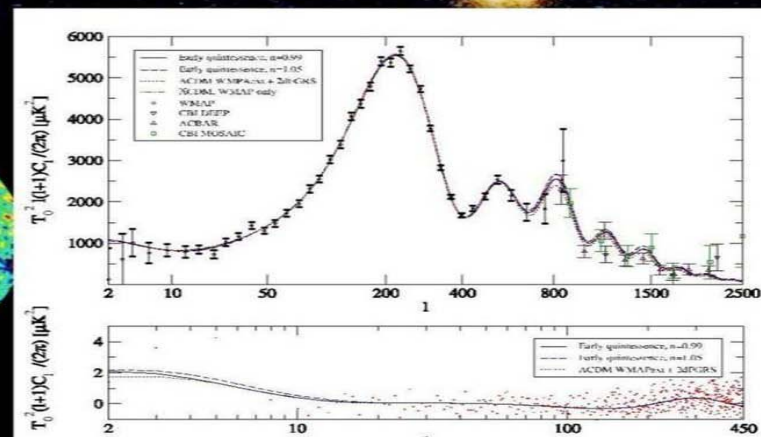
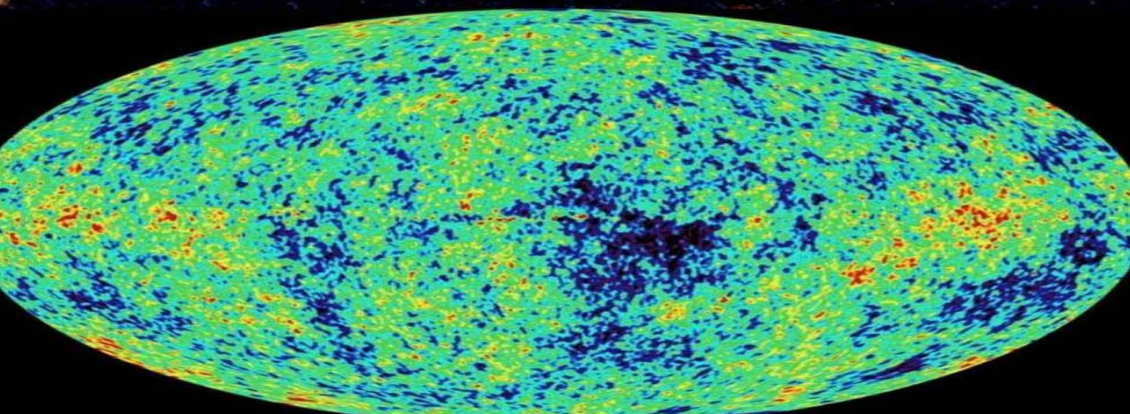


Urknall und Dunkle Energie- über Anfang und Ende des Universums



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

Signale des Urknalls

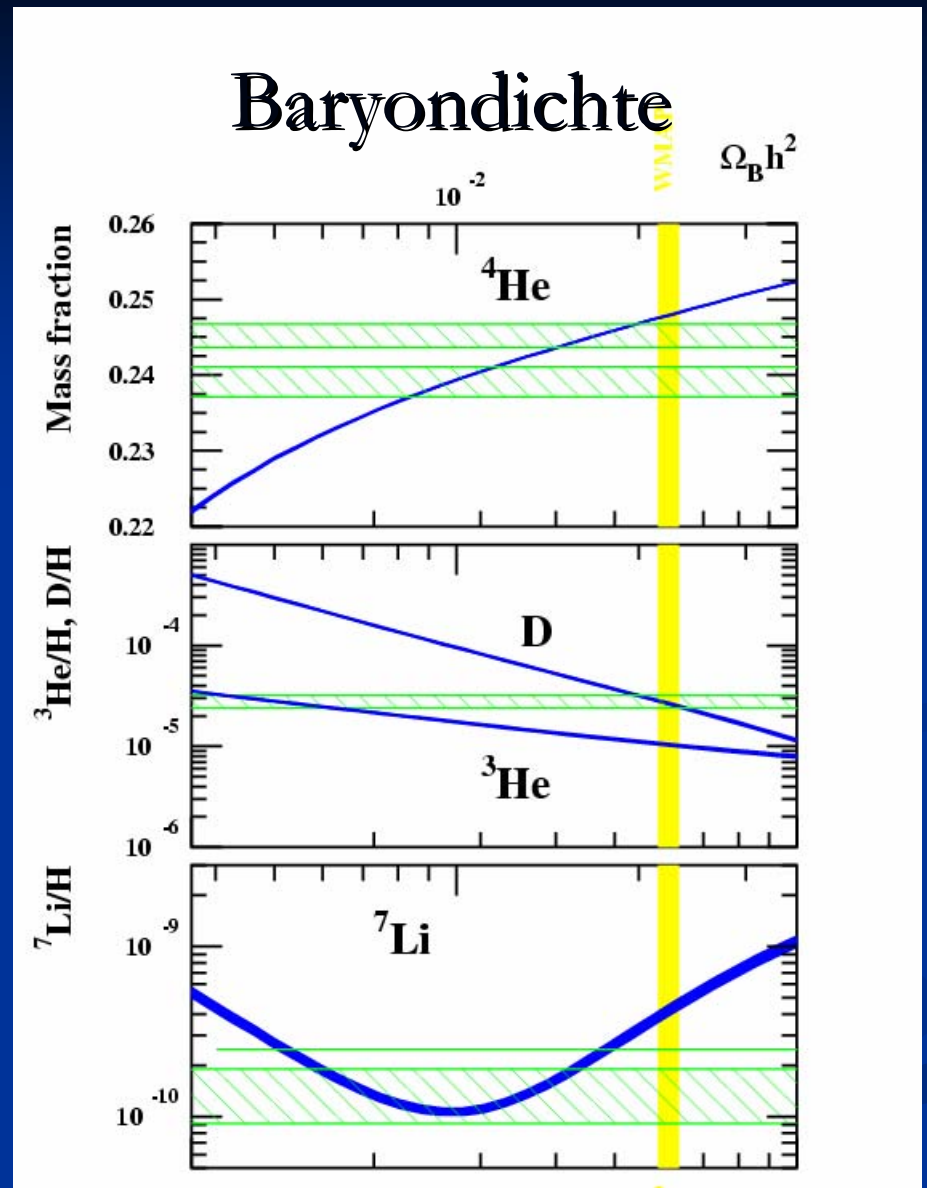
■ Hintergrundstrahlung

Fiat lux (400 000 Jahre nach Urknall)

■ Primordiale Elementsynthese (Nucleosynthese)

Beginn der Chemie (10 Minuten ab)

Primordiale
Häufigkeiten der
leichten Elemente
aus der
Nukleosynthese



WMAP

A.Coc

Präzise Bestätigung unseres Verständnisses der Physik und Kosmologie

Beispiel : auch vor 13.7 Milliarden Jahren
hatten die Konstanten der Physik die
(fast) gleichen Werte

typische mögliche Werte der
Variation der Feinstrukturkonstanten:

$$\Delta\alpha/\alpha (z=10^{10}) = -1.0 \cdot 10^{-3} \quad \text{GUT 1}$$

$$\Delta\alpha/\alpha (z=10^{10}) = -2.7 \cdot 10^{-4} \quad \text{GUT 2}$$

C.Mueller,G.Schaefer,...

Anteil der Atome an der Energiedichte des Universums

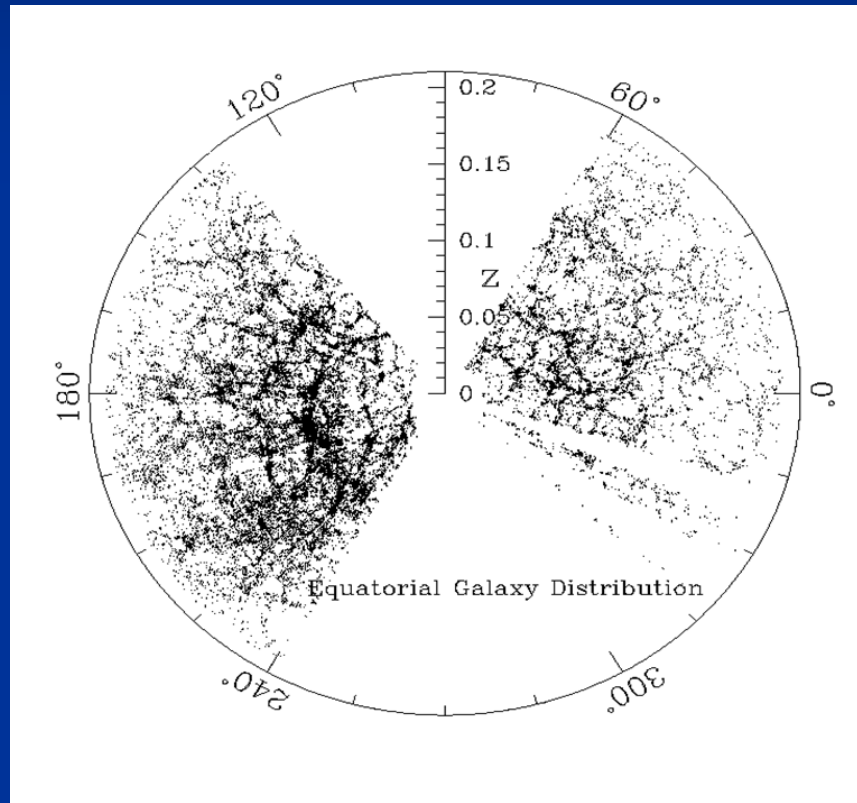
$$\Omega_b = 4.5 \%$$

Aus Nukleosynthese,
Kosmischer Hintergrundstrahlung

Baryonen/Atome

SDSS

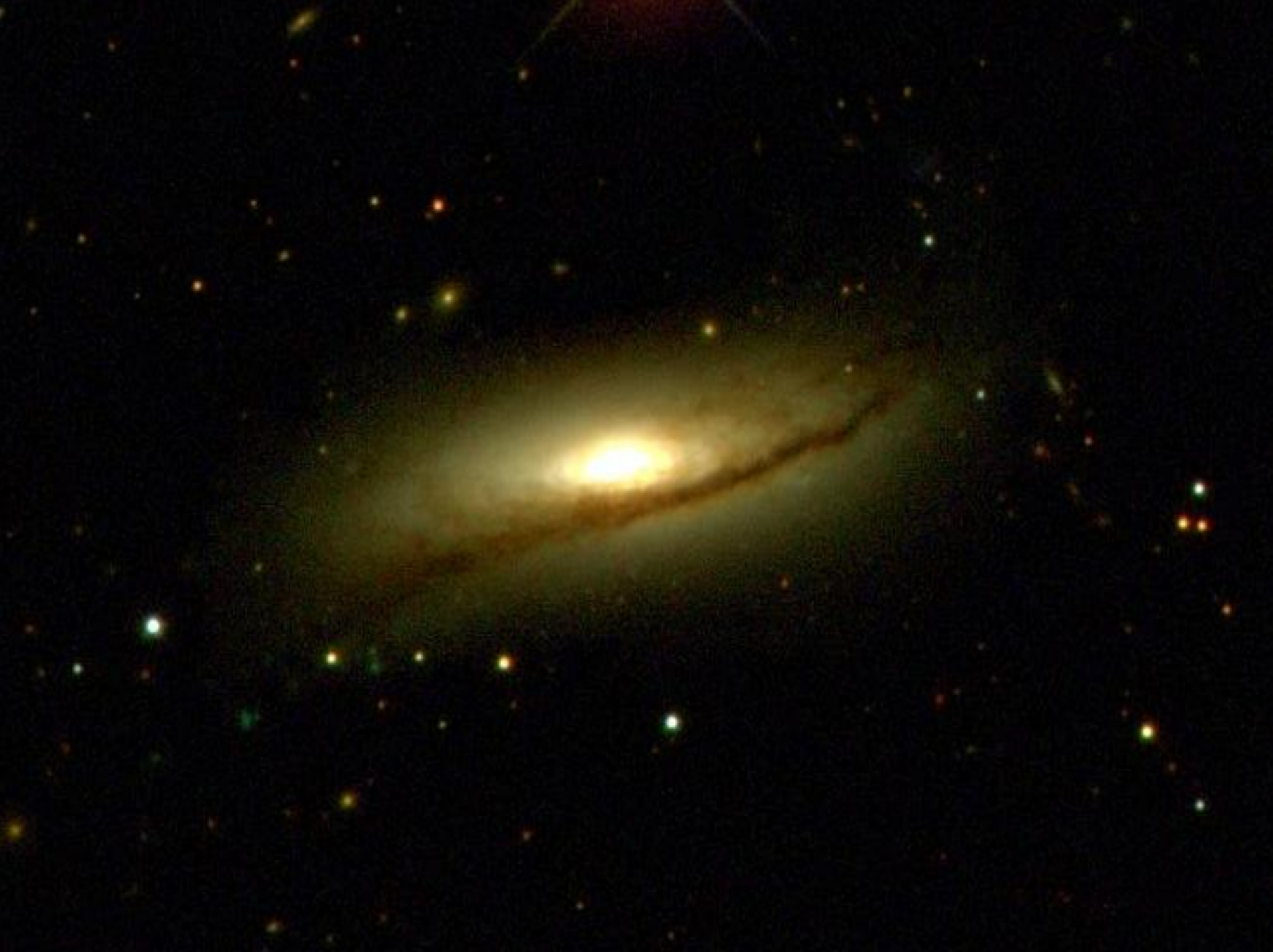
~60,000 von
>300,000
Galaxien



- Staub
- $\Omega_b = 0.045$
- Nur 5 Prozent unseres Universums bestehen aus bekannter Materie !



Abell 2255 Cluster
~300 Mpc



**Woraus besteht unser
Universum ?**



Quintessenz !

Feuer , Luft,
Wasser,
Erde !

Zusammensetzung des Universums

$$\Omega_b = 0.05$$

$$\Omega_{\text{dm}} = 0.2$$

$$\Omega_h = 0.75$$

Kritische Dichte

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

Kritische Energiedichte des
Universums

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

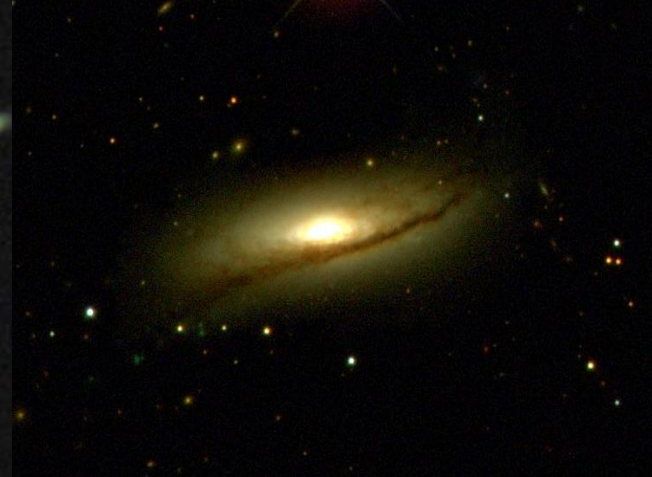
H : Hubble Parameter $H = \dot{a}/a$)

- $\Omega_b = \rho_b / \rho_c$


Anteil der Baryonen an der (kritischen)
Energiedichte

Materie :

Alles , was klumpt



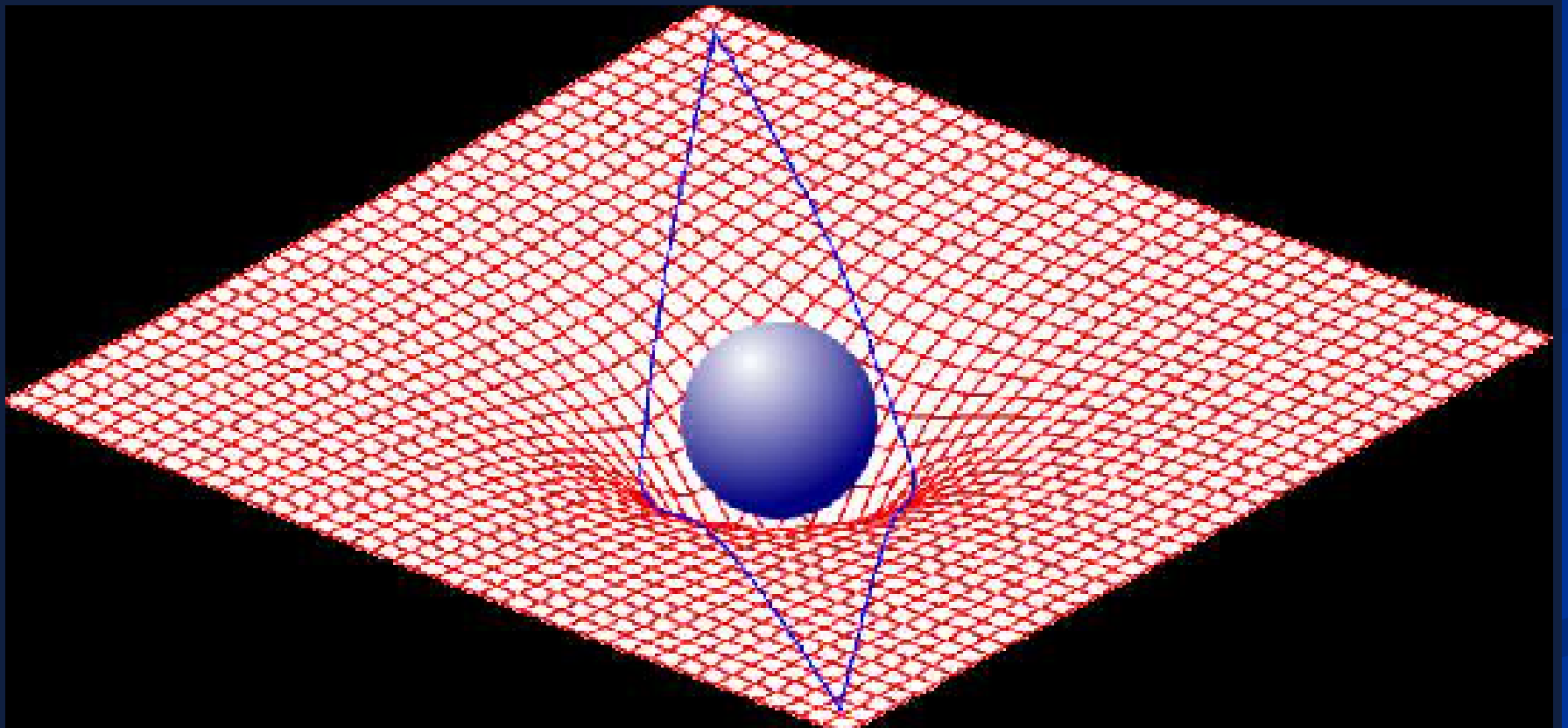
Dunkle Materie

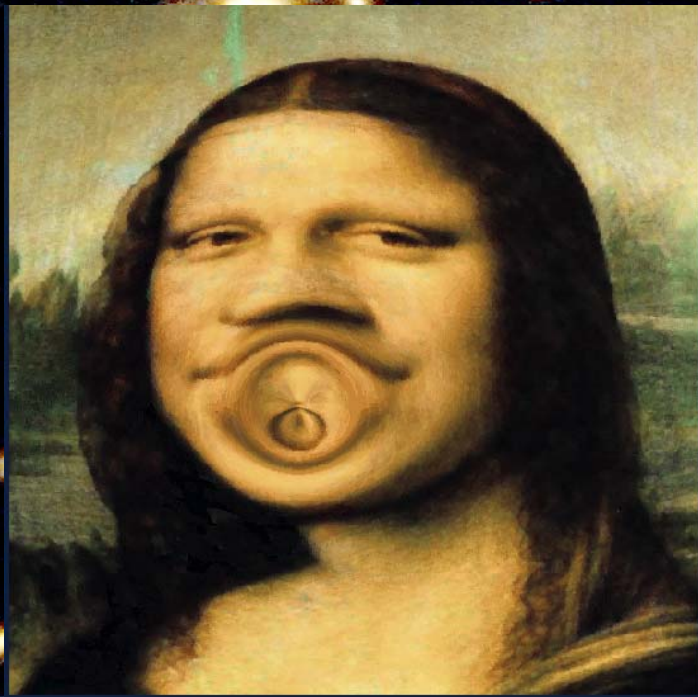
- $\Omega_m = 0.25$ “Materie” insgesamt
- Die meiste Materie ist dunkel !
- Bisher nur durch Gravitation spürbar
- Alles was klumpt!  Gravitationspotential



Gravitationslinse, HST

Lichtstrahlen werden durch Massen abgelenkt





Gravitationslinse, HST

Dunkle +
baryonische Materie :

Alles was klumpt !

$$\Omega_m = 0.25$$

Räumlich flaches Universum

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

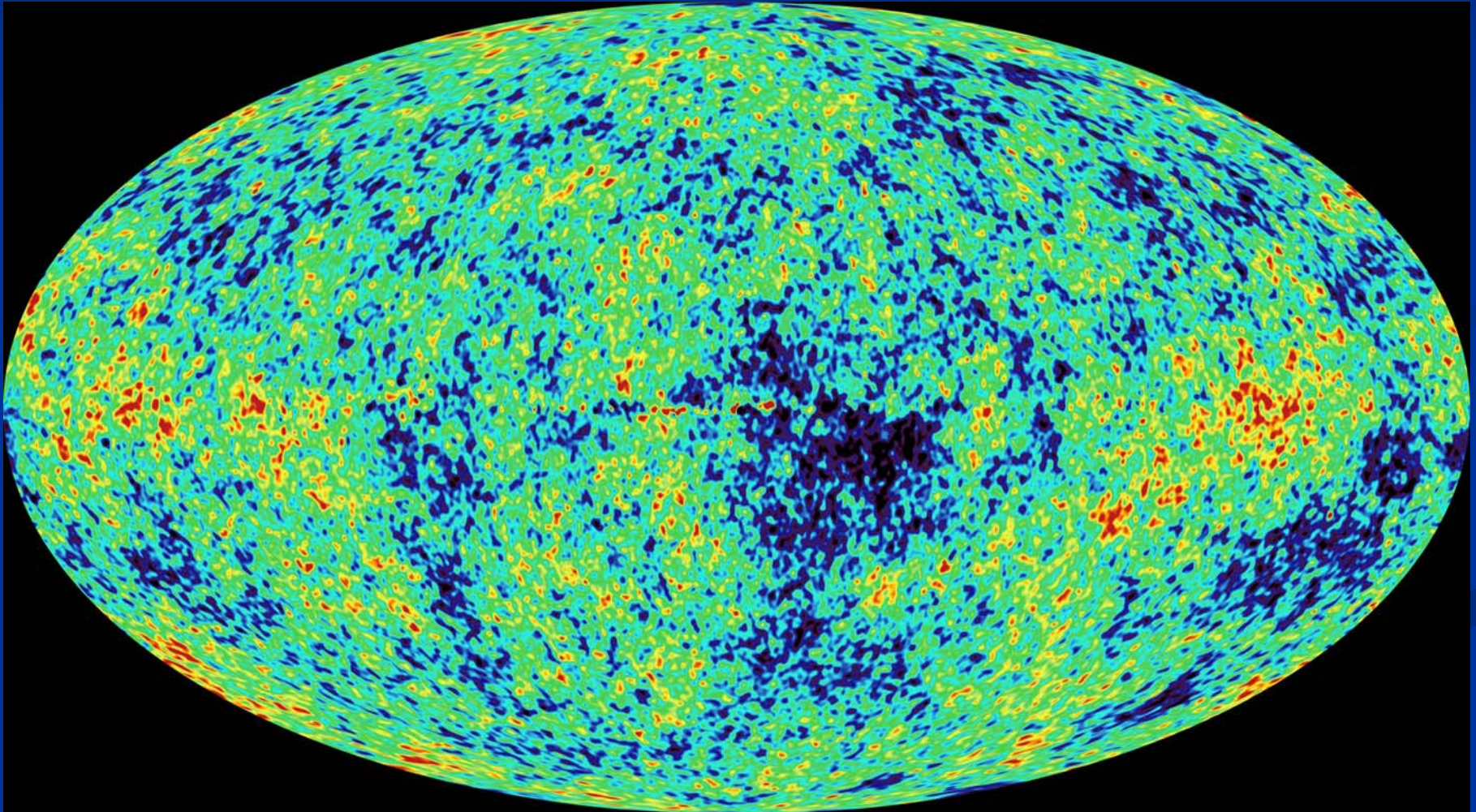
- Theorie (Inflationäres Universum)

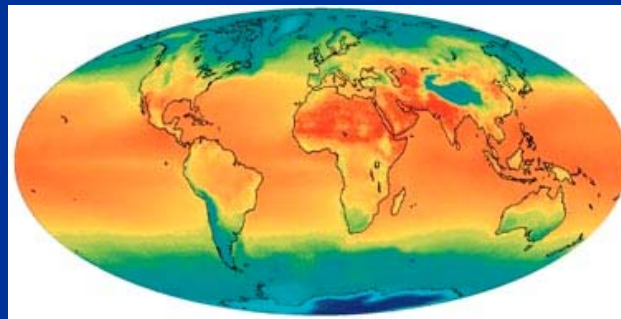
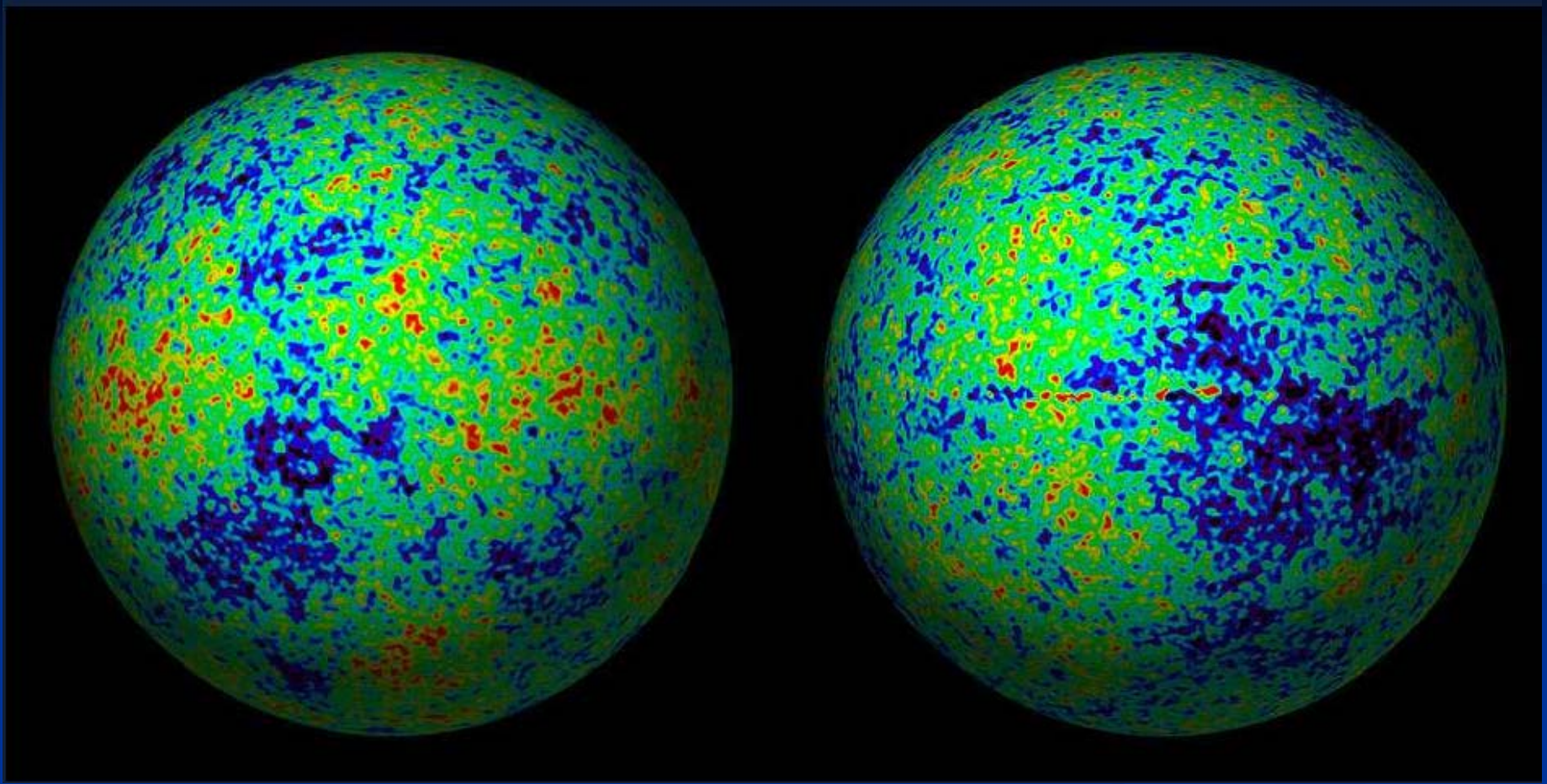
$$\Omega_{\text{tot}} = 1.0000\dots\dots\dots x$$

- Beobachtung (WMAP)

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02 (0.02)$$

Foto des Urknalls





Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

*A partnership between
NASA/GSFC and Princeton*

Science Team:

NASA/GSFC

Chuck Bennett (PI)

Michael Greason

Bob Hill

Gary Hinshaw

Al Kogut

Michele Limon

Nils Odegard

Janet Weiland

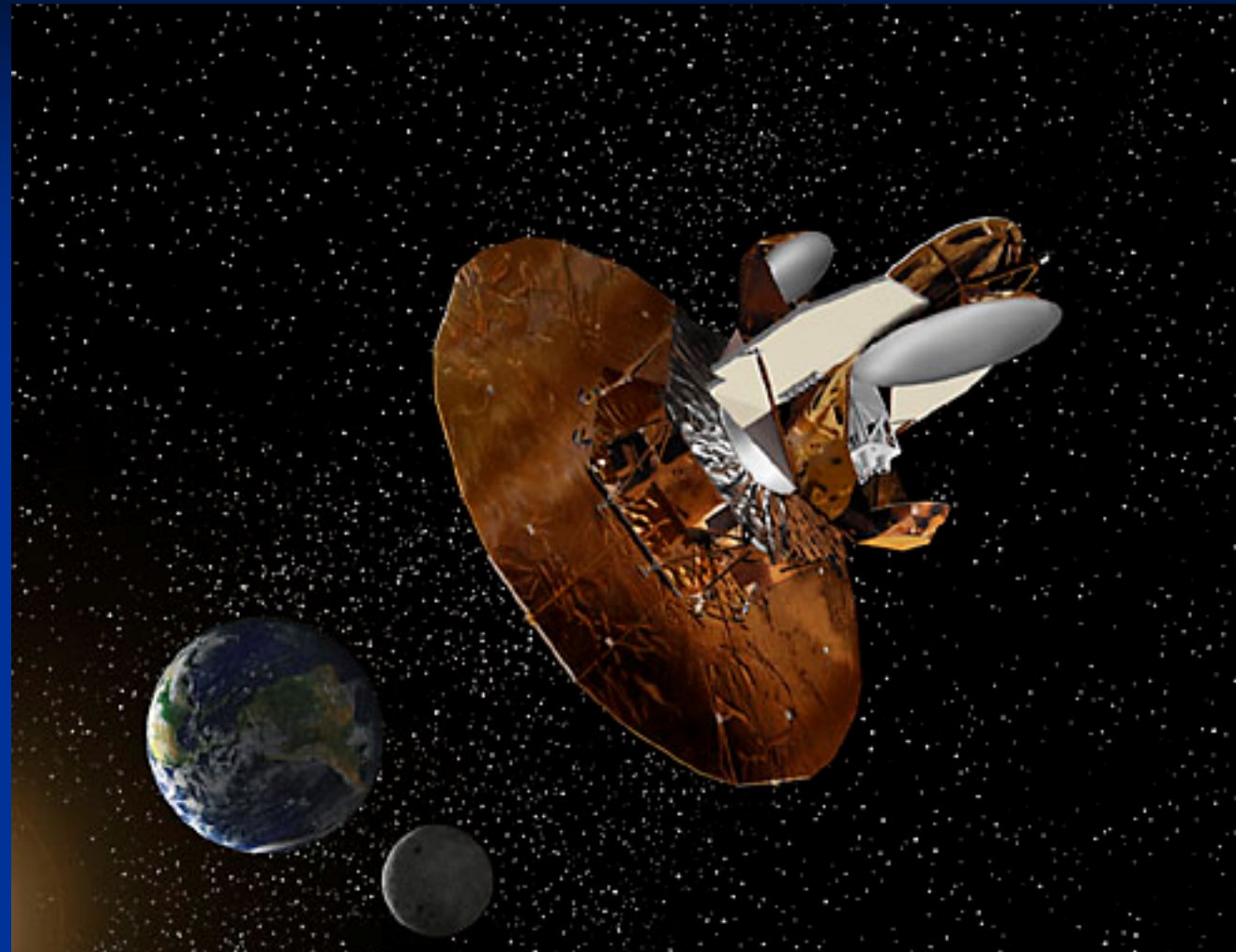
Ed Wollack

Brown

Greg Tucker

UCLA

Ned Wright



UBC

Mark Halpern

Chicago

Stephan Meyer

Princeton

Chris Barnes

Norm Jarosik

Eiichiro Komatsu

Michael Nolte

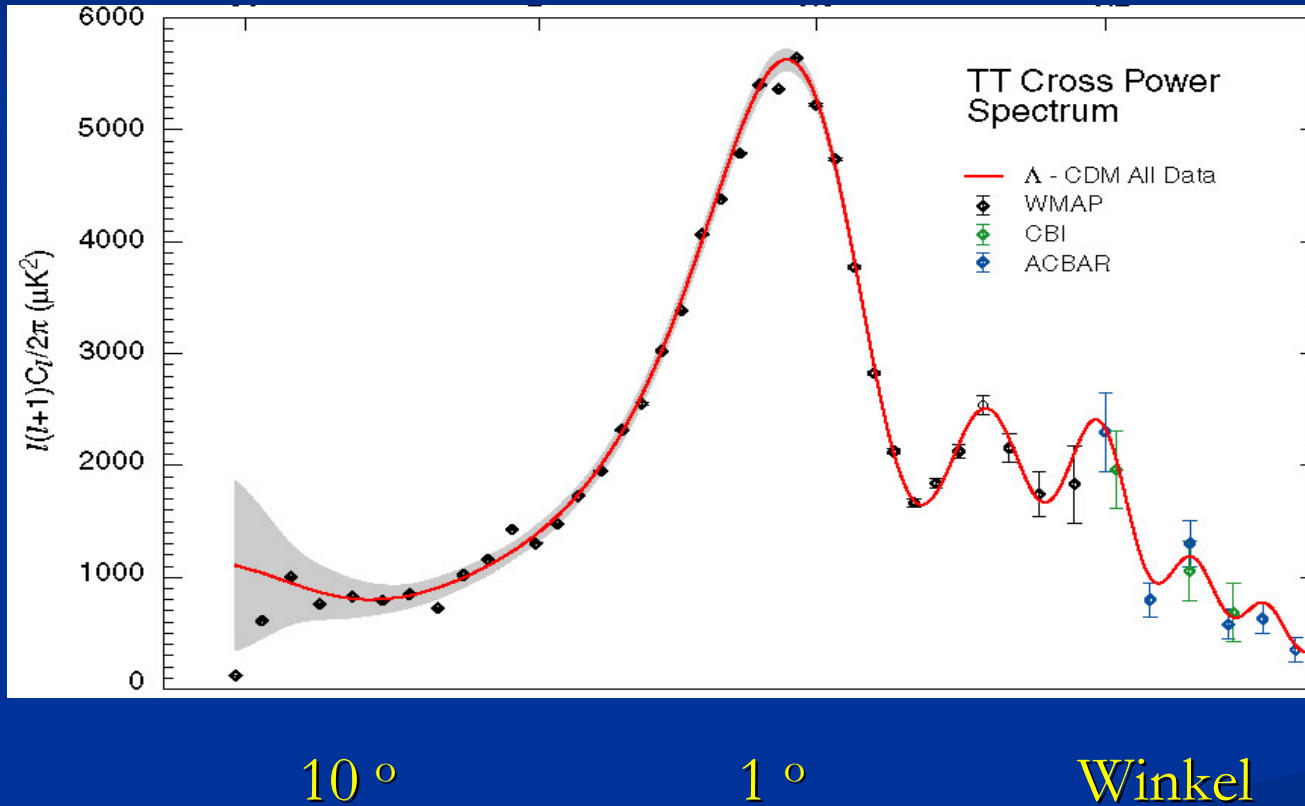
Lyman Page

Hiranya Peiris

David Spergel

Licia Verde

Anisotropie der Hintergrundstrahlung



Mittelwerte

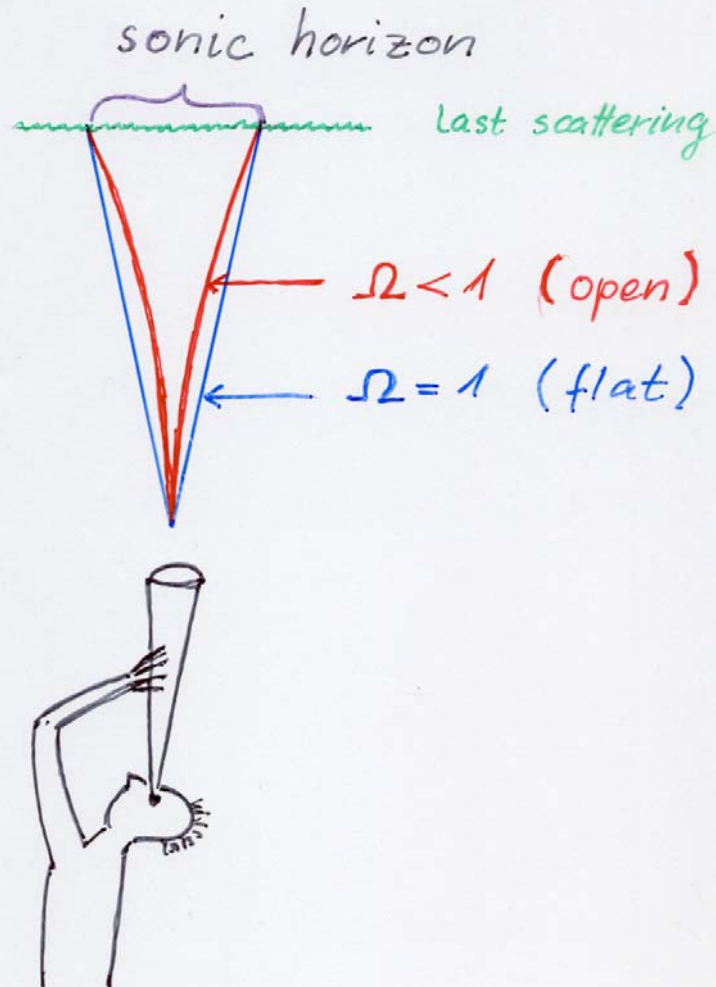
$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02$$

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

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

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

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



Dunkle Energie

$$\Omega_m + X = 1$$

$$\Omega_m : 25\%$$

$$\Omega_h : 75\%$$

Dunkle Energie

h : homogen , oft auch Ω_Λ statt Ω_h

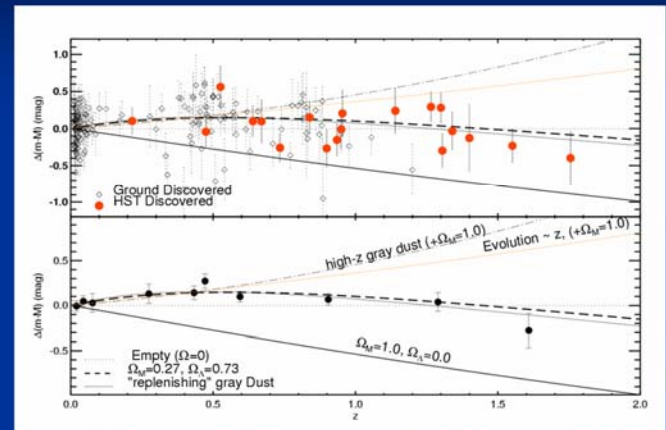
Dunkle Energie :

homogen verteilt

Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

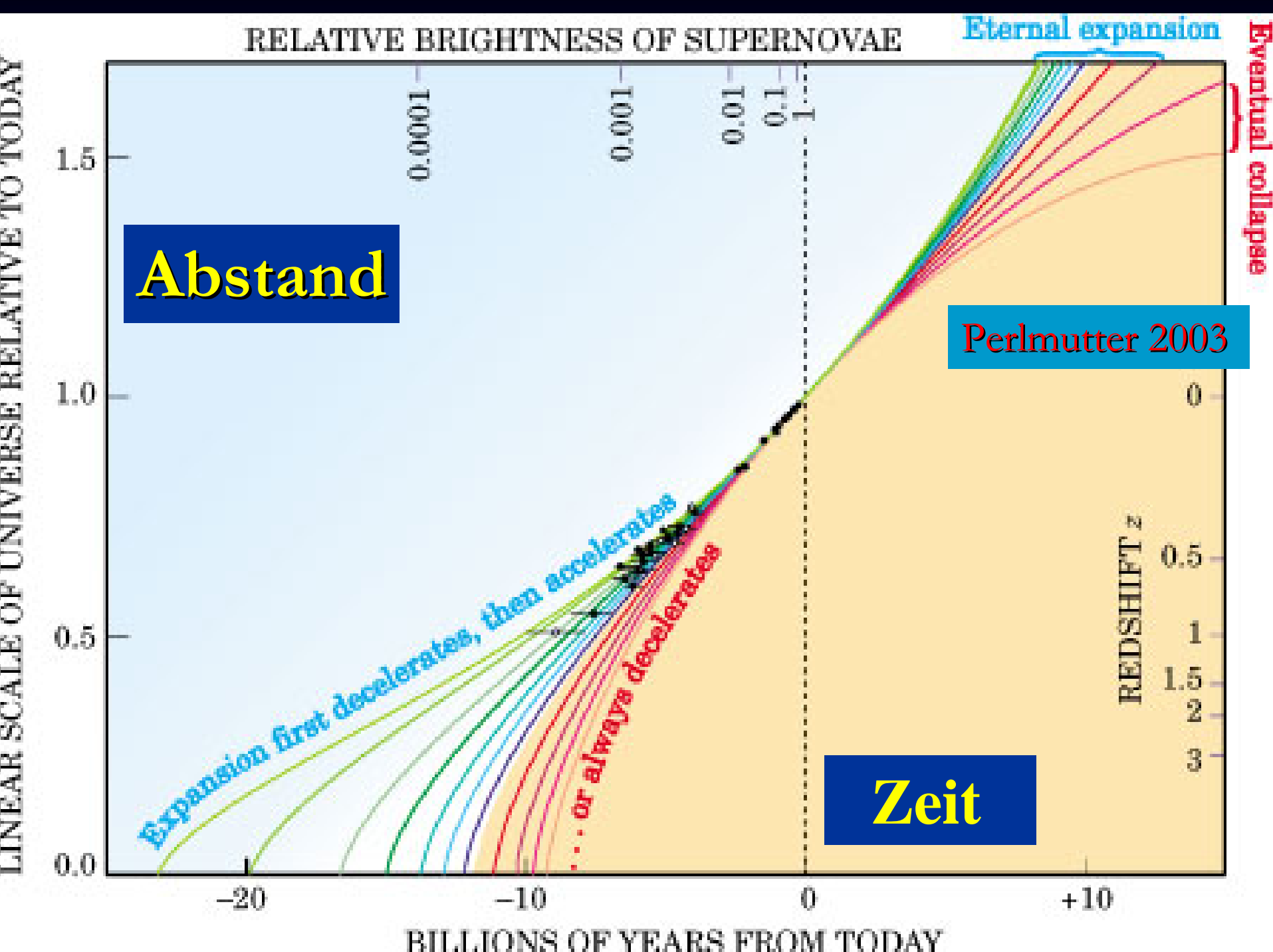
*Die Expansion des Universums
beschleunigt sich heute !*

Supernova Ia Hubble-Diagramm

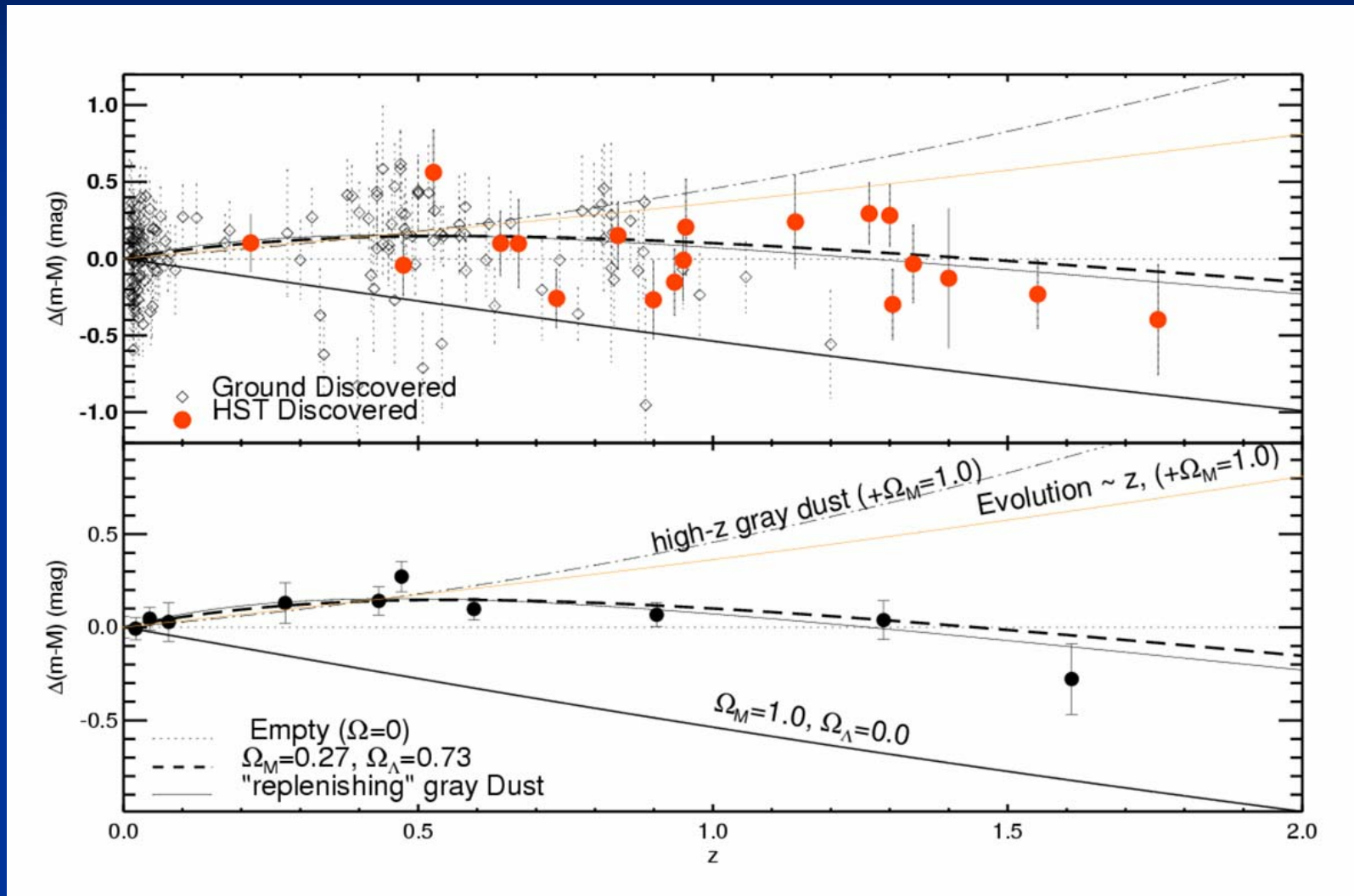


Rotverschiebung z

Riess et al. 2004



Supernova Ia Hubble-Diagramm

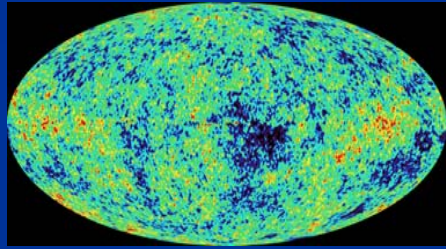


Rotverschiebung z

Riess et al. 2004

Strukturbildung

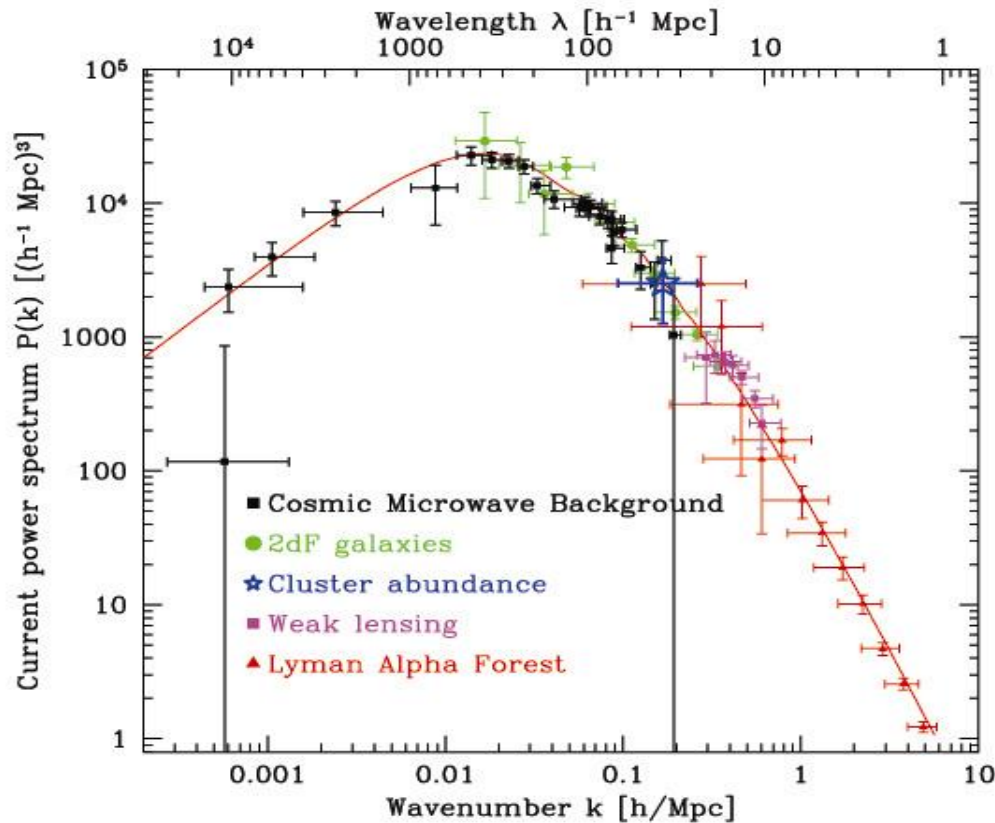
Aus winzigen Anisotropien wachsen die Strukturen des Universums



Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen

Ein primordiales Fluktuationsspektrum beschreibt alle Korrelationsfunktionen !

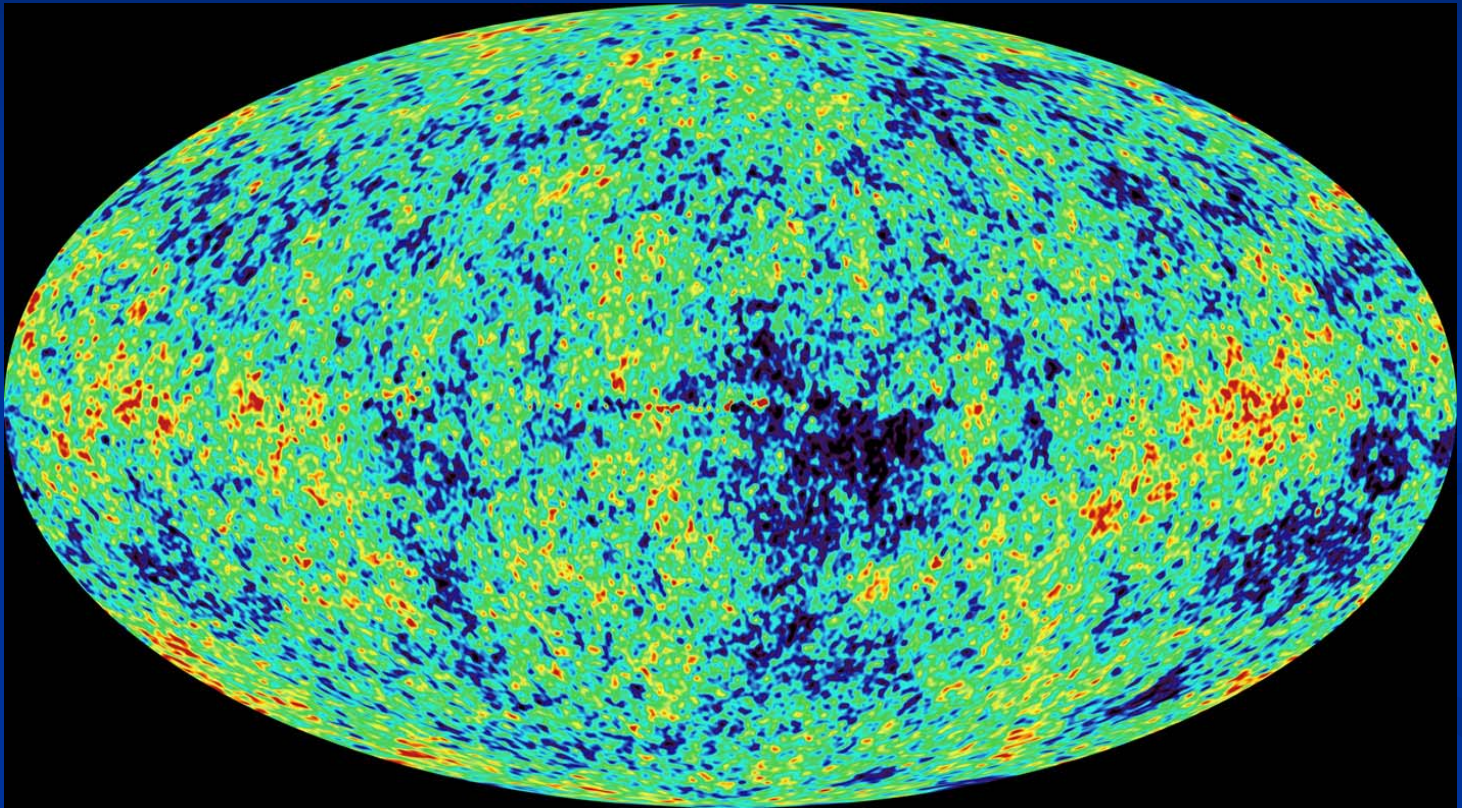
Strukturbildung : Ein primordiales Fluktuationsspektrum



Waerbeke

CMB passt mit
Galaxienverteilung
Lyman - α
und
Gravitationslinsen-
Effekt !

Zufall und Gesetz



Einfachheit und Komplexität

Konsistentes kosmologisches Modell !

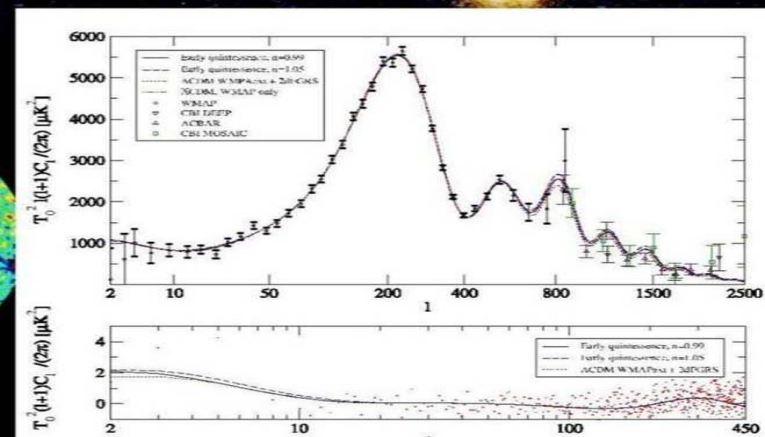
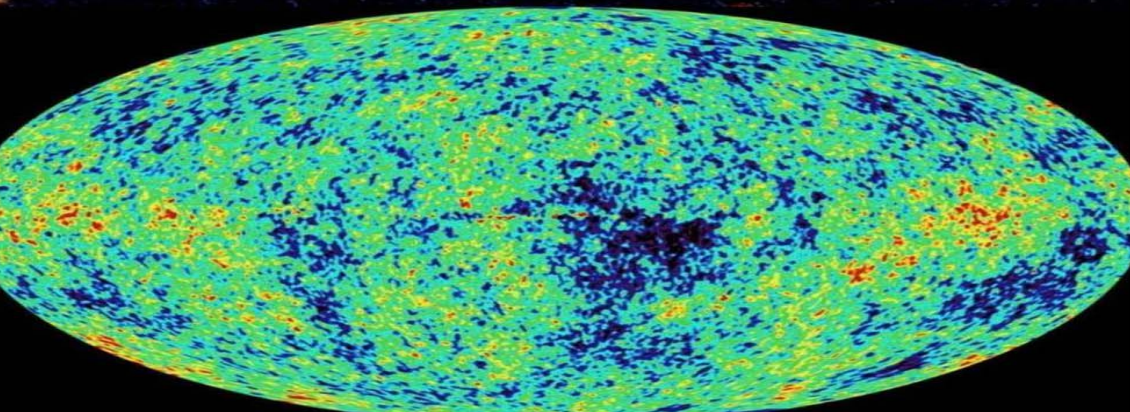
Zusammensetzung des Universums

$\Omega_b = 0.05$ sichtbar klumpt

$\Omega_{dm} = 0.2$ unsichtbar klumpt

$\Omega_h = 0.75$ unsichtbar homogen

Dunkle Energie- ein kosmisches Rätsel



Was ist die dunkle Energie ?

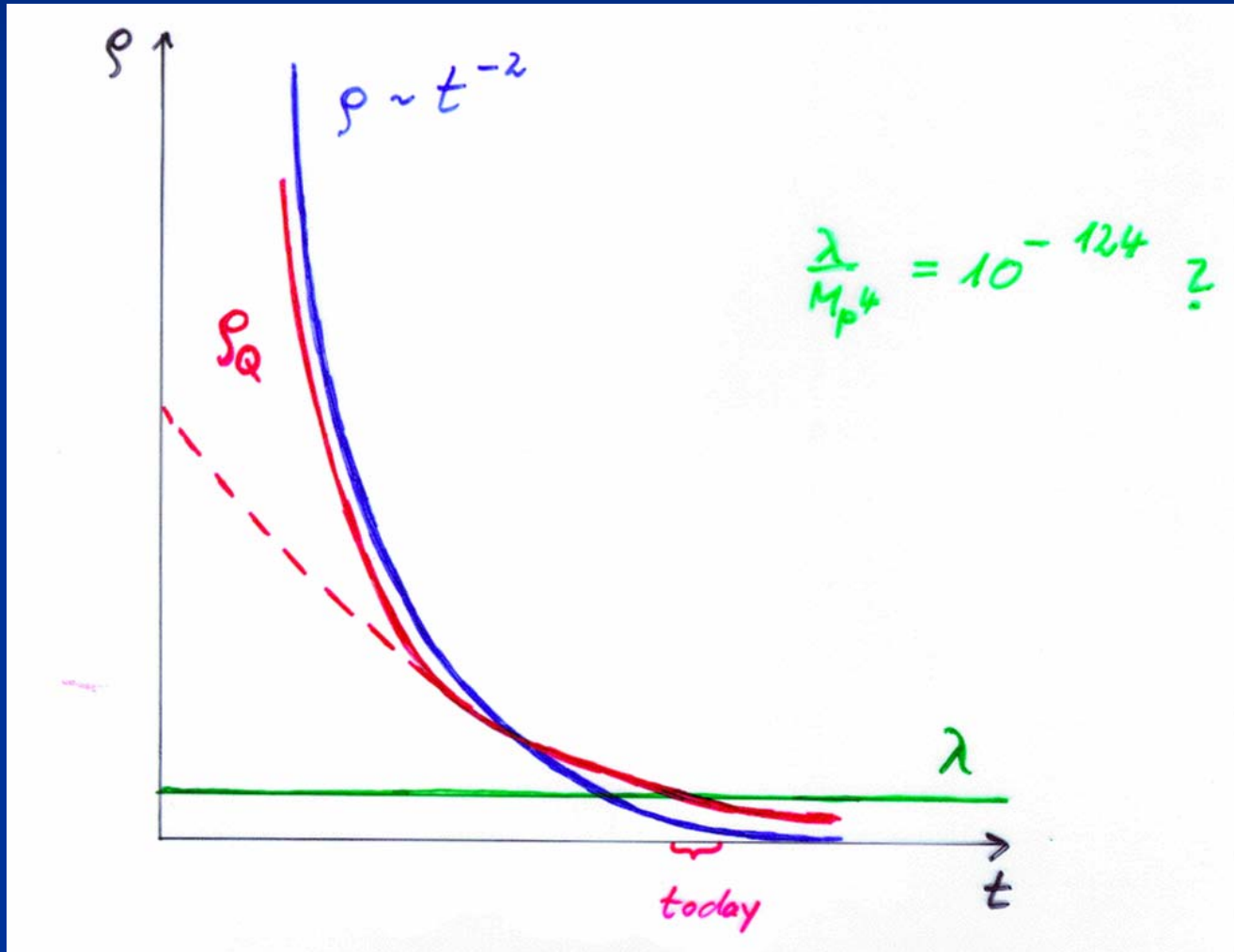
Kosmologische Konstante
oder
Quintessenz ?

Kosmologische Konstante

- Konstante λ verträglich mit allen Symmetrien
- Zeitlich konstanter Beitrag zur Energiedichte
- Warum so klein? $\lambda/M^4 = 10^{-120}$
- Warum gerade heute wichtig?

Kosm. Konst.
statisch

Quintessenz
dynamisch



Kosmologische Massenskalen

- Energie - Dichte

$$\rho \sim (2.4 \times 10^{-3} \text{ eV})^{-4}$$

- Reduzierte Planck Masse

$$M = 2.44 \times 10^{18} \text{ GeV}$$

- Newton's Konstante

$$G_N = (8\pi M^2)$$

Nur Verhältnisse von Massenskalen sind beobachtbar !

homogene dunkle Energie: $\rho_h/M^4 = 6.5 \cdot 10^{-121}$

Materie: $\rho_m/M^4 = 3.5 \cdot 10^{-121}$

Zeitentwicklung

- $\rho_m/M^4 \sim a^{-3} \sim t^{-2}$ Materie dominiertes Universum
- $\rho_r/M^4 \sim a^{-4} \sim t^{-3/2}$ Strahlungsdominiertes Universum
- $\rho_r/M^4 \sim a^{-4} \sim t^{-2}$ Strahlungsdominiertes Universum

Grosses Alter \rightarrow kleine Grössen

Gleiche Erklärung für dunkle Energie ?

Quintessenz

Dynamische dunkle Energie ,
vermittelt durch Skalarfeld
(Kosmon)

Vorhersage : Ein Teil der Energiedichte des heutigen Universums liegt als homogen verteilte (dunkle) Energie vor.

C.Wetterich,Nucl.Phys.B302(1988)668

24.9.87

B.Ratra,P.J.E.Peebles,ApJ.Lett.325(1988)L17,

20.10.87

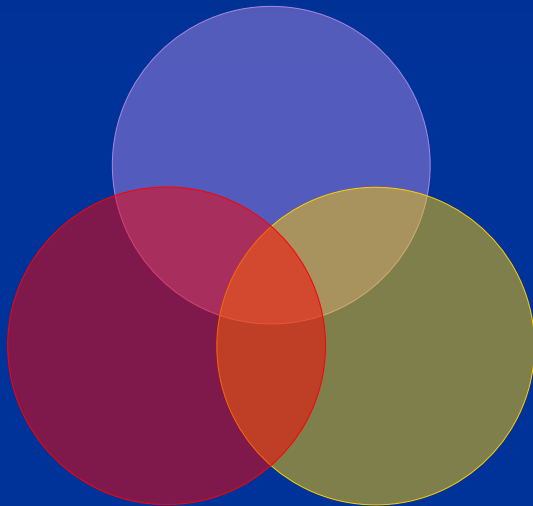
Skalarfeld

$$\Phi(x, y, z, t)$$

- Ähnlich wie elektrisches Feld
- Aber : keine Richtung ist ausgezeichnet
(kein Vektor)

“Fundamentale” Wechselwirkungen

Starke, elektromagnetische, schwache
Wechselwirkung



Gravitation

Kosmodynamik

Auf
astronomischen
Skalen:

Graviton

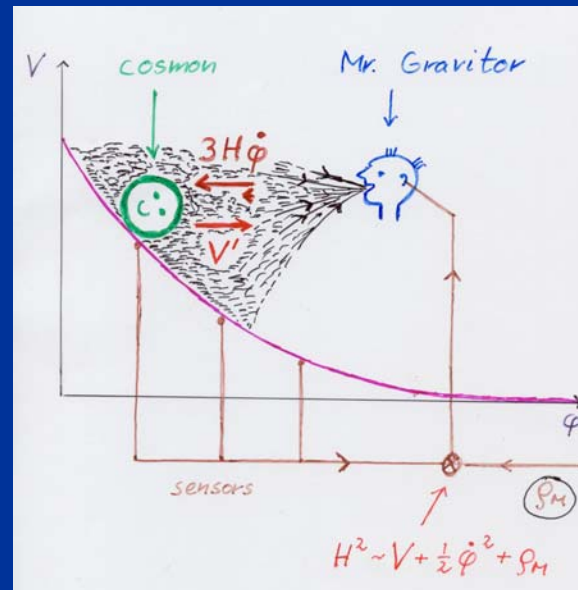
+

Kosmon

Kosmologische Gleichungen

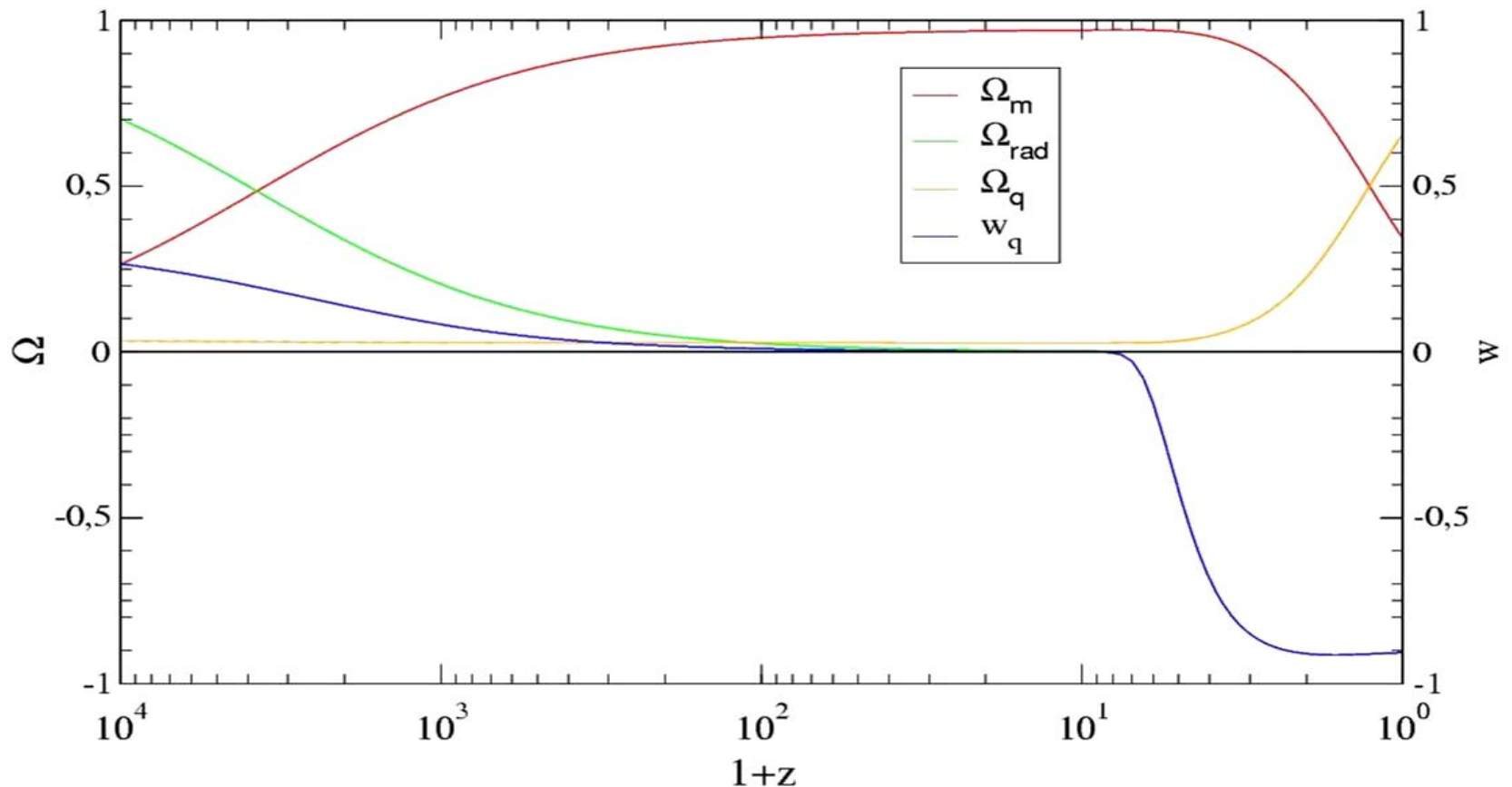
$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} = -dV/d\phi$$

$$3M^2H^2 = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + \rho$$

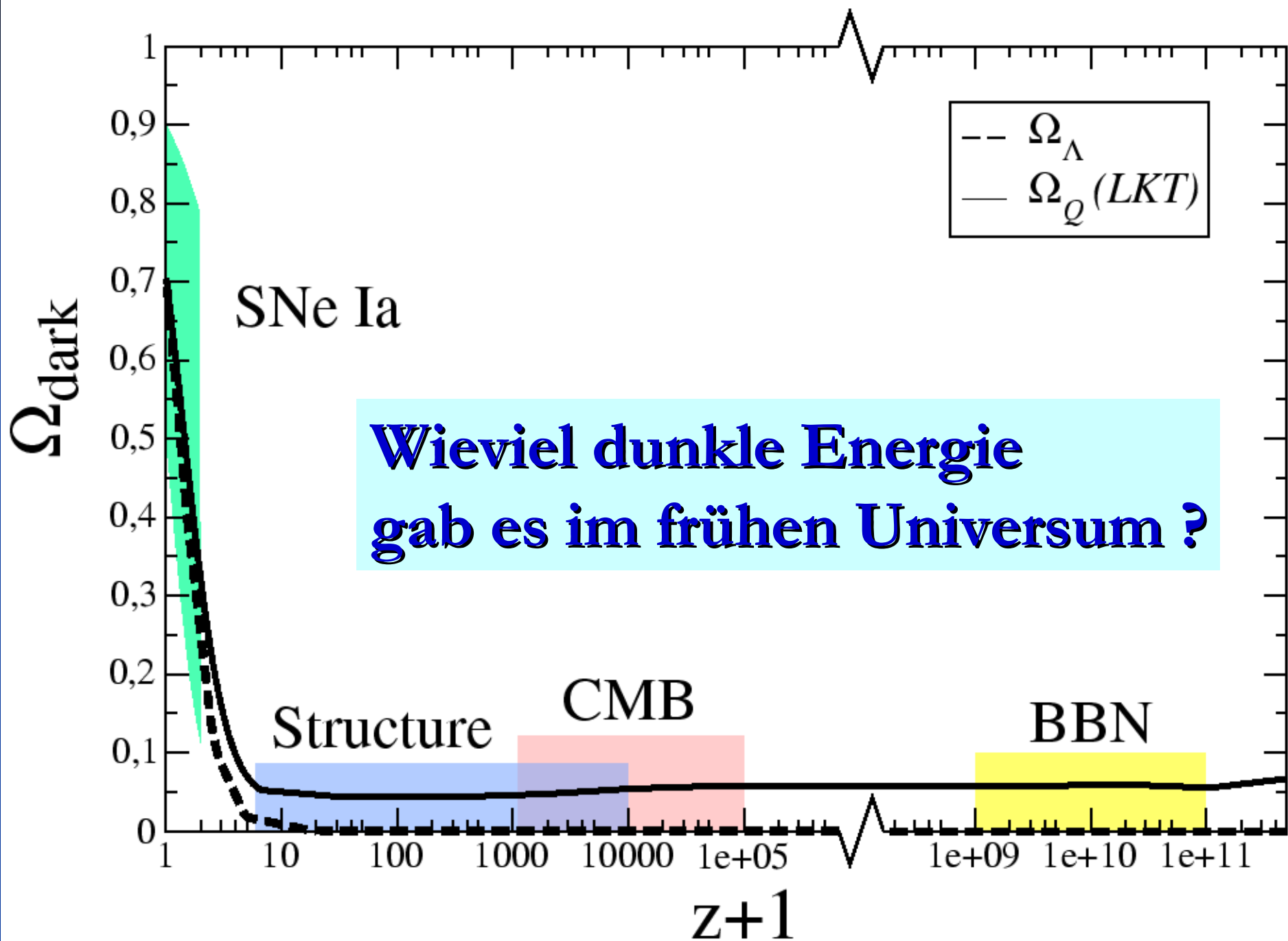


Quintessenz wird heute wichtig

Crossover Quintessence Evolution



Wie kann man Quintessenz von
kosmologischer Konstanten
unterscheiden ?



Eigenschaften der Dunklen Energie bestimmen die Zukunft des Universums

Vorhersagbarkeit für die nächsten
100 Milliarden Jahre...

Näher an den Urknall

- Je näher an den Urknall, desto höher die Temperatur und Energie der Teilchen
- Physik bei hohen Energien weniger gut bekannt
- Ab 10^{-10} Sekunden ab : Im wesentlichen bekannte Physik

(Quark Gluon Plasma wird experimentell getestet, detaillierte Eigenschaften nicht zentral für unser Bild der Kosmologie .)

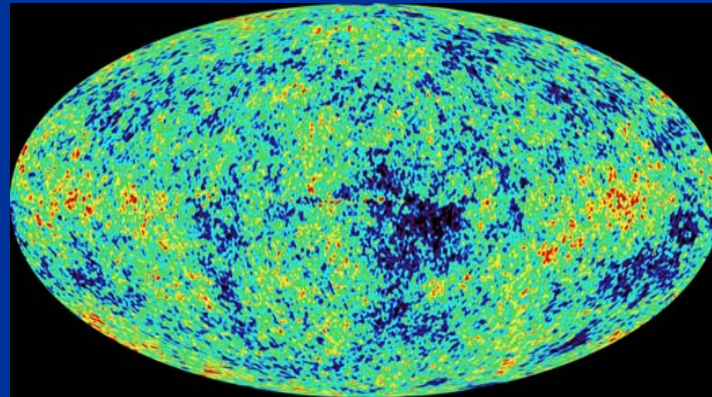
**Wir verfügen über
zuverlässiges Wissen über die
Entwicklung des Universums
seit den ersten 10^{-10} Sekunden !**

Elektroschwacher Phasenübergang

- 10^{-12} Sekunden ab
- Physik noch nicht hinreichend bekannt.
- Neue Beschleuniger : LHC

Inflationäres Universum

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



Signale vom Urknall !

Spekulative Physik ..

- Zusätzliche Raumdimensionen
- Superstringtheorien
- “Kosmologie vor dem Urknall”
- Multiversum

Chancen der Verifizierung ?

- Es fehlt vereinheitlichte Theorie aller Wechselwirkungen !
- Dennoch : Beobachtungen geben Aufschluss über extreme frühe Epochen der kosmologischen Entwicklung !

Zusammenfassung

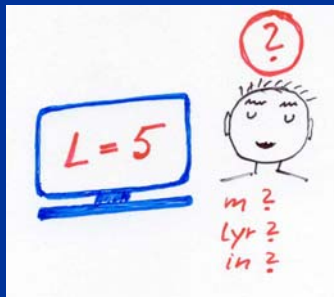
- Physik des Universums in wesentlichen Zügen bekannt von 10^{-10} Sekunden ab bis 3 Milliarden Jahre ab.
- Vorhersagen über Zukunft benötigen quantitatives Verständnis der Dunklen Energie
- Frühes Universum : Elementarteilchenphysik

Vereinheitlichung
aller Wechselwirkungen

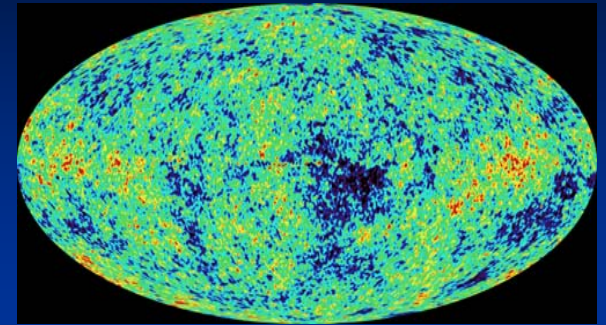
Superstrings

Zusätzliche
Dimensionen

Fundamentaler
Ursprung der
Massenskalen



$$\Omega_m + X = 1$$



$$\Omega_m : 25\%$$



$$\Omega_h : 75\%$$

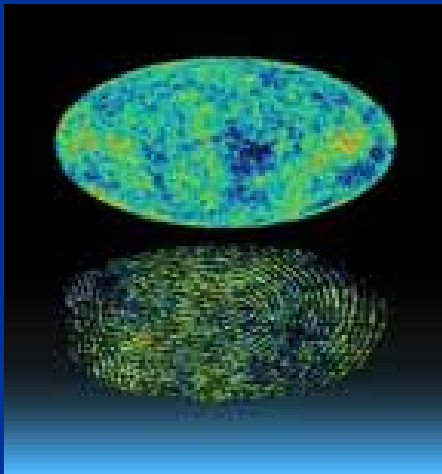
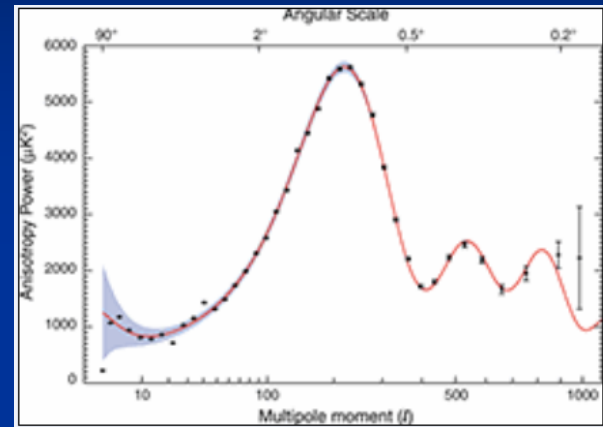
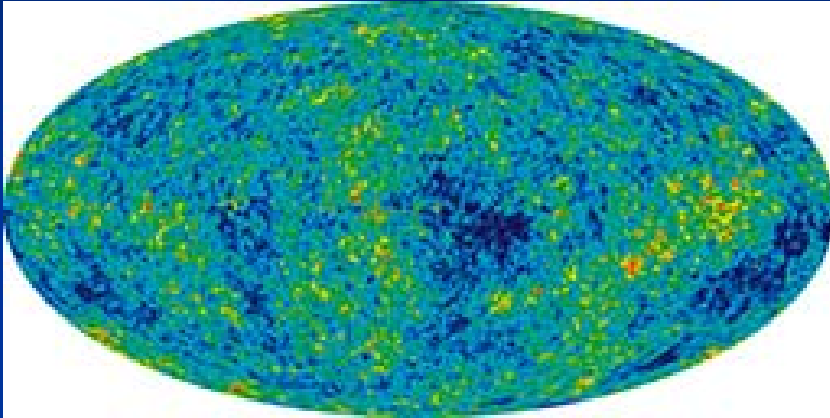
Dunkle Energie





Ende

WMAP 2006



Polarisation

