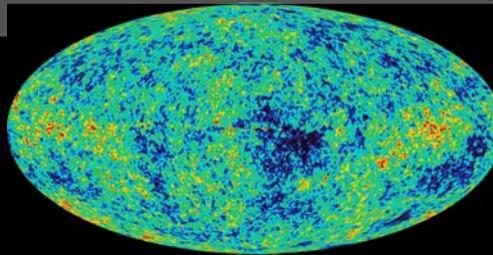


$T = 2,725$ K, Abweichungen
von der Isotropie, im Be-
reich von zig Mikro-Kelvin
Nobelpreis 2006

2001



MAP
(imulated)

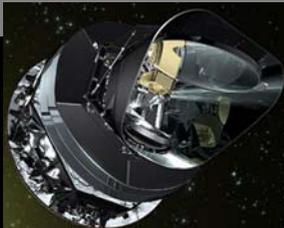


Messung der Anisotropien
mit einer Winkelauflösung
von 10 Bogenminuten

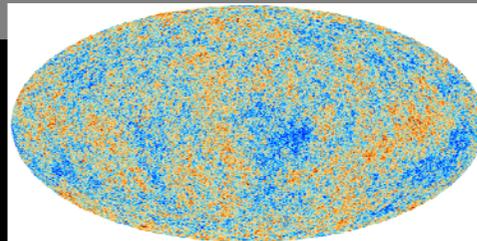
2003

2012 Gruber Cosmology
Prize

2009



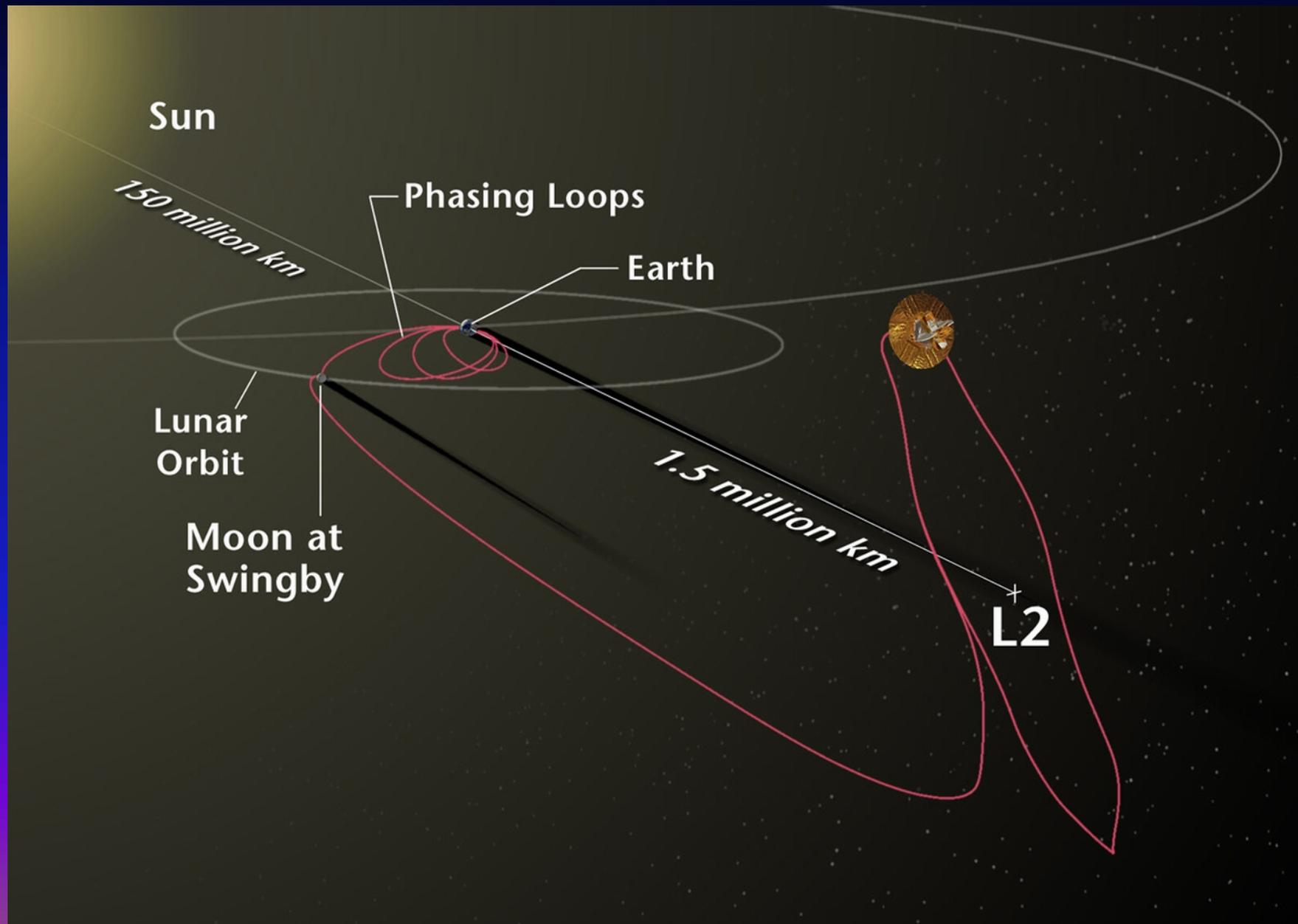
Planck



2013

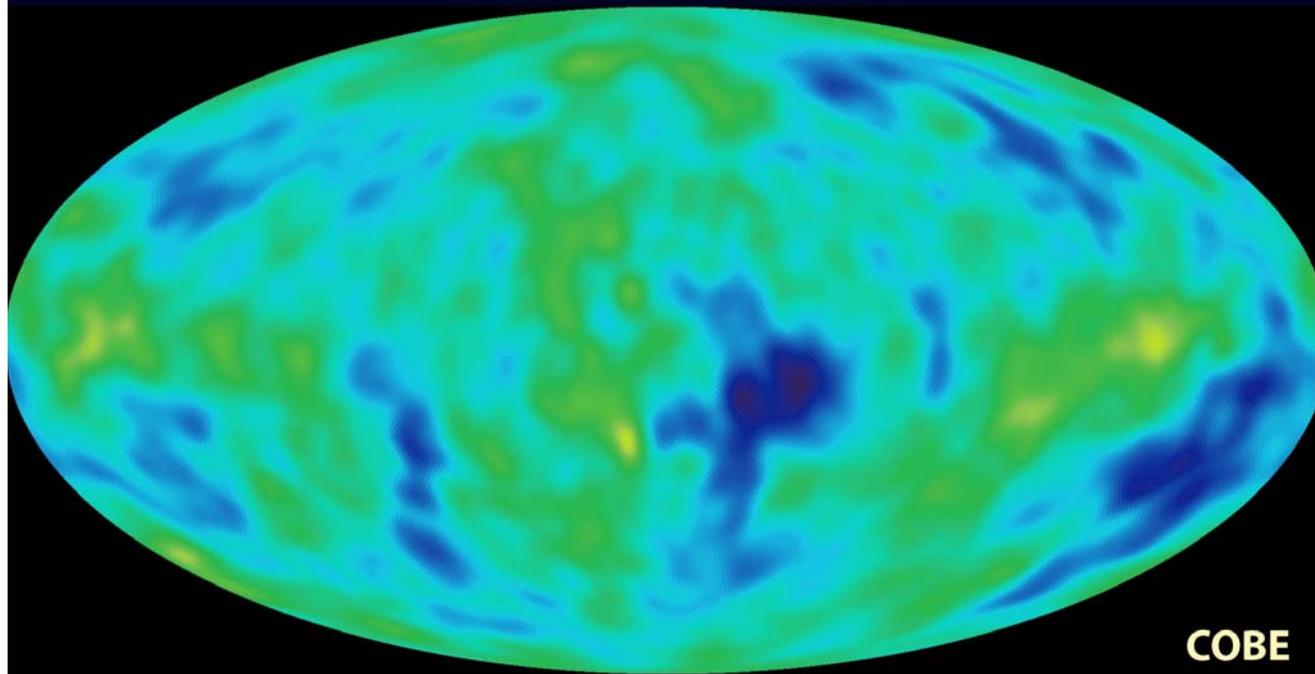
Winkelauflösung von 1
Bogenminute

Positionierung am Sonne – Erde Lagrangepunkt L2



Hohe Isotropie der Hintergrundstrahlung

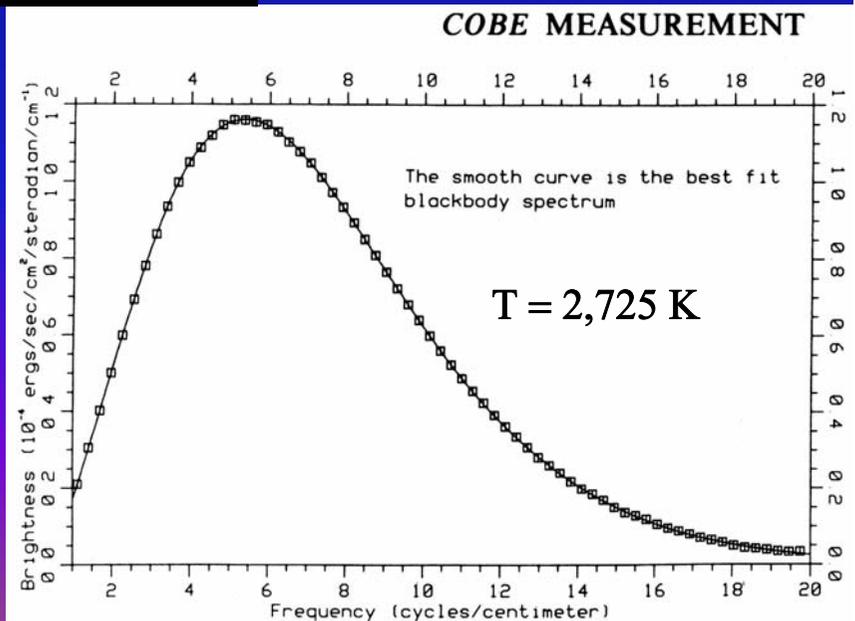
Cosmic Background Explorer (COBE) - Satellit
1990-94

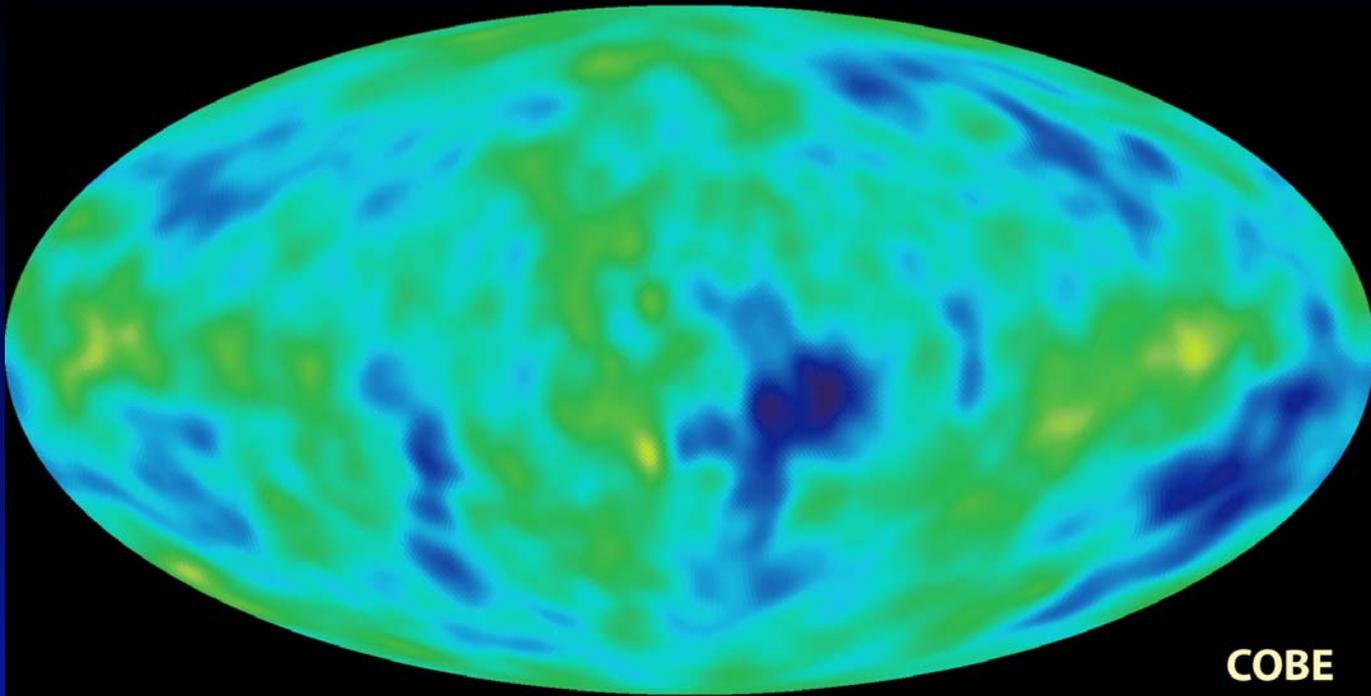


Photonentemperatur
heute: 2,725 K

Abweichungen nur im
zig-Mikrokelvinbereich

Rotverschiebung $z \sim 1000$

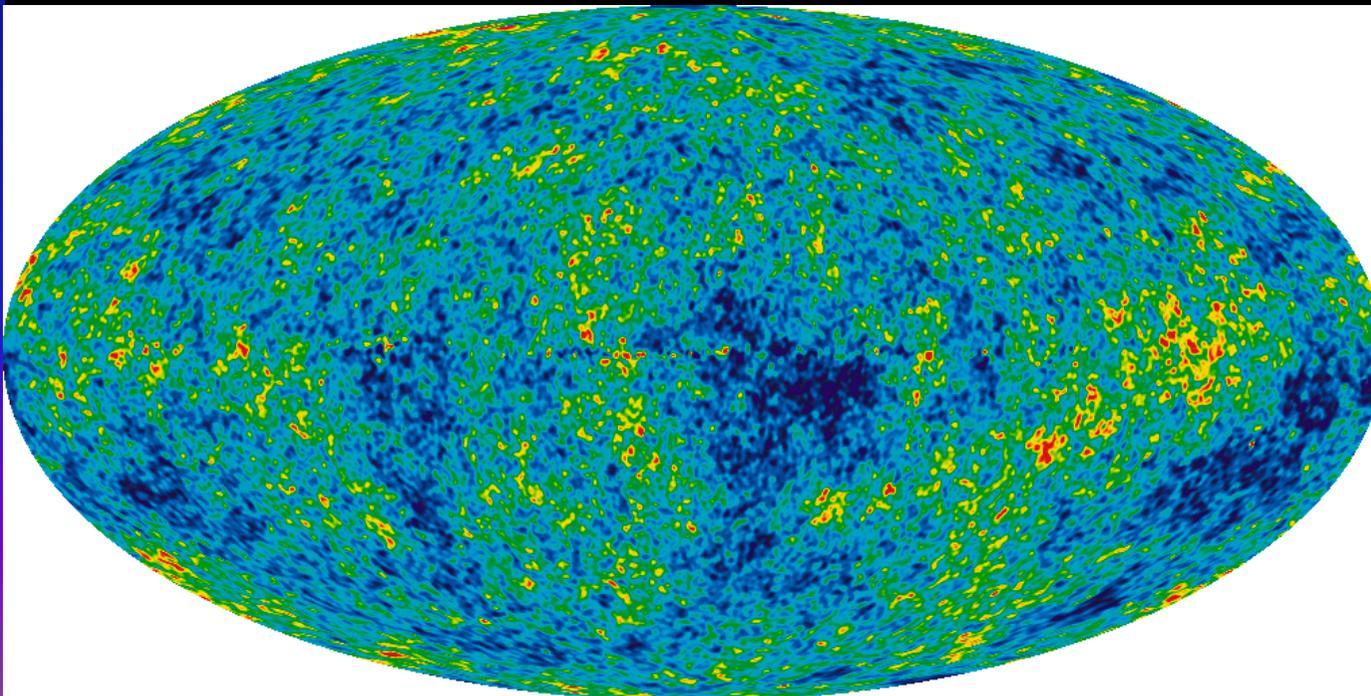




COBE

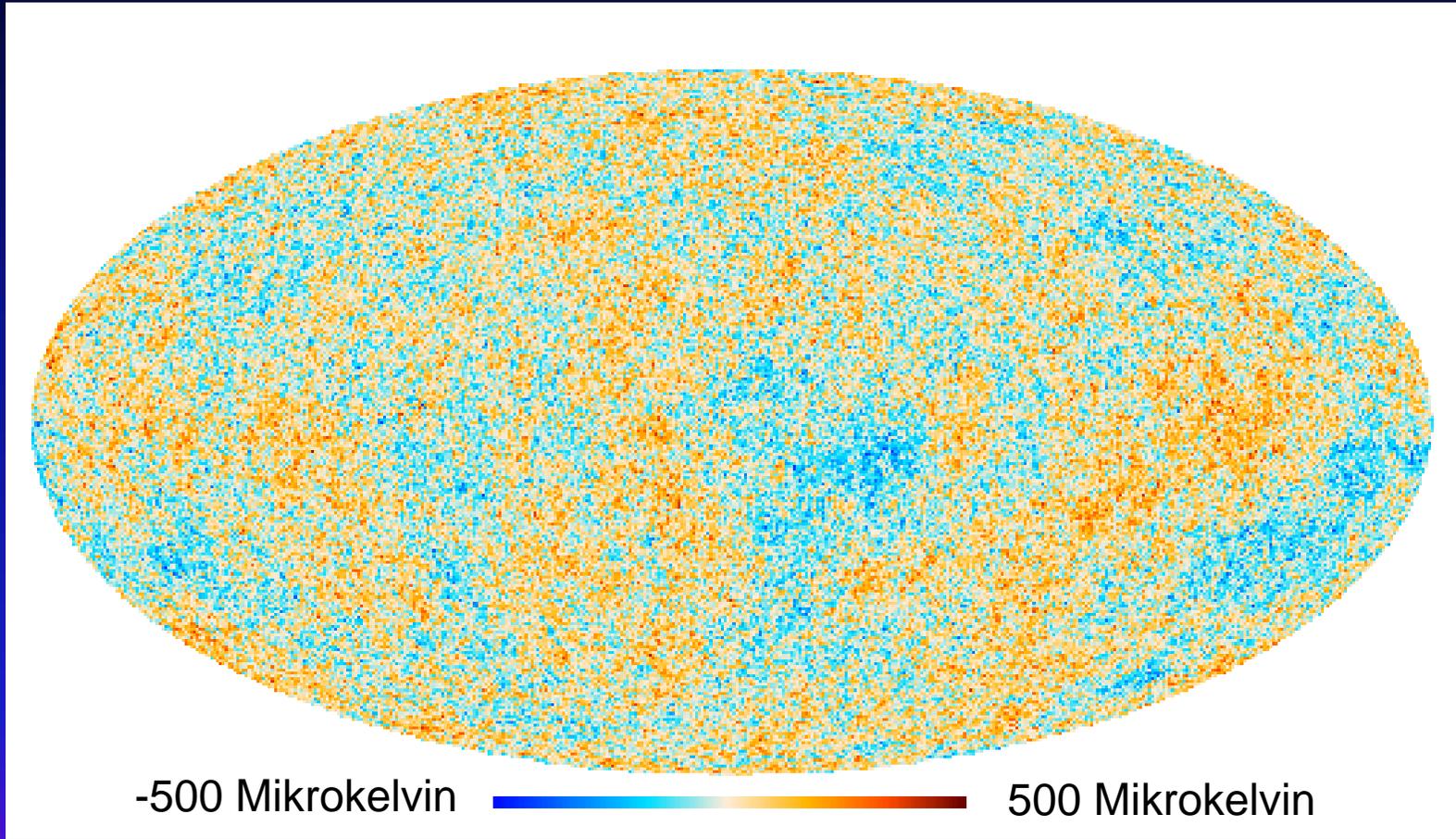
$\Delta\alpha \sim 7^\circ$

1990



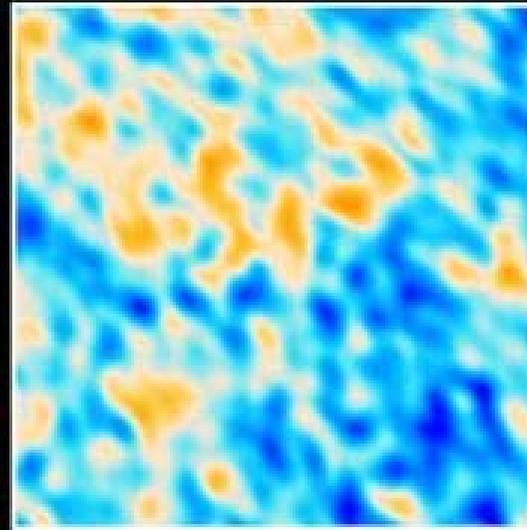
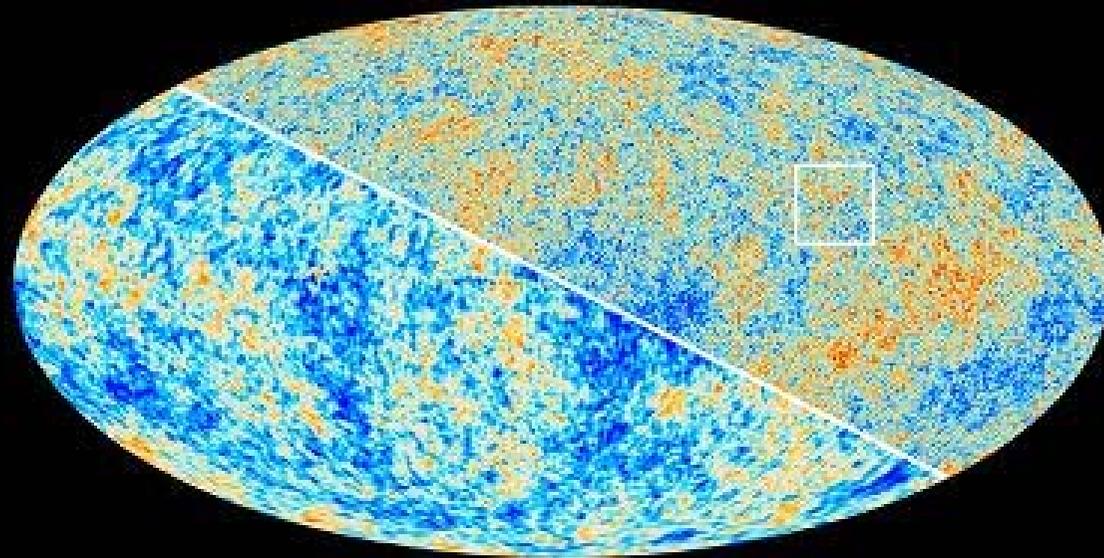
$\Delta\alpha \sim 10'$

2009

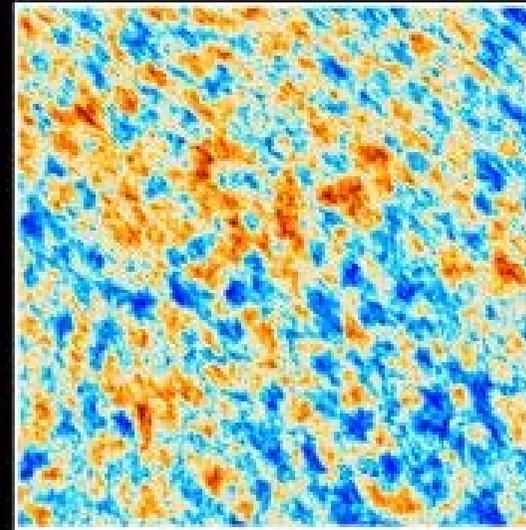


Planck, 2013

Vergleich WMAP - Planck

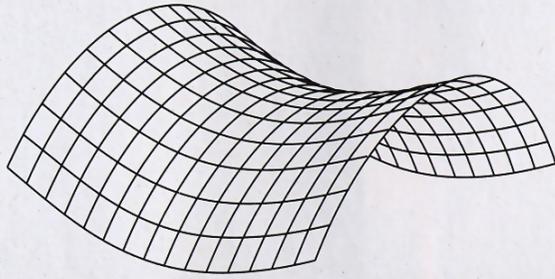


WMAP

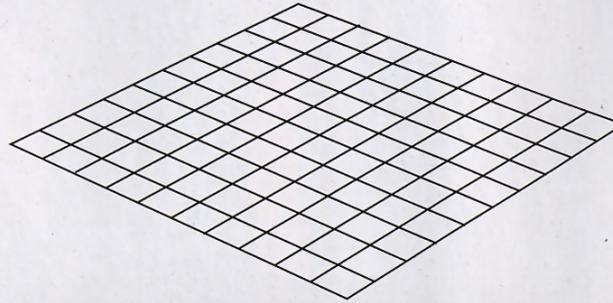


Planck

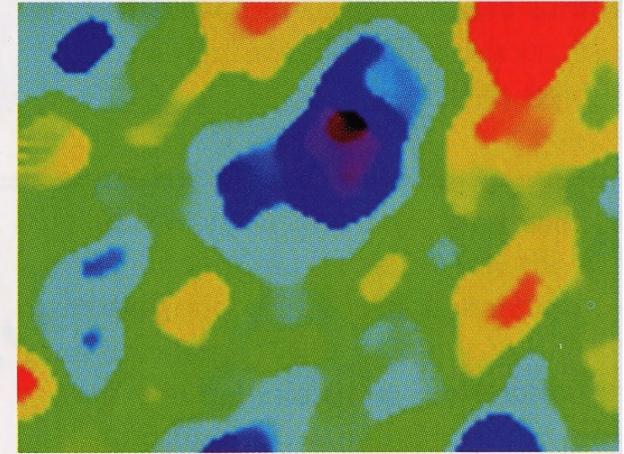
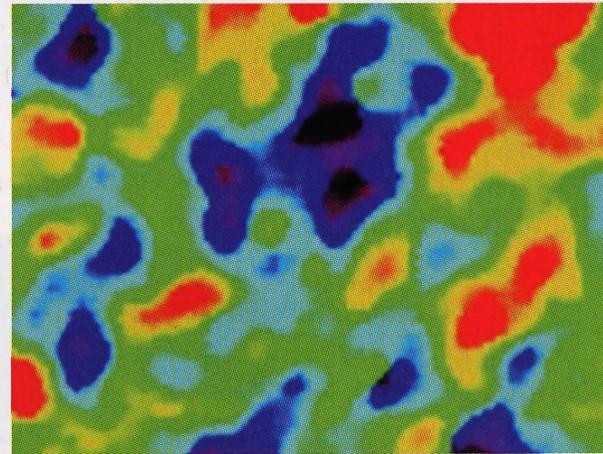
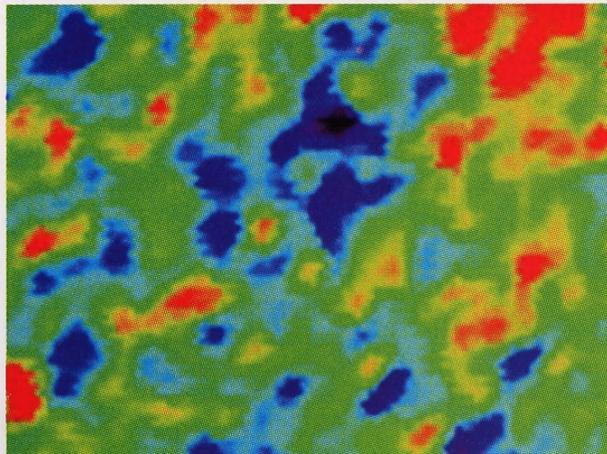
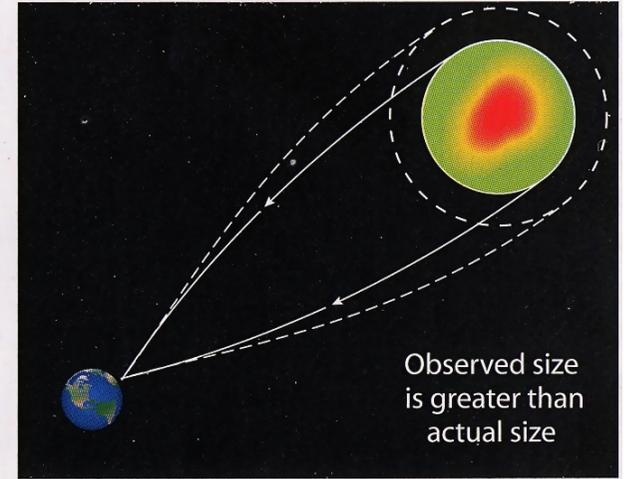
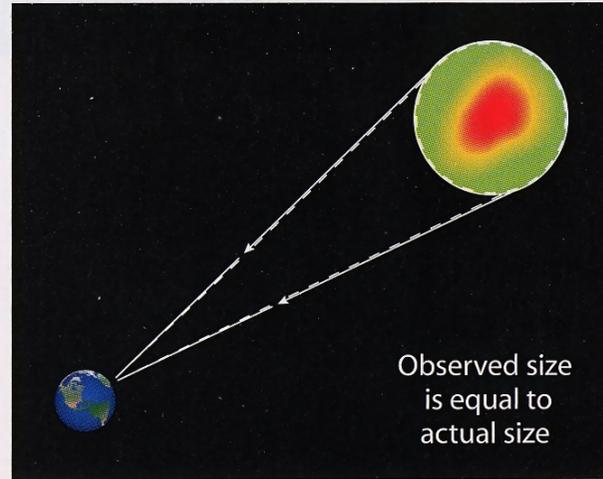
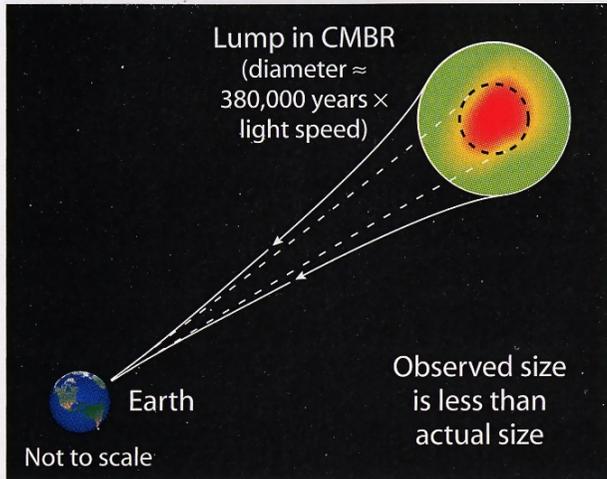
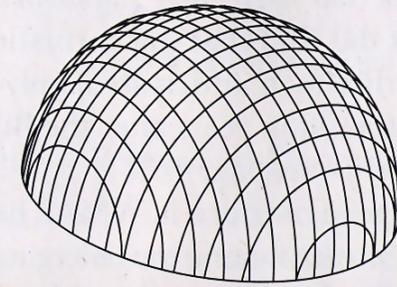
Negatively curved



Flat

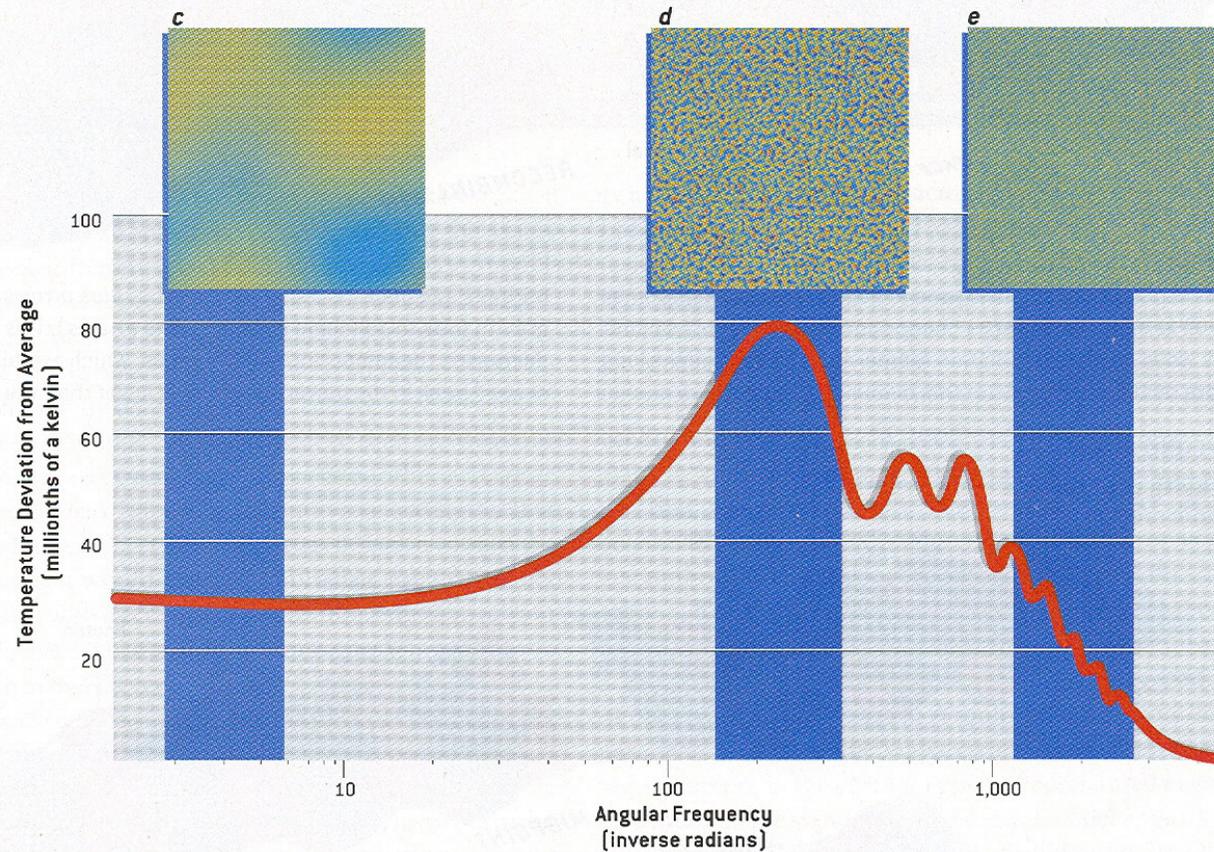
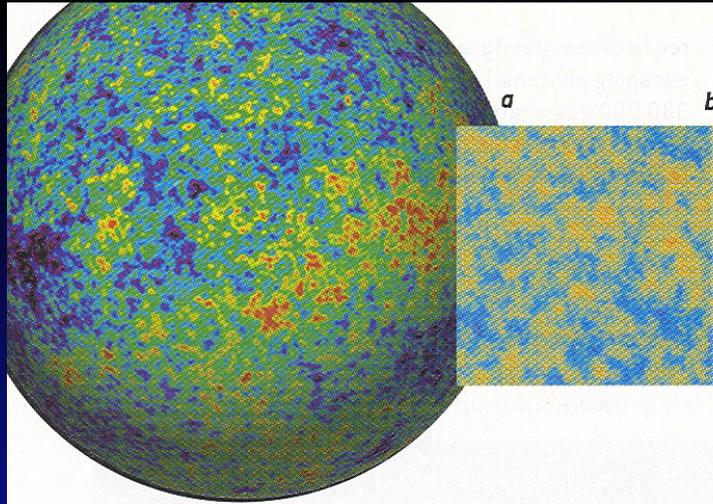


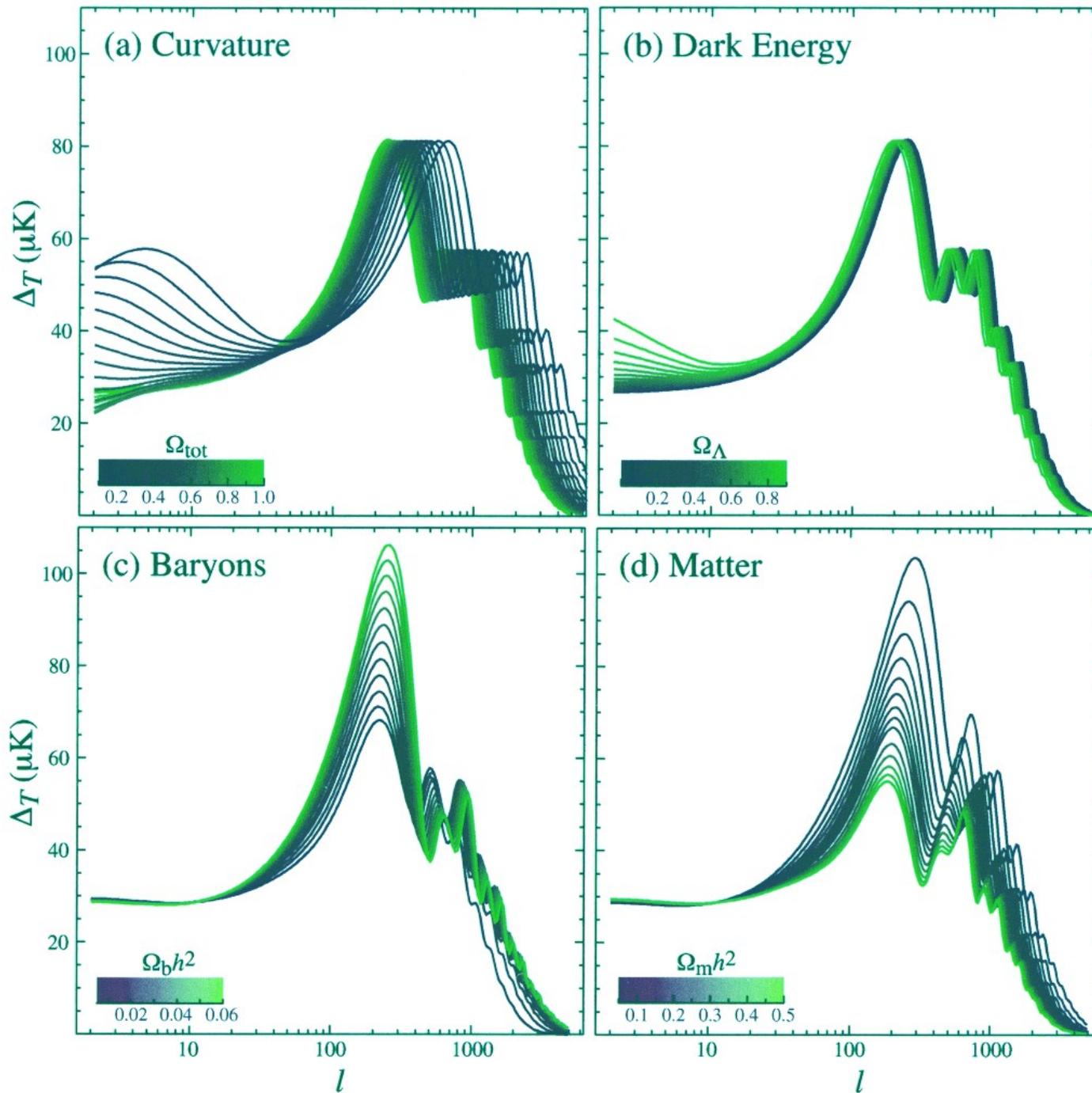
Positively curved



SOUNDING OUT THE SHAPE OF SPACE

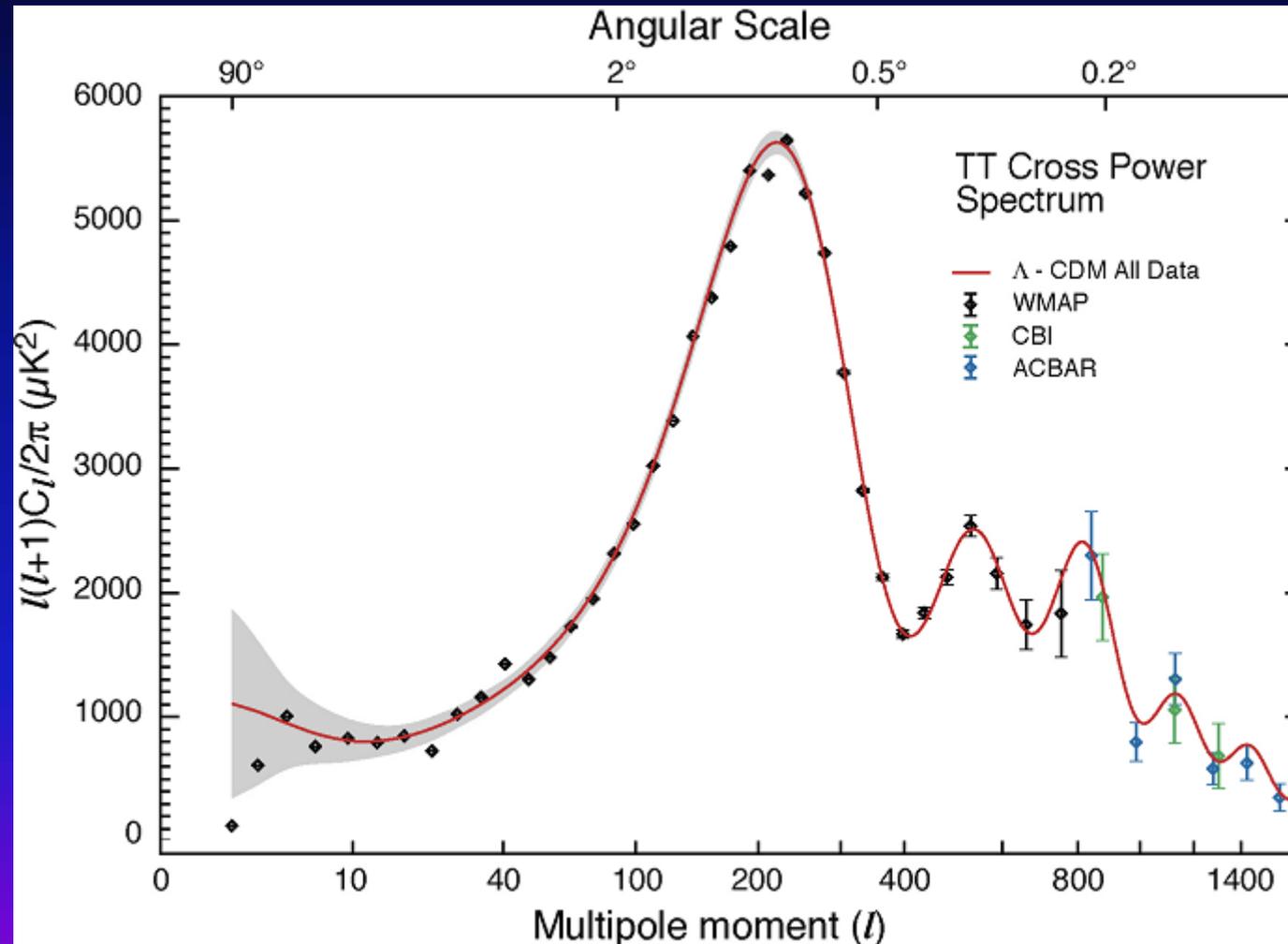
Zweipunktkorrelation der Temperatur-anisotropie qualitativ





Empfindliche
Abhängigkeit
des Leistungs-
spektrums von
den kosmo-
logischen
Parametern

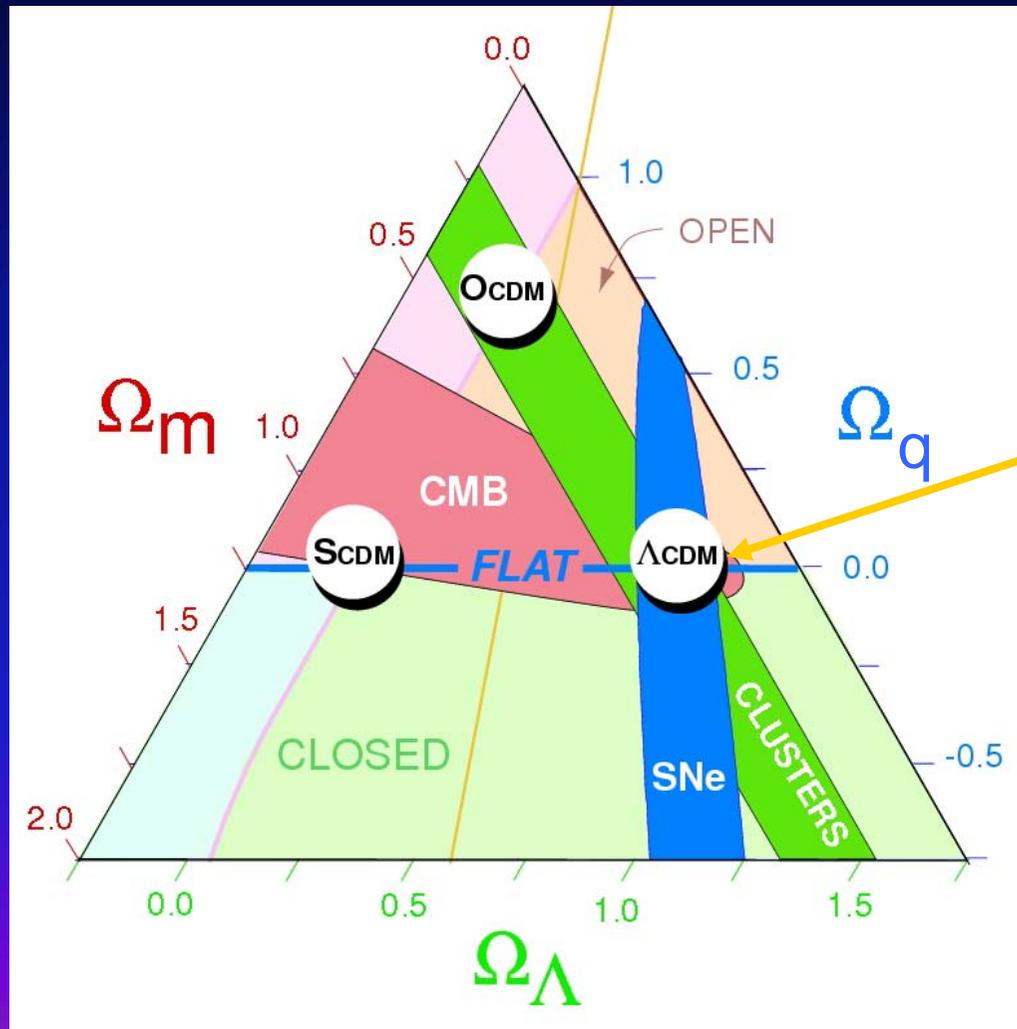
Leistungsspektrum der Temperaturanisotropie: Beobachtung



WMAP 2003

Das Λ -Cold Dark Matter Modell gibt die Beobachtungsdaten (fast) über den gesamten Winkelbereich hervorragend wieder!

Das kosmologische Dreieck: Beobachtung



$$\Omega_\Lambda \sim 0,7$$

$$\Omega_m \sim 0,3$$

$$\Omega_q \sim 0$$

Old Universe – *New* Numbers

WMAP Team, Spergel et al. 2003

Kosmologische Konstante

$$\Omega_{\Lambda} = 0,73 \pm 0,04$$

Kalte Dunkle Materie

$$\Omega_m = 0,27 \pm 0,04$$

„Normale“ Materie

$$\Omega_b = 0,044 \pm 0,004$$

Raumkrümmung

$$\Omega_q = 0,02 \pm 0,02$$

Temperatur

$$T_{\text{CMB}} = 2,725 \text{ K} \pm 0,002 \text{ K}$$

Hubble-Konstante

$$H_0 = (71 \pm 4) \text{ km/s/Mpc}$$

Weltalter

$$t_0 = 13,7 \text{ Gyr} \pm 200 \text{ Myr}$$

Entkopplung

$$t_{\text{dec}} = 379 \text{ kyr} \pm 8 \text{ kyr}$$

Old Universe – *New* Numbers

WMAP Team, Larson et al. 2011

Kosmologische Konstante

$$\Omega_{\Lambda} = 0,734 \pm 0.029$$

Kalte Dunkle Materie

$$\Omega_m = 0,222 \pm 0,026$$

„Normale“ Materie

$$\Omega_b = 0,0449 \pm 0,0028$$

Raumkrümmung

$$\Omega_q = 0,0023 \pm 0,0054$$

Temperatur

$$T_{\text{CMB}} = 2,7260 \text{ K} \pm 0,00057 \text{ K}$$

Hubble-Konstante

$$H_0 = (71 \pm 2,5) \text{ km/s/Mpc}$$

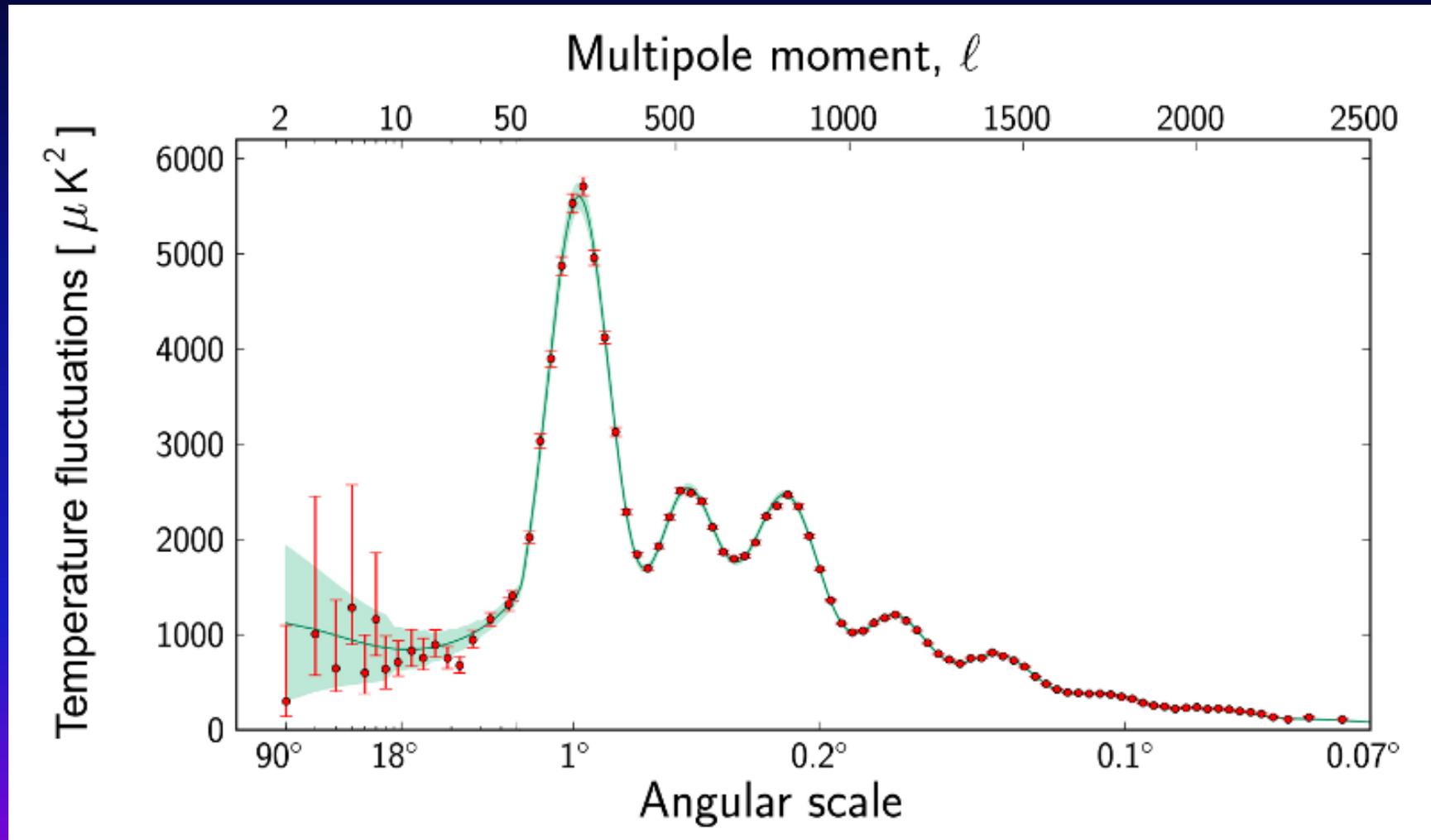
Weltalter

$$t_0 = 13,75 \text{ Gyr} \pm 130 \text{ Myr}$$

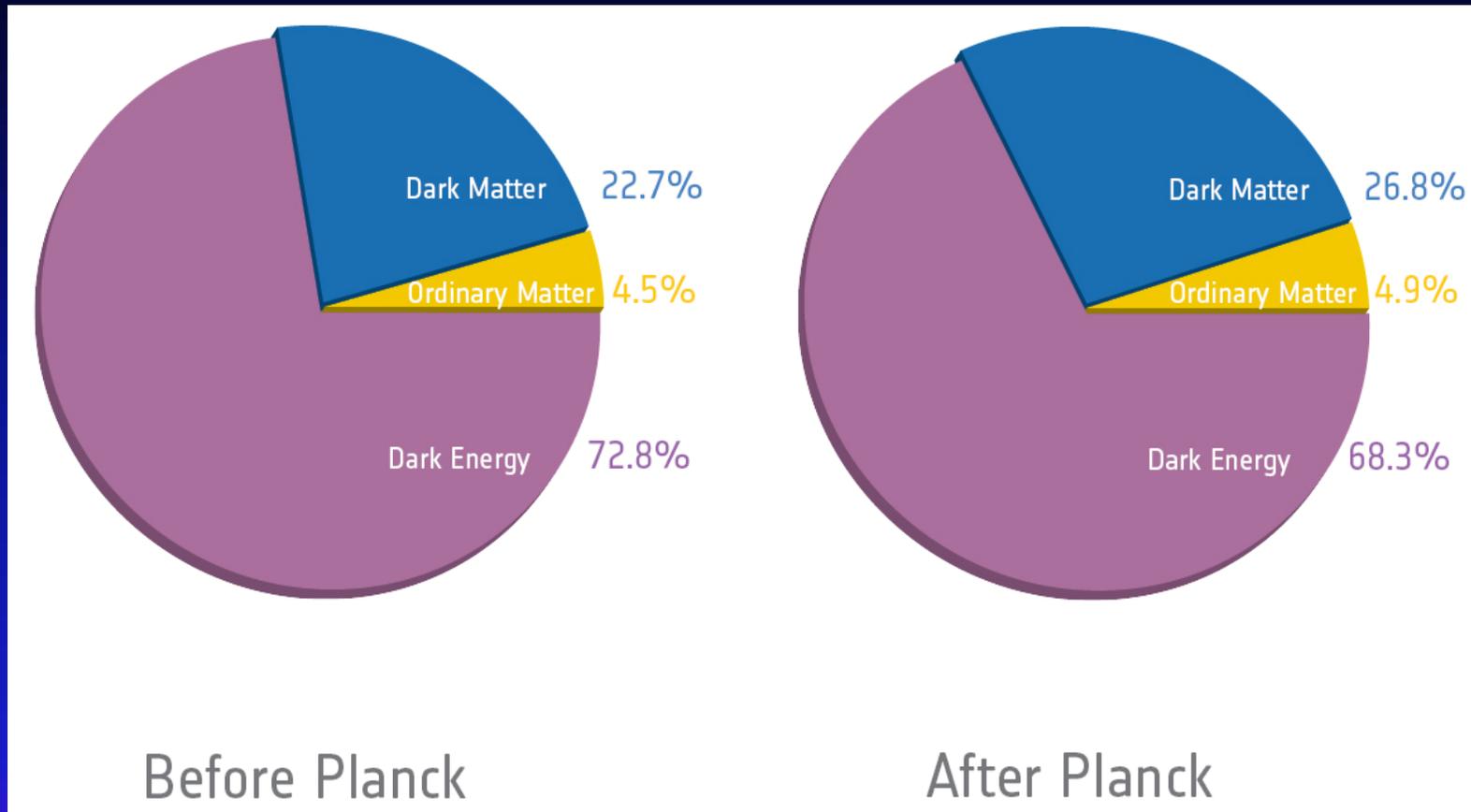
Entkopplung

$$t_{\text{dec}} = 379 \text{ kyr} \pm 8 \text{ kyr}$$

Planck-Winkelleistungsspektrum



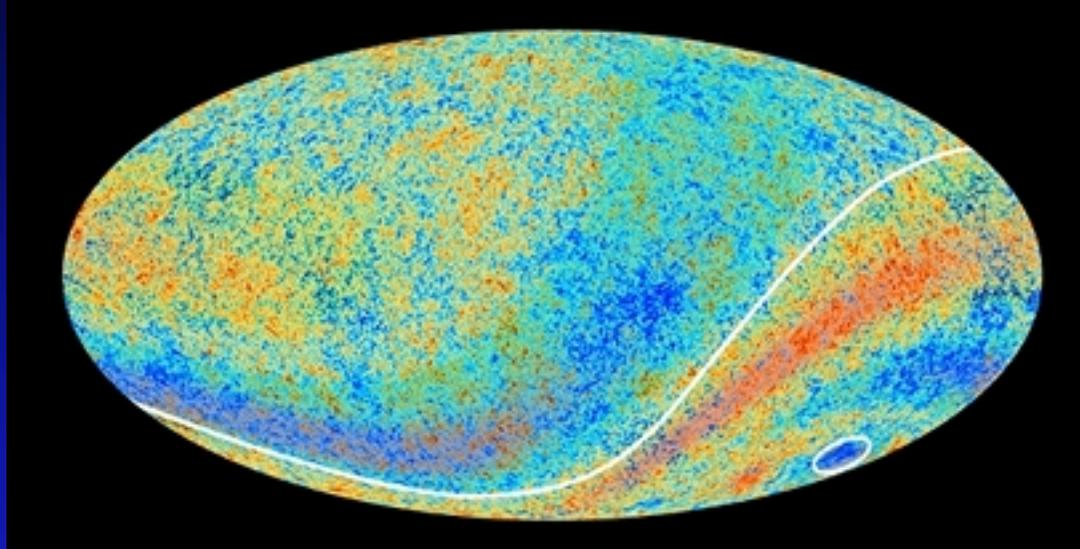
Neue Werte für die kosmologischen Parameter



$t_0 = 13,798 \text{ Gyr} \pm 37 \text{ Myr}$ (WMAP $13,75 \text{ Gyr} \pm 130 \text{ Myr}$)

$H_0 = (67,80 \pm 0,77) \text{ km/s/Mpc}$ (WMAP: $(71 \pm 2,5) \text{ km/s/Mpc}$)

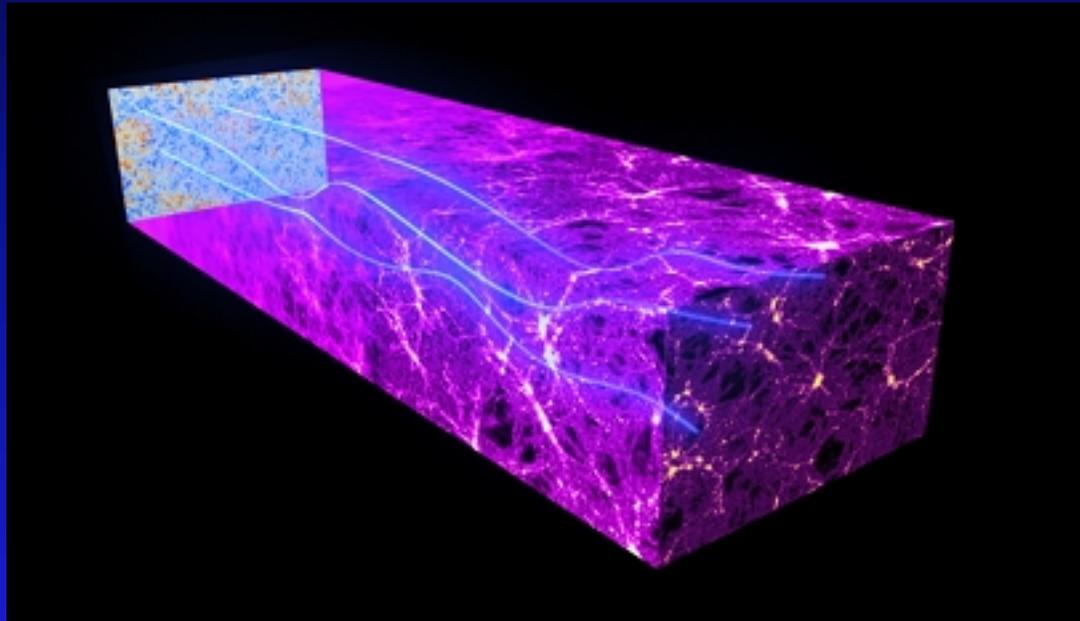
Das Universum hängt auf großen Skalen schief



Die Planck-Daten, mit Heiß-Kalt-Anomalien hervorgehoben

Temperaturabweichungen der gleichen Art nehmen einen großen Teil des Gesamthimmels ein: eine Seite des Himmels scheint wärmer als der Rest, und enthält einen kalten „Spot“.

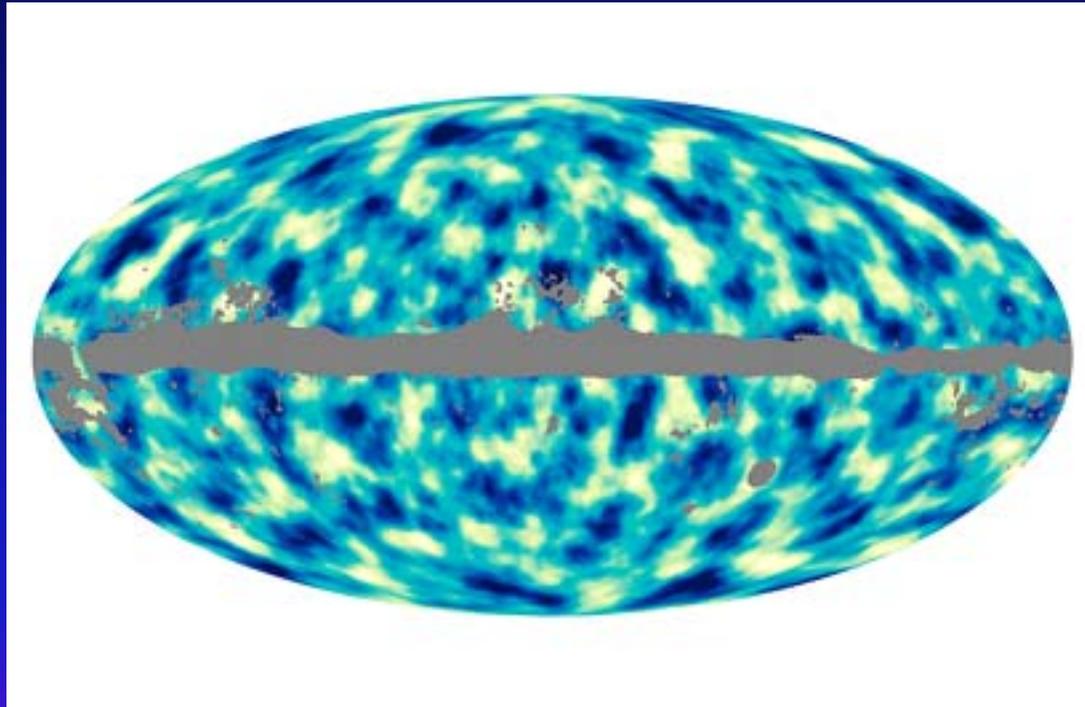
Ablenkung von Photonbahnen durch Massenansammlungen



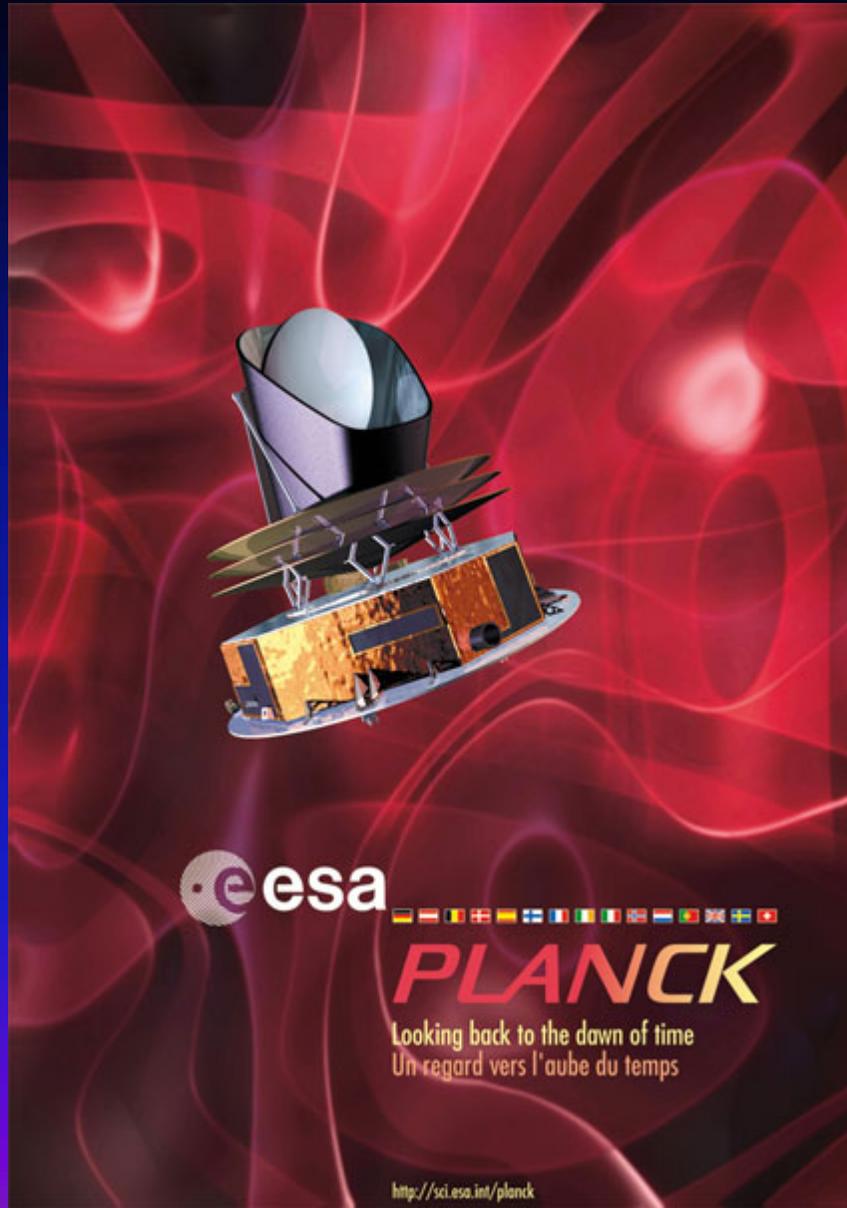
Planck-Kollaboration 2013

Winzige Verzerrungen der Photonenbahnen durch die Ablenkung an massereichen kosmischen Strukturen, überwiegend Dunkler Materie

Erste Himmelskarte mit der Verteilung der Dunklen Materie im Universum



Planck 2013



esa



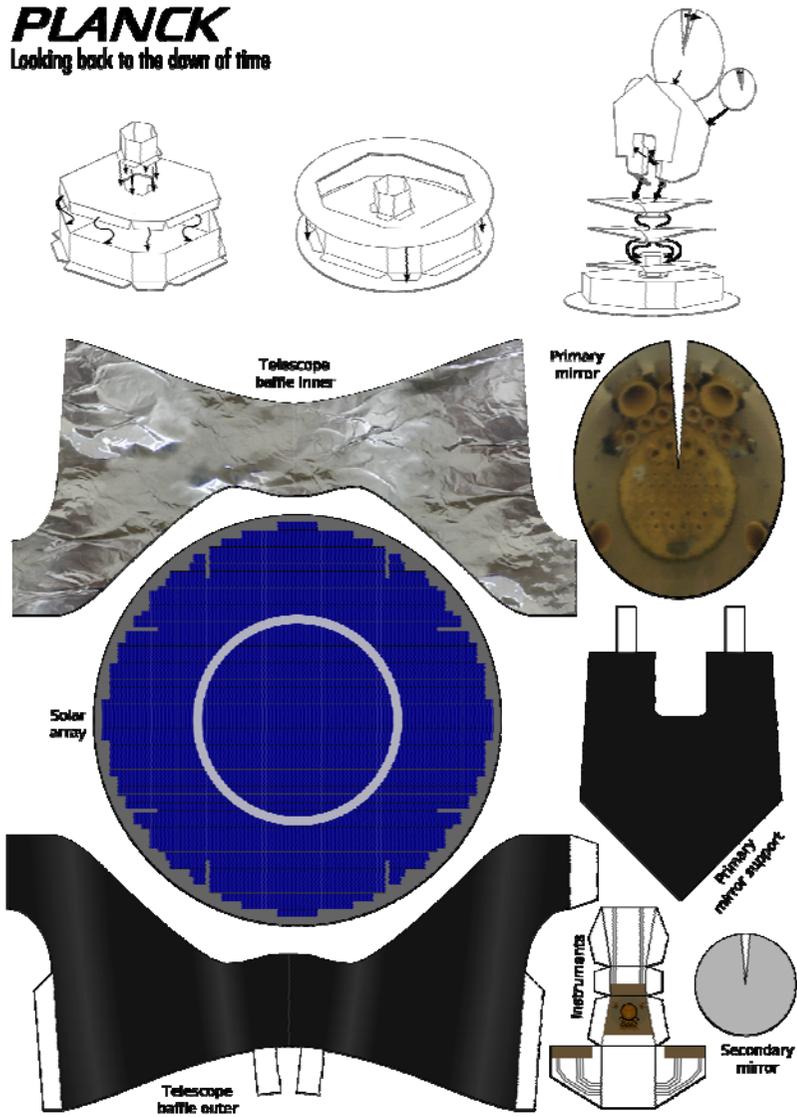
PLANCK

Looking back to the dawn of time
Un regard vers l'aube du temps

<http://sci.esa.int/planck>

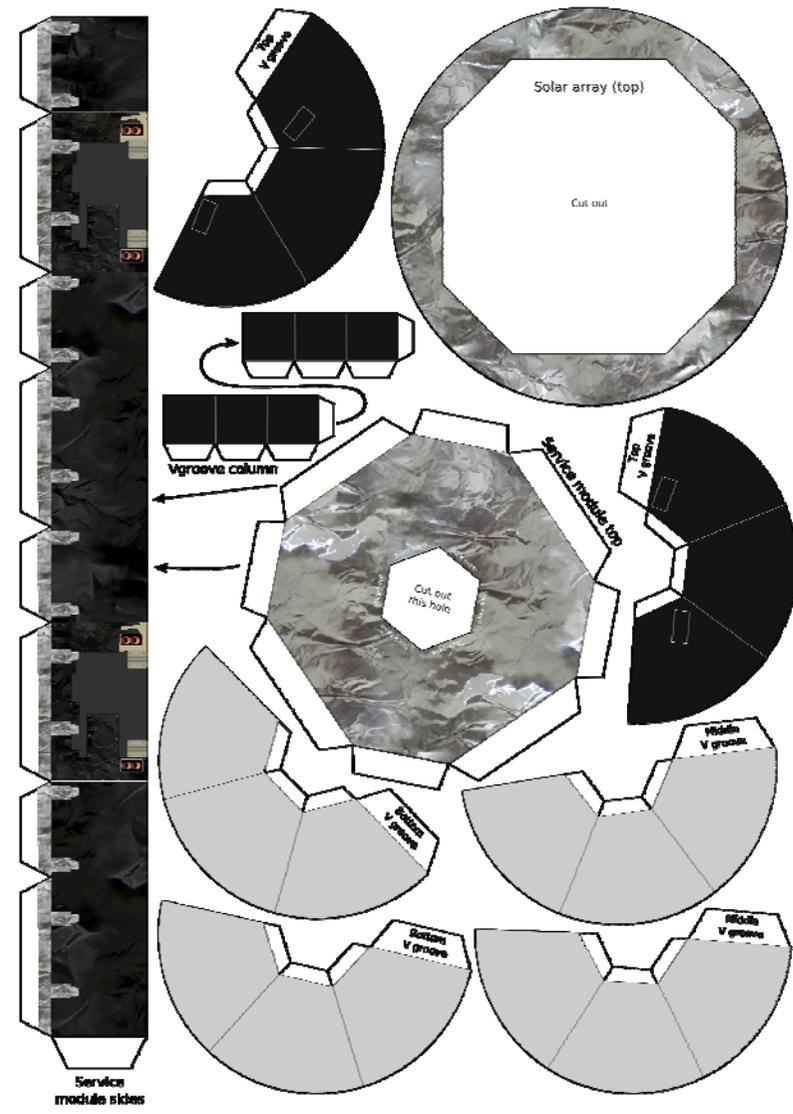
Der Planck-Satellit zum Selberbasteln

PLANCK
Looking back to the dawn of time



page 1

plancktelescope.org.uk



page 2

plancktelescope.org.uk

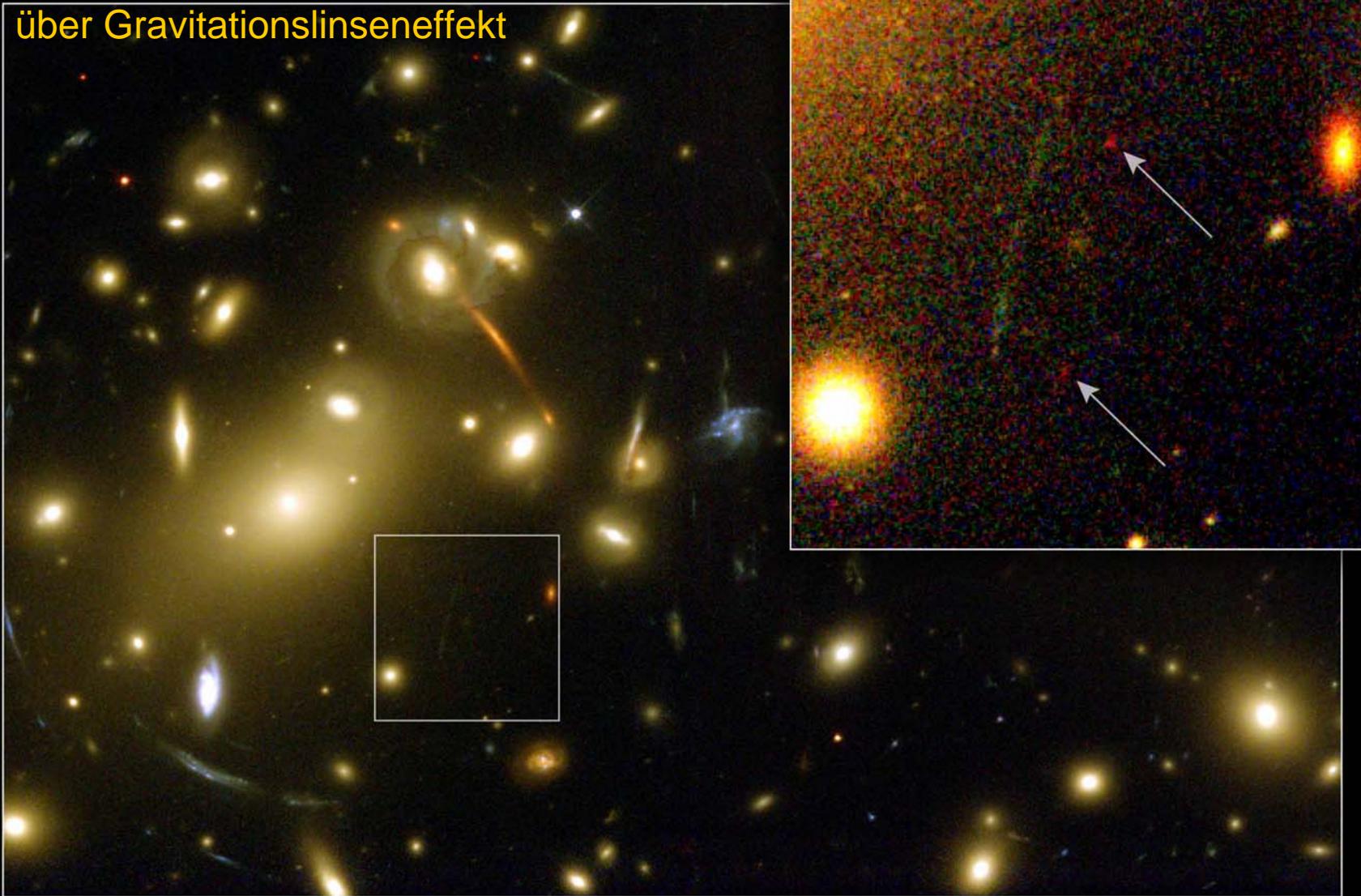
plancktelescope.org.uk

Galaxienhaufen als Sonden für Dunkle Materie

- Die größten Verdichtungen von Materie in der großräumigen Struktur des Universums:
 $10^3 - 10^4$ Galaxien, $M \sim 10^{14} - 10^{15}$ Sonnenmassen,
optische und intensive Röntgen-Strahler
- Masse bestimmbar über Gravitationslinseneffekt

Coma-Haufen

Bestimmung der Masse von Galaxienhaufen
über Gravitationslinseneffekt



Distant Object Gravitationally Lensed by Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2

Galaxienhaufen als Sonden für Dunkle Materie

- Die größten Verdichtungen von Materie in der großräumigen Struktur des Universums:
 $10^3 - 10^4$ Galaxien, $M \sim 10^{14} - 10^{15}$ Sonnenmassen,
optische und intensive Röntgen-Strahler
- Masse bestimmbar über Gravitationslinseneffekt

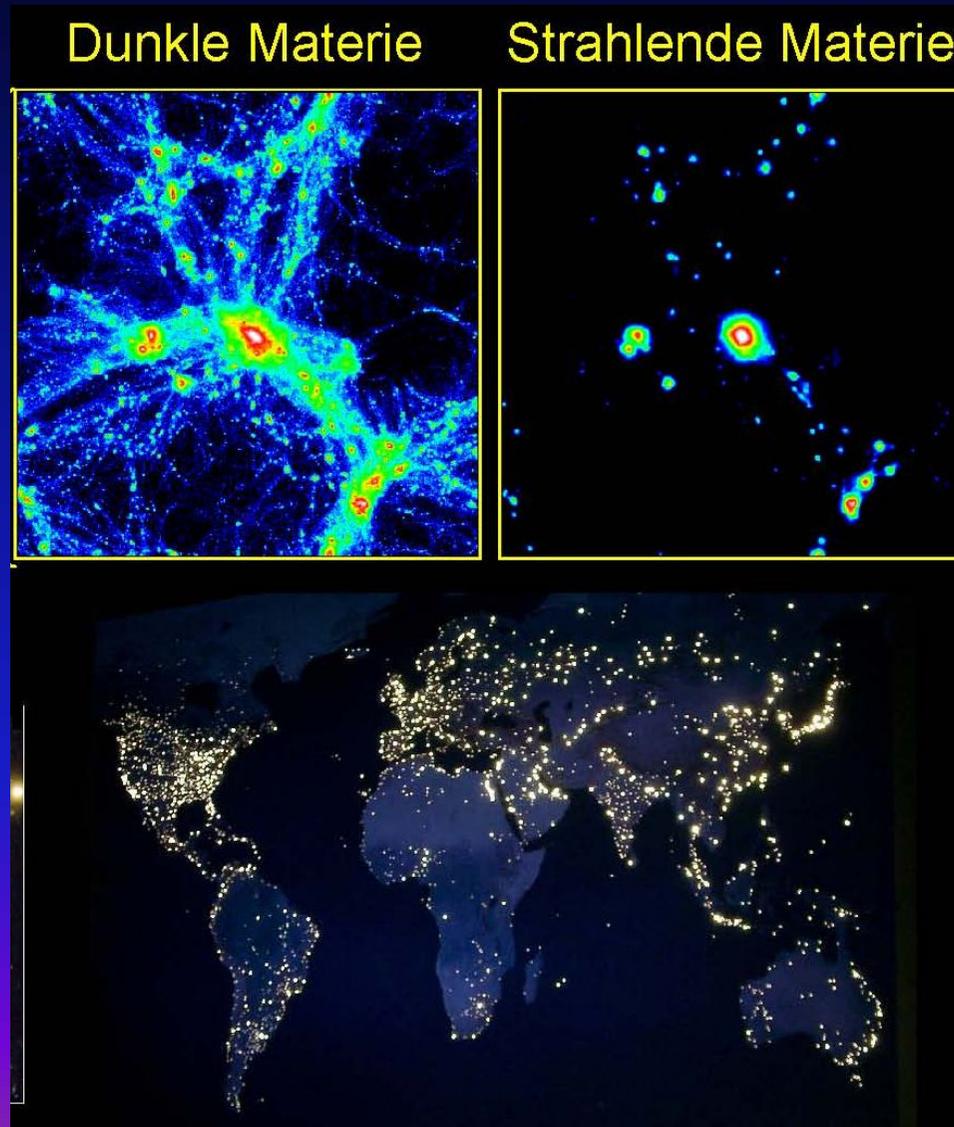
Ergebnis: die sichtbare Masse reicht für die Größe der beobachteten Lichtablenkungen nicht aus

Es muss noch dunkle Materie vorhanden sein!

Das im Röntgenbereich sichtbare heiße Gas verrät die es bindende dunkle Materie.

Coma-Haufen

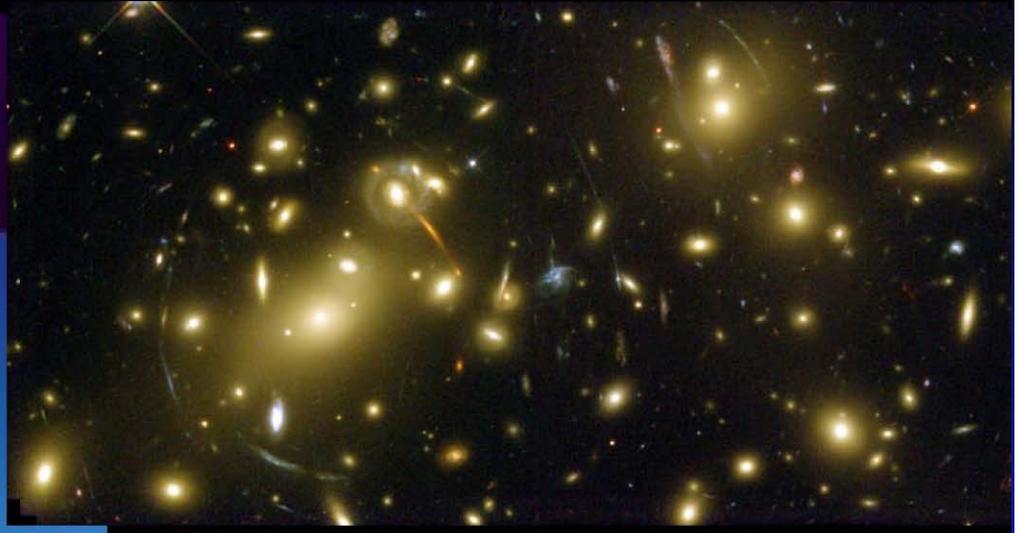
Galaxienhaufen verraten die Dunkle Materie



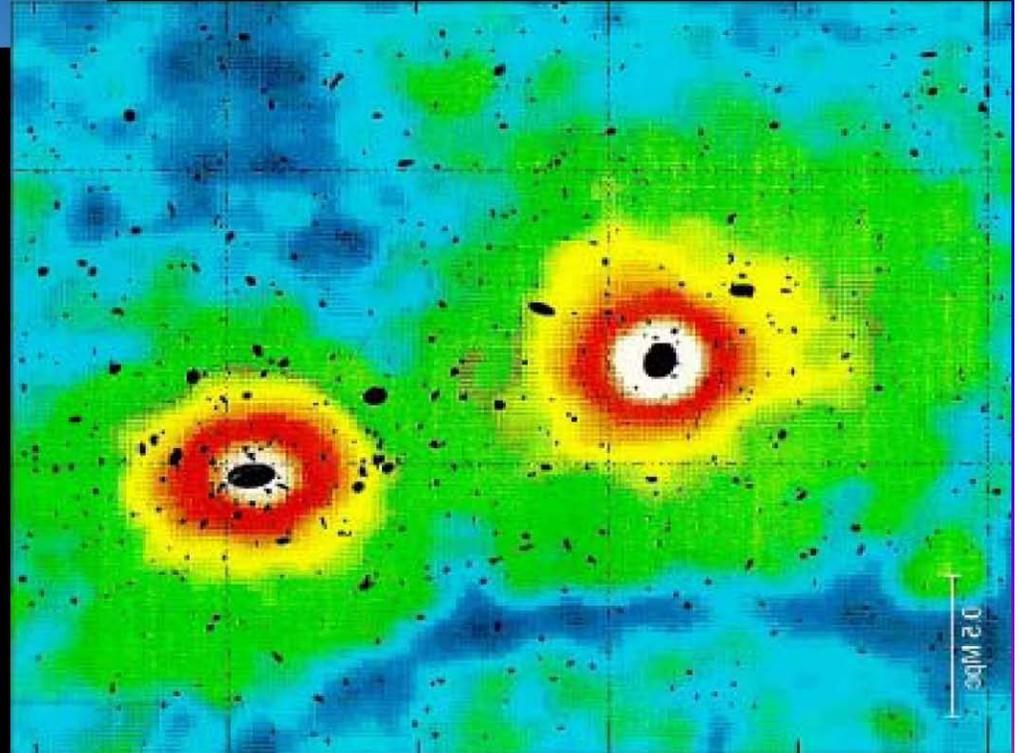
Quelle: Hasinger, MPE

Galaxienhaufen als Röntgenquellen

Potentialwannen der Dunklen Materie sind mit heißem Gas gefüllt



Merger von zwei Haufen in dem System Abell 3528 beobachtet mit ROSAT
ROSAT: Röntgenemission in Falschfarben, optische Galaxien in Schwarz (Schindler 2002)



Quelle: Hasinger, MPE

Dunkle Materie:

5/6 der Materie im Universum

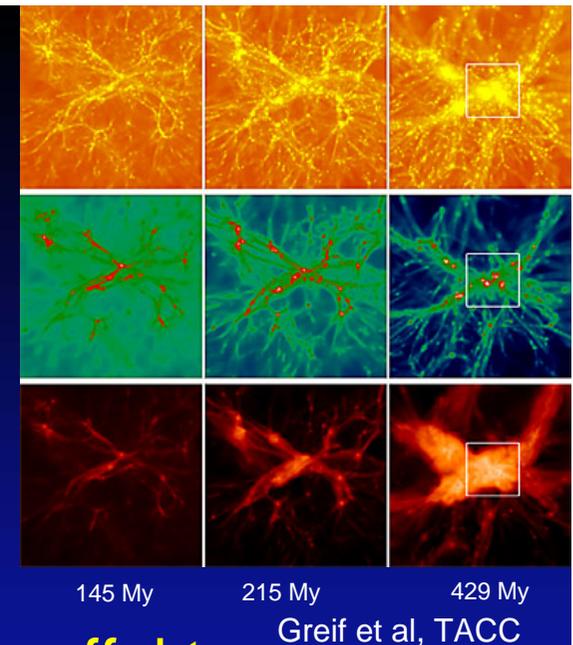
wechselwirkt nicht elektromagnetisch,
emittiert und absorbiert kein Licht

wechselwirkt via Gravitation, klumpt

nachweisbar u. a. durch Gravitationslinseneffekt:
großräumige Verteilung im Universum messbar, bei
verschiedenen z , daher als Funktion der Zeit,

Woraus besteht sie? Kandidaten:

- WIMPS – weakly interacting massive particles,
- Leichteste supersymmetrische Teilchen, Axionen
- Primordiale Schwarze Löcher



Dunkle Energie: ein kosmisches Rätsel

- homogene Verteilung, völlig strukturlos, in perfekter Gleichförmigkeit über das Universum verteilt
- keine Teilchen, kein Klumpen
- negativer Druck, dominiert heute und in der Zukunft die Expansion des Universums

Was ist sie?

- **Kosmologische Konstante ?**

konstante Energiedichte der Quantenfluktuationen des Vakuums, $\Lambda \sim (m_{\text{Planck}})^4$, aber 10^{-124} mal zu klein,

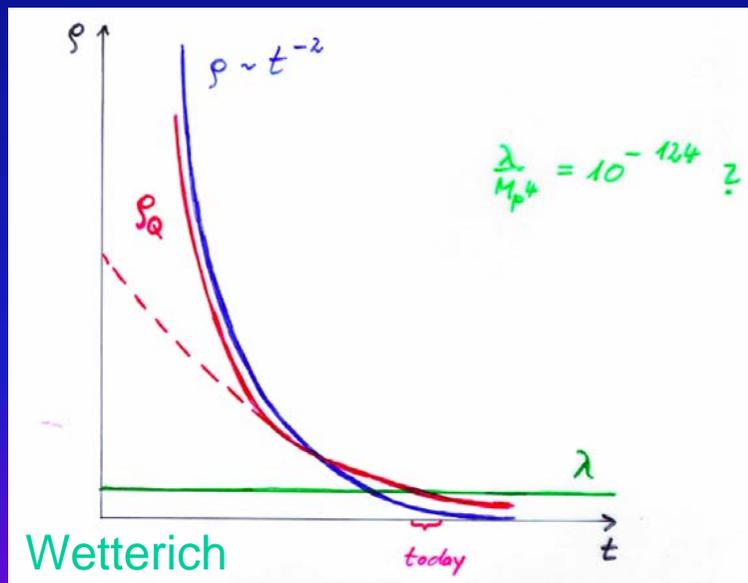
Problem der Kleinheit von Λ , warum so klein, dass sie gerade heute wichtig ist?



Dunkle Energie, ein kosmisches Rätsel

- **zeitlich veränderliche dunkle Energie ?**

Durch ein Skalarfeld beschriebene Wechselwirkung, deren homogen verteilte potentielle und kinetische Energie sich über kosmologische Zeiten wie andere Energieformen verringert, („Kosmon“, „Quintessenz“)



Kosm. Konstante statisch, Quintessenz dynamisch

Es gibt eine Vielzahl von Quintessenzmodellen, die mit den Beobachtungen verträglich sind, theoretische Unsicherheit groß. (DUO)

- **Alternative: Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie muss für kosmische Skalen modifiziert werden.**

„Wir sind schon sehr weit in den Weltraum vorgedrungen. Aber mit zunehmender Entfernung schwindet unser Wissen, bis wir am fernsten dunklen Horizont nach Wegzeichen suchen. Die Suche wird weitergehen. Dieser Drang ist älter als die Geschichte. Er ist noch nicht gestillt, und wird sich auch nicht unterdrücken lassen.“

Edwin Hubble, 1953

ENDE