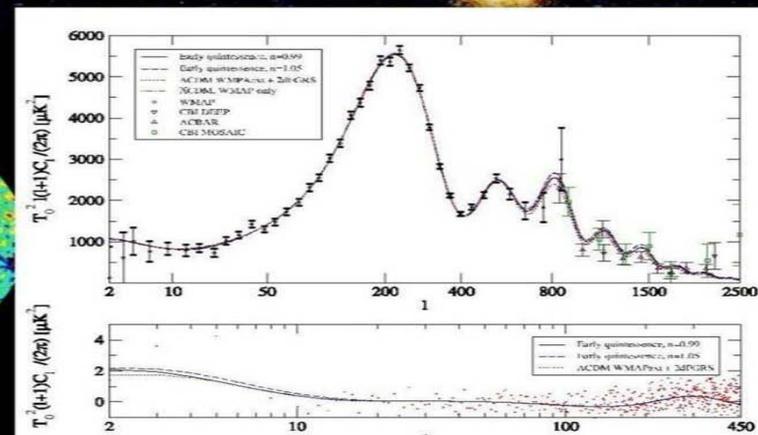
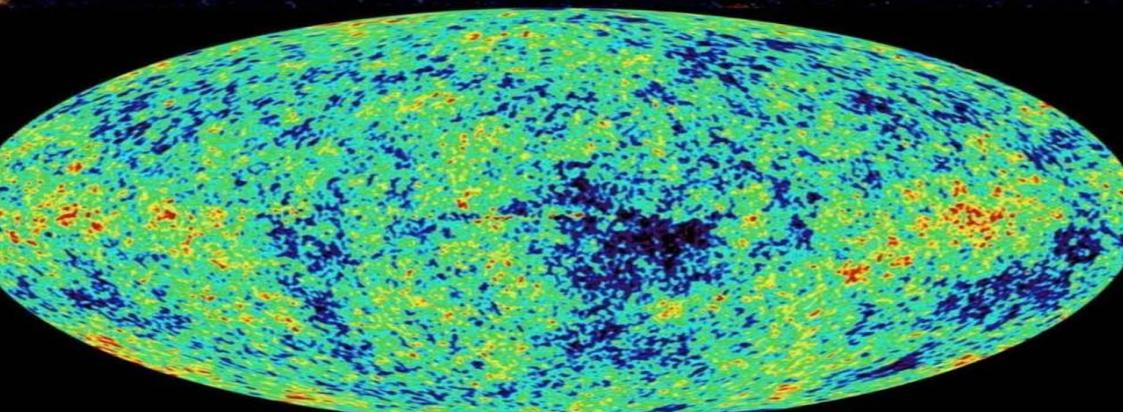


# Welch Dunkle Energie dominiert das Universum ?



# Dunkle Energie – ein kosmisches Rätsel

C.Wetterich

A.Hebecker, M.Doran, M.Lilley, J.Schwindt,  
C.Müller, G.Schäfer, E.Thommes,  
R.Caldwell, M.Bartelmann, K.Karwan, G.Robbers

**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  $H = \dot{a}/a$  )

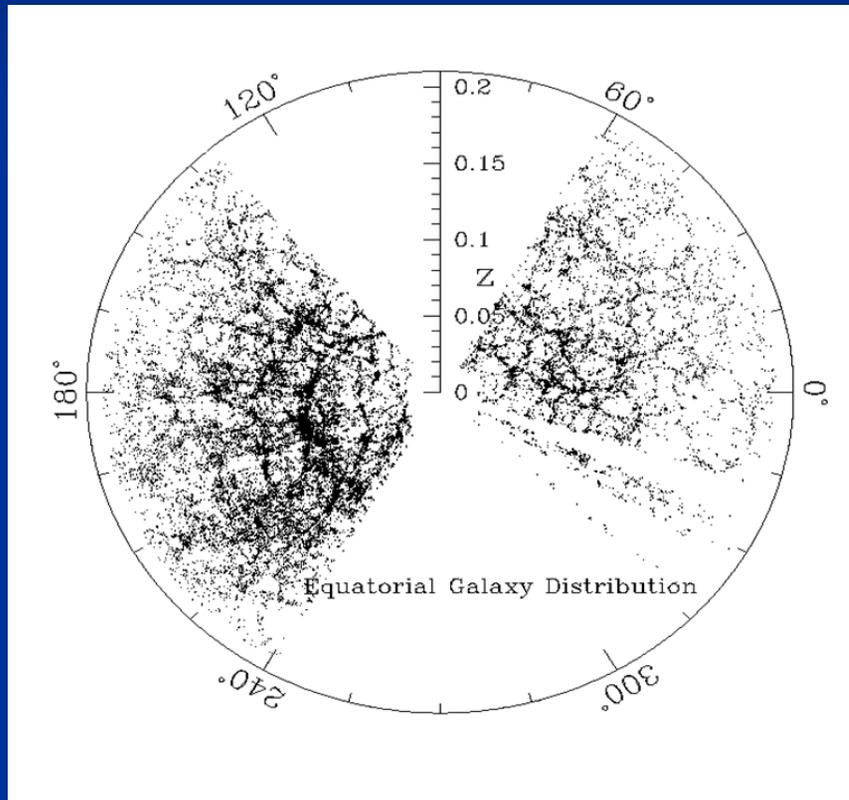
- $\Omega_b = \rho_b / \rho_c$

Anteil der Baryonen an der (kritischen) Energiedichte

# Baryonen/Atome

SDSS

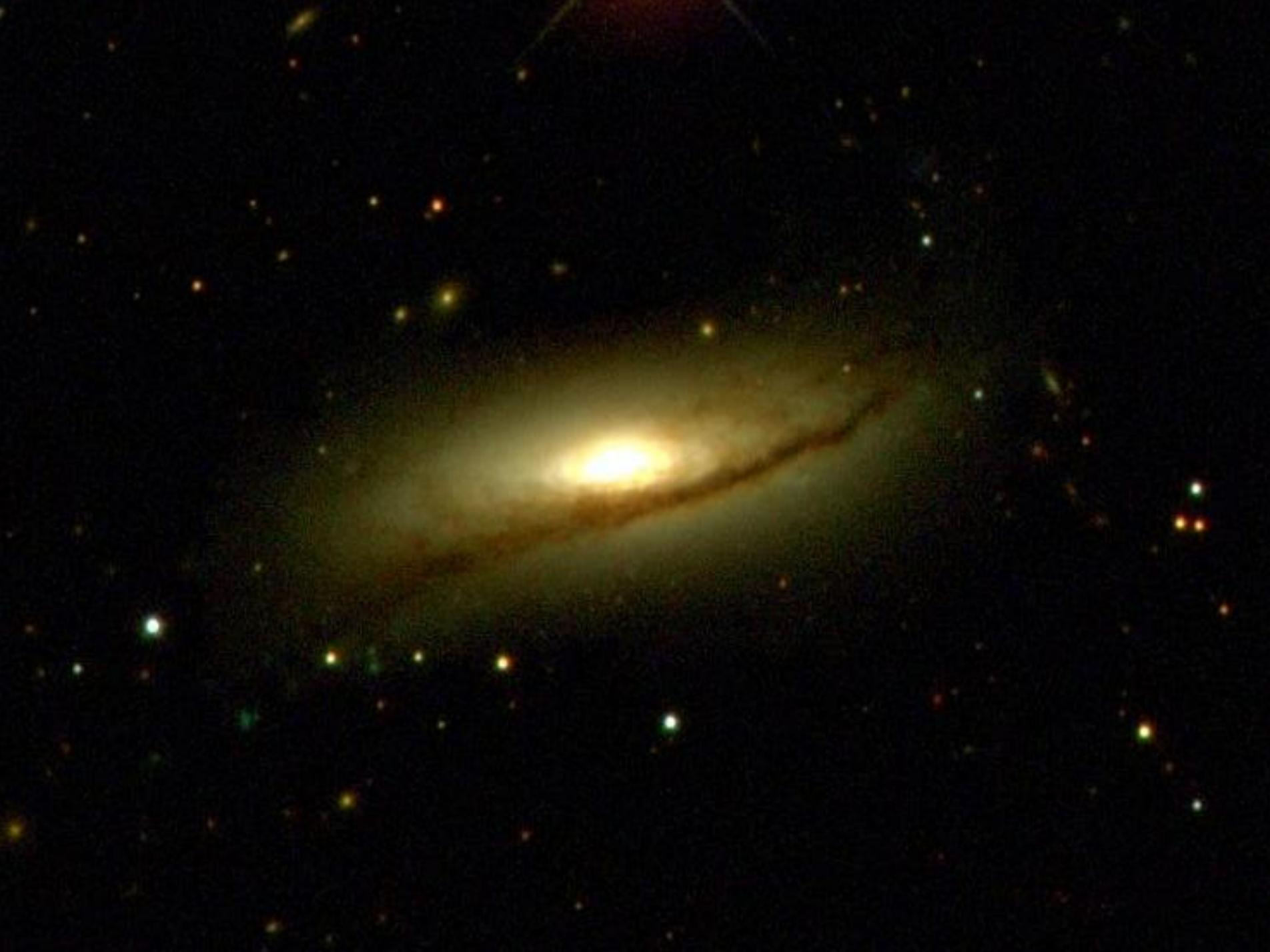
~60,000 von  
>300,000  
Galaxien



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



Abell 2255 Cluster  
~300 Mpc

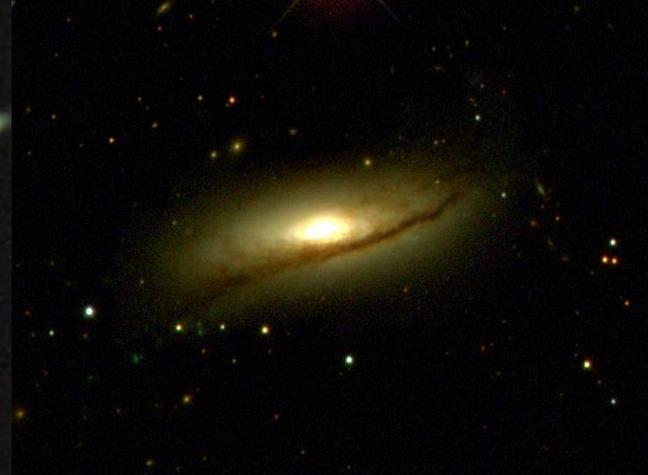


$$\Omega_b = 0.045$$

Von Nukleosynthese,  
Kosmischer Hintergrundstrahlung

**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

Dunkle +  
baryonische Materie :

Alles was klumpt !

$$\Omega_m = 0.25$$

# Räumlich flaches Universum

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

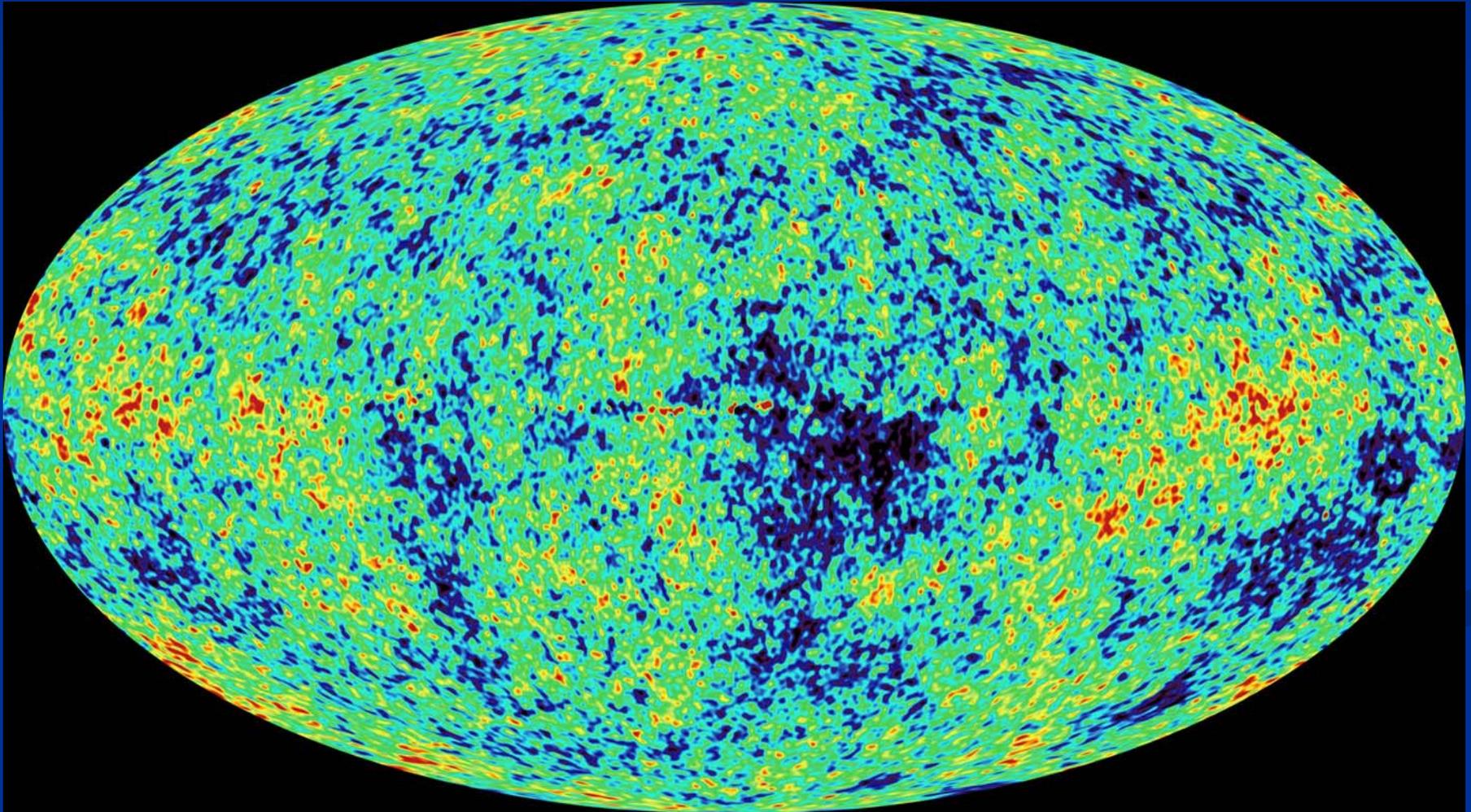
- Theorie (Inflationäres Universum )

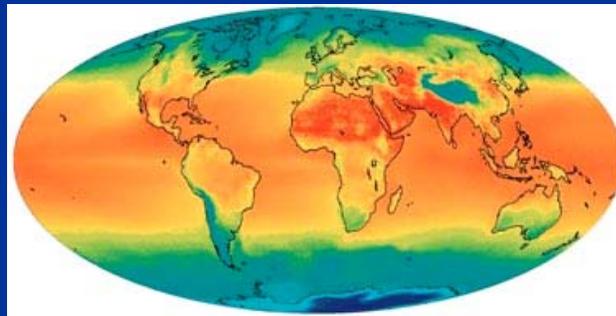
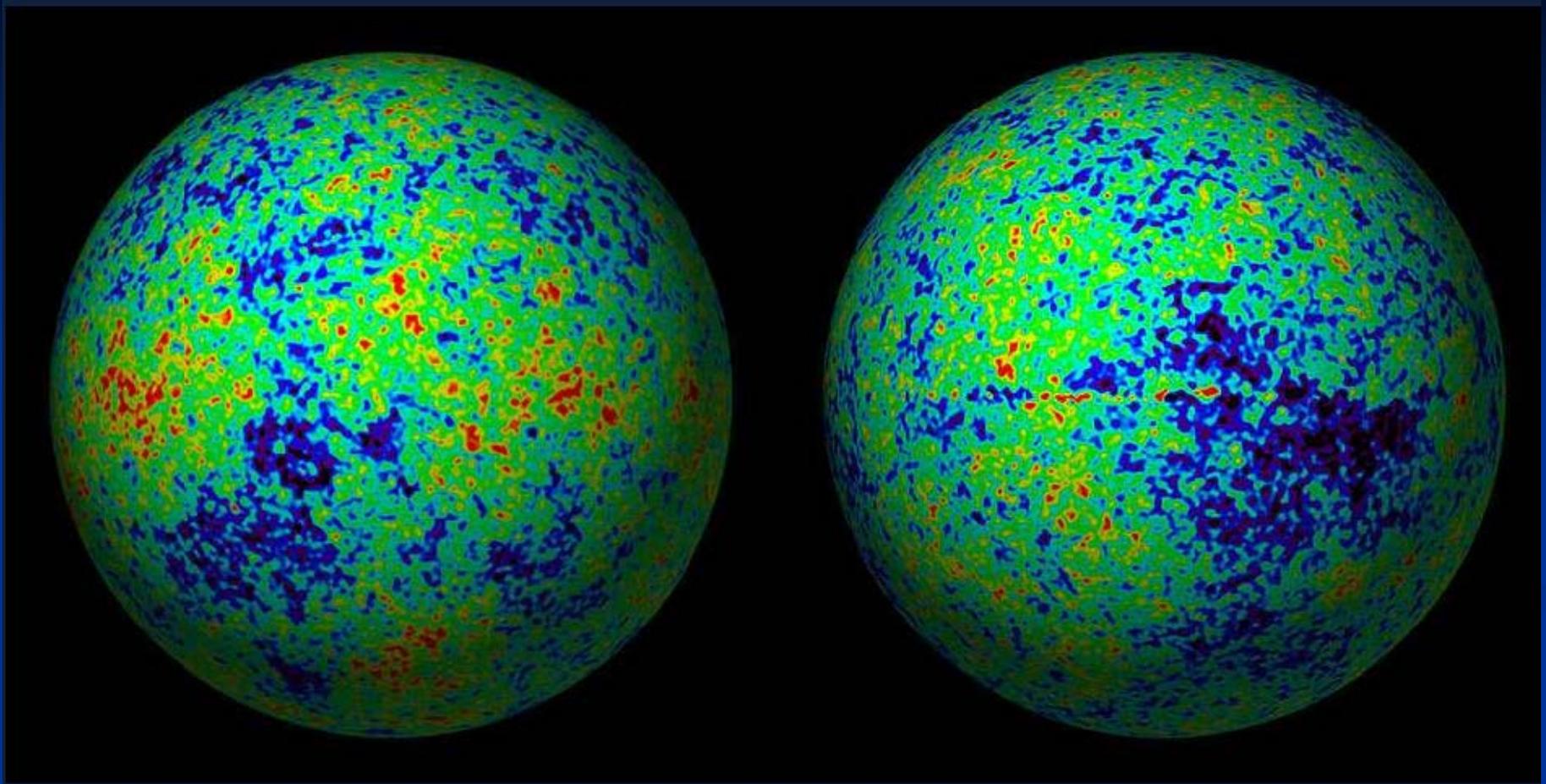
$$\Omega_{\text{tot}} = 1.0000\dots\dots\dots x$$

- Beobachtung ( WMAP )

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

# Foto des Urknalls





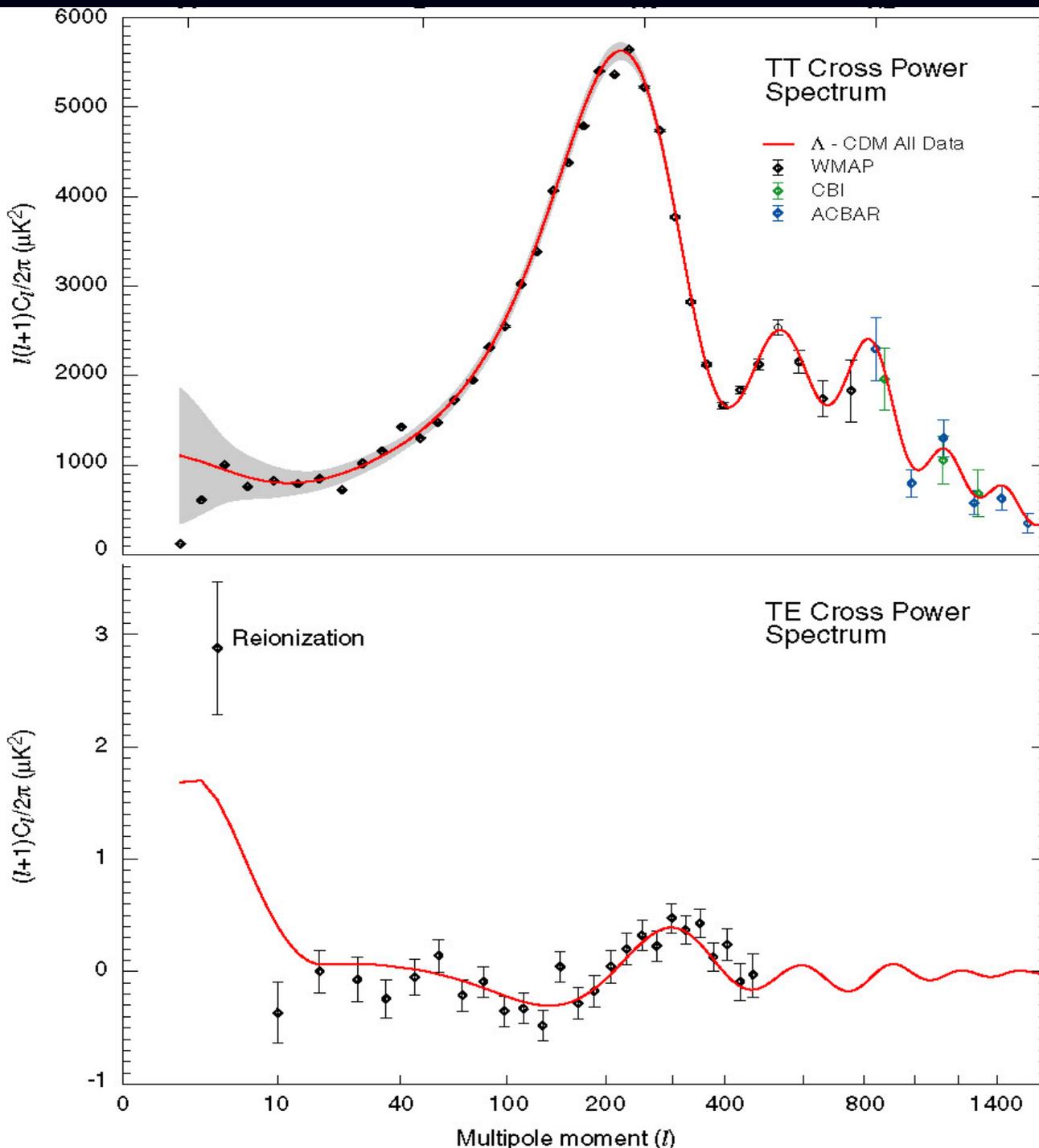
# Mittelwerte WMAP 2003

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

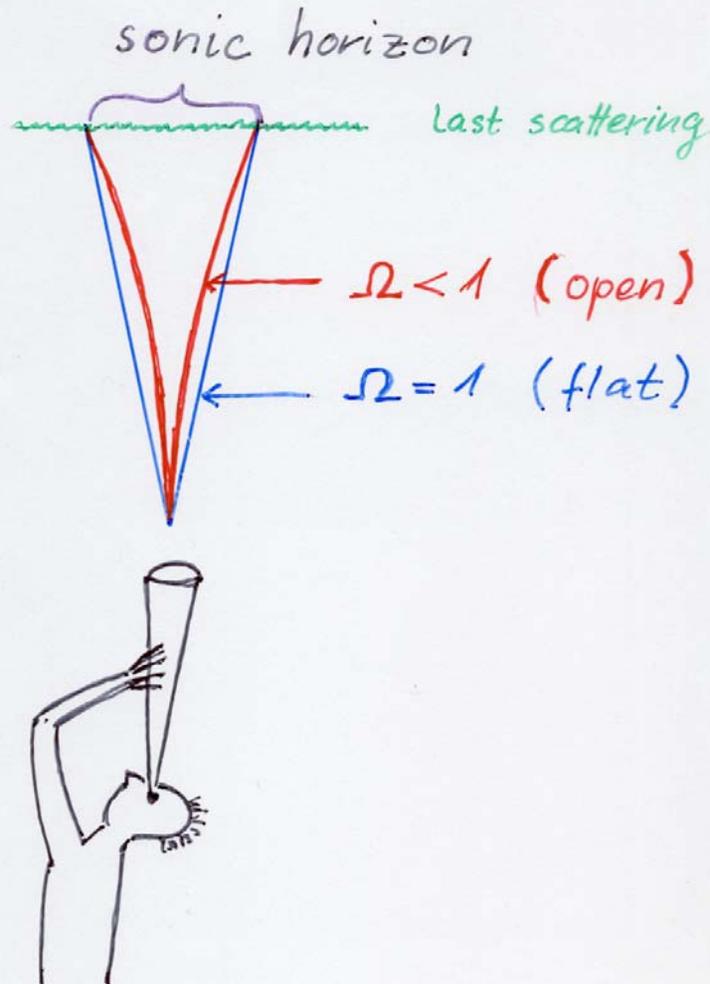
$$\Omega_{\text{m}} = 0.27$$

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

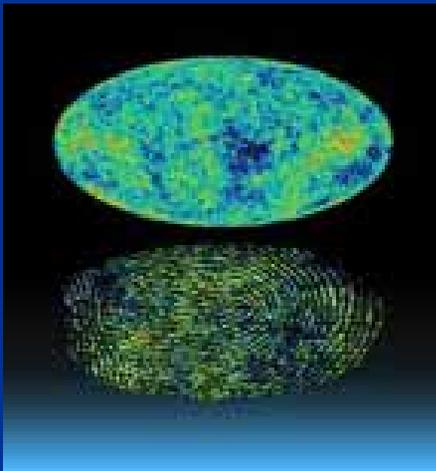
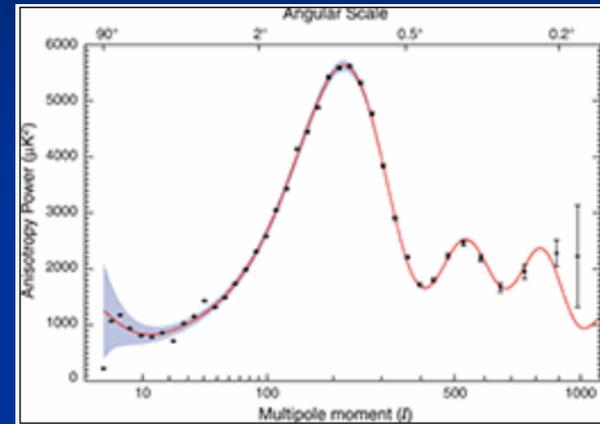
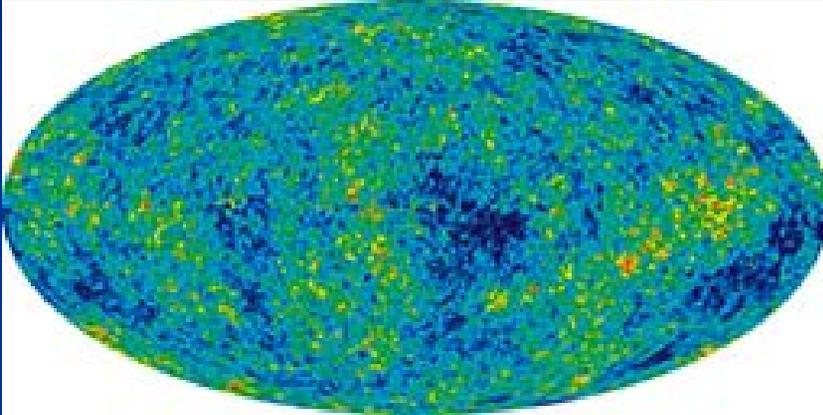
$$\Omega_{\text{dm}} = 0.225$$



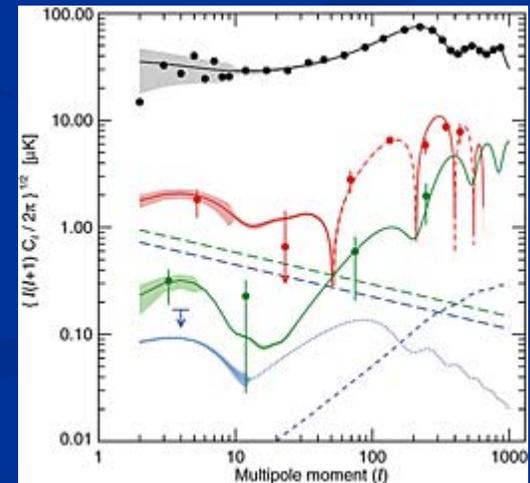
$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$



# WMAP 2006



Polarisation



# Dunkle Energie

$$\Omega_m + X = 1$$

$$\Omega_m : 25\%$$

$$\Omega_h : 75\%$$

Dunkle Energie

h : homogen , oft auch  $\Omega_\Lambda$  statt  $\Omega_h$

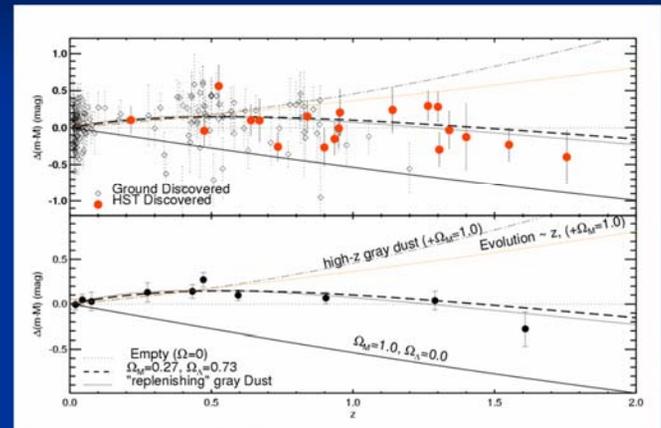
Dunkle Energie :

homogen verteilt

# Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

*Die Expansion des Universums  
beschleunigt sich heute !*

## Supernova Ia Hubble-Diagramm

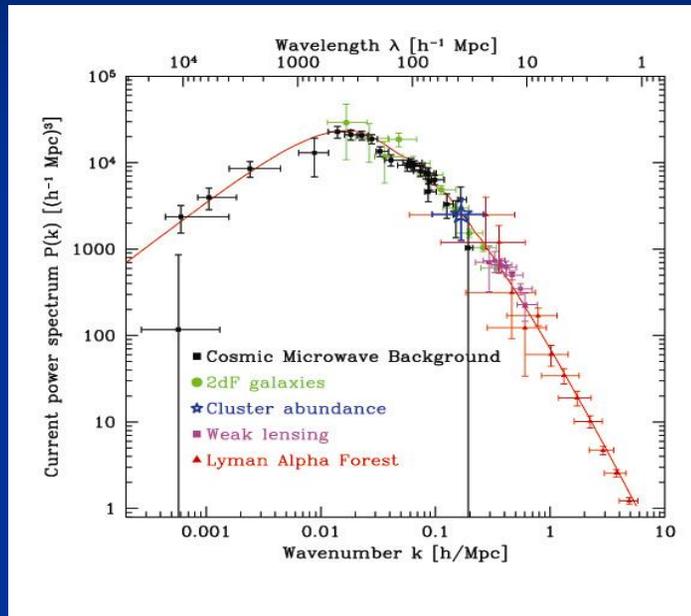


Rotverschiebung  $z$

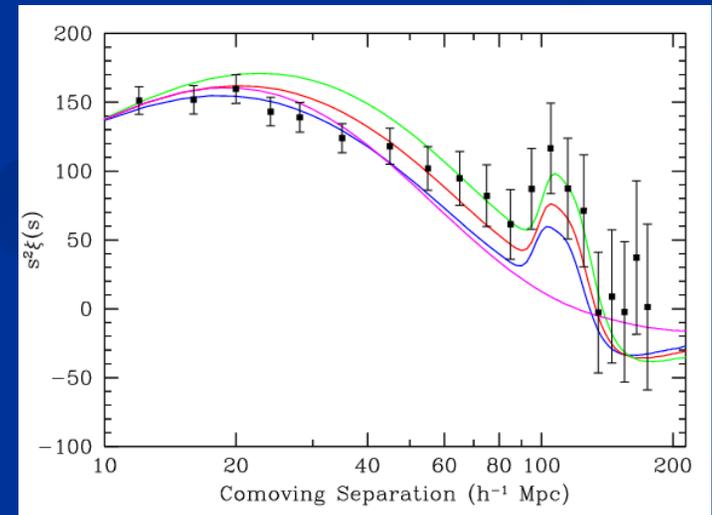
Riess et al. 2004

# Fluktuations-Spektrum

# Baryon - Peak



# Galaxien – Korrelations – Funktion



*Strukturbildung :  
Ein primordiales  
Fluktuations-Spektrum*

SDSS

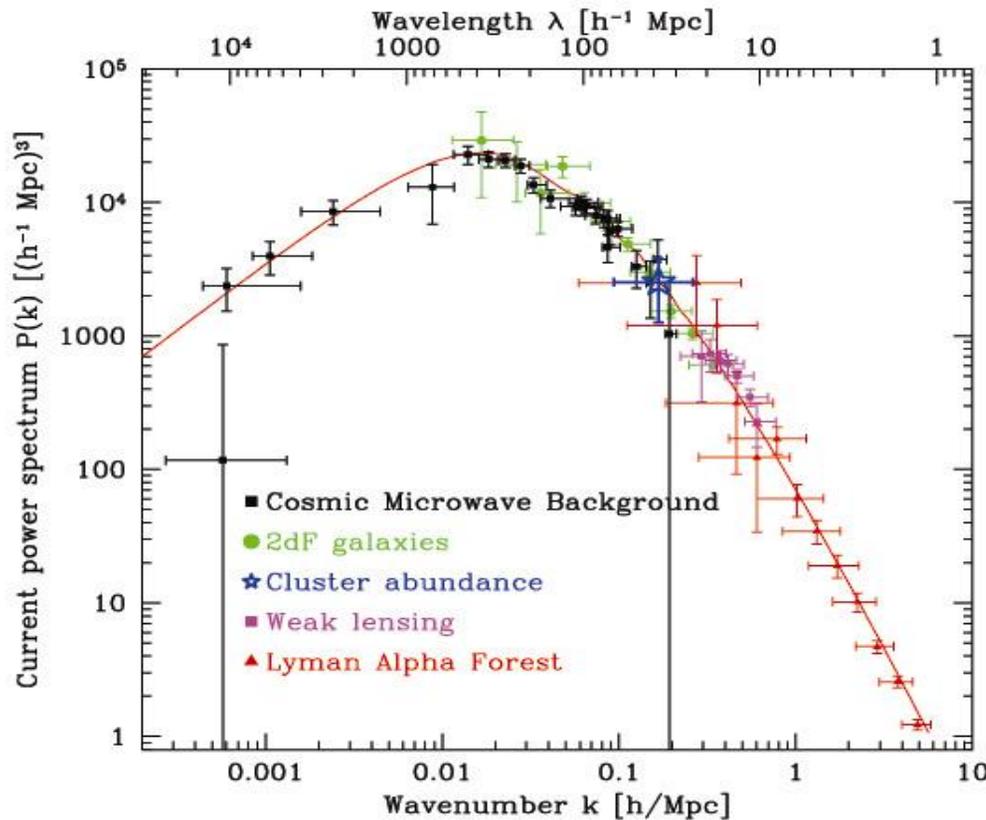
# Strukturbildung

Aus winzigen Anisotropien wachsen die  
Strukturen des Universums

Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen

Ein primordiales Fluktuationsspektrum beschreibt  
alle Korrelationsfunktionen !

# Strukturbildung : Ein primordiales Fluktuationsspektrum



CMB passt mit  
Galaxienverteilung  
Lyman -  $\alpha$   
und  
Gravitationslinsen-  
Effekt !

*Konsistentes kosmologisches Modell !*

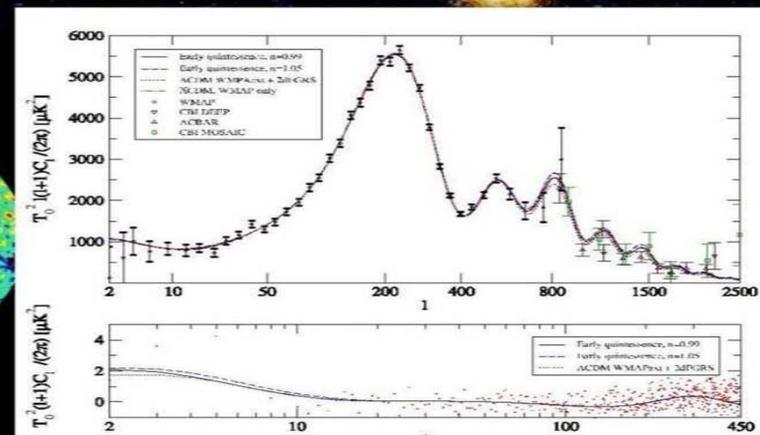
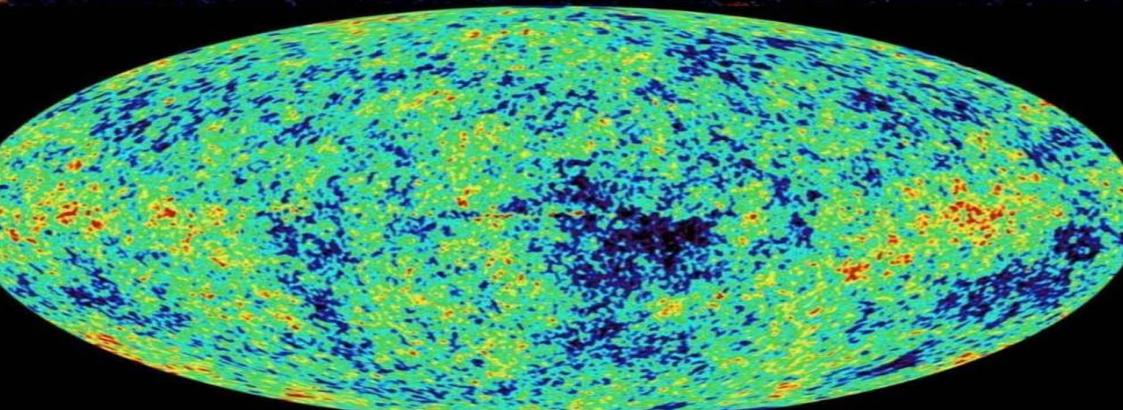
# Zusammensetzung des Universums

$\Omega_b = 0.05$       sichtbar      klumpt

$\Omega_{dm} = 0.2$       unsichtbar      klumpt

$\Omega_h = 0.75$       unsichtbar      homogen

# Dunkle Energie- ein kosmisches Rätsel



Was ist die dunkle Energie ?

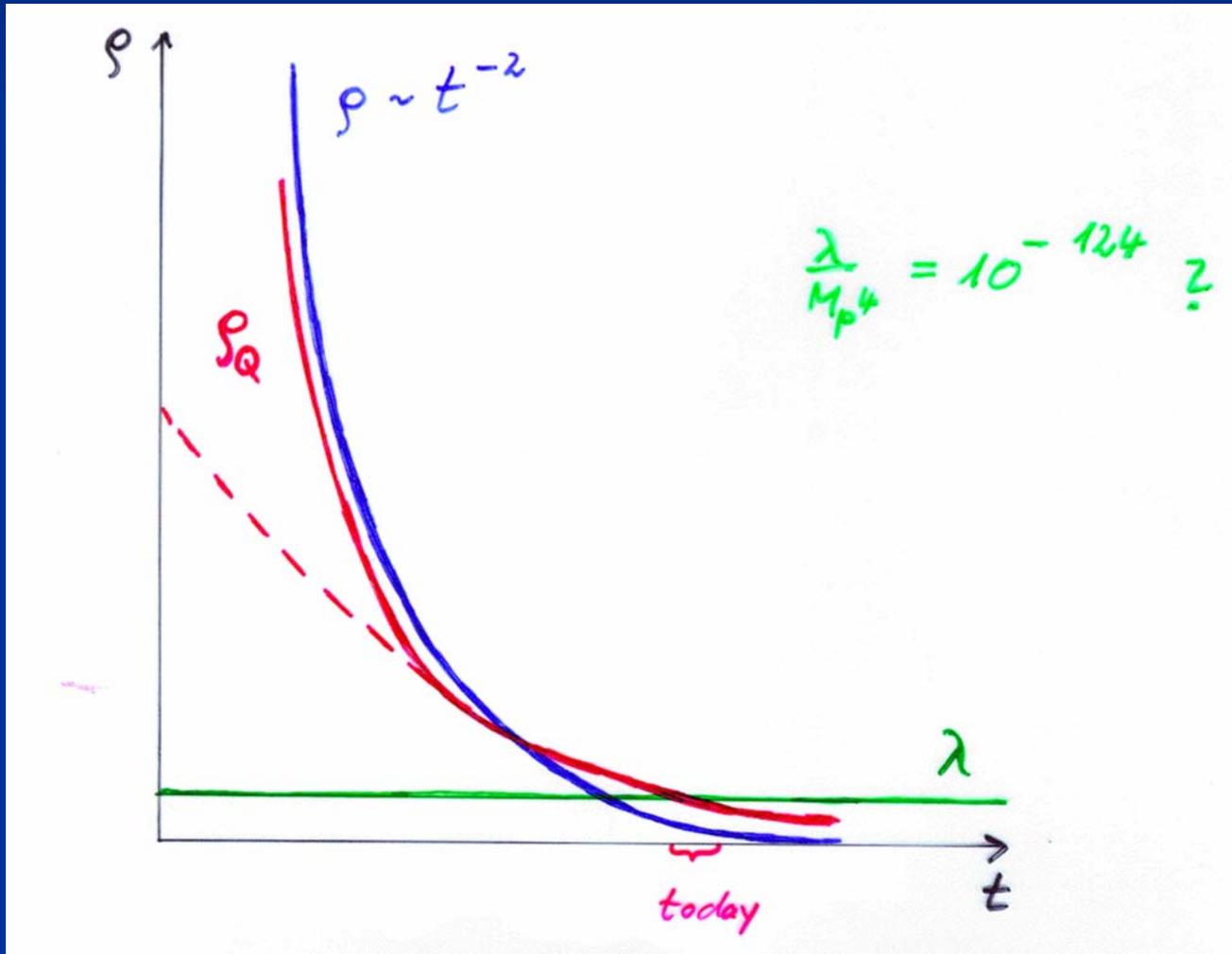
Kosmologische Konstante  
oder  
Quintessenz ?

# Kosmologische Konstante

- Konstante  $\lambda$  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 Skalar**feld**  
(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)

# Kosmon

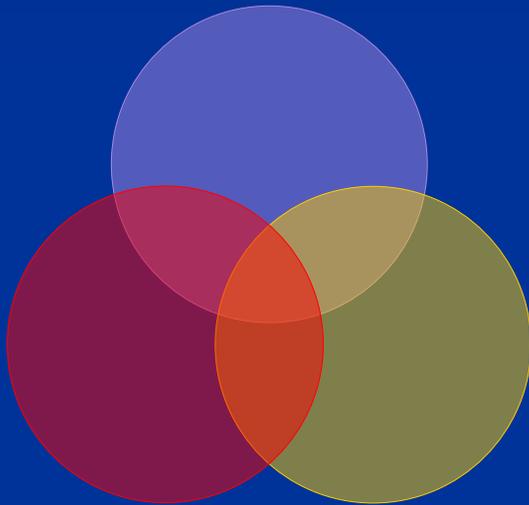
- *Skalarfeld ändert seinen Wert auch in der heutigen kosmologischen Entwicklung*
- *Potenzielle und kinetische Energie des Kosmons tragen zur Energiedichte des Universums bei*
- *Zeitabhängige dunkle Energie :*  
 *$\rho_b(t)$  fällt mit der Zeit !*

# Kosmon

- *Winzige Masse*
- $m_c \sim H$
- *Neue langreichweitige Wechselwirkung*

# “Fundamentale” Wechselwirkungen

Starke, elektromagnetische, schwache  
Wechselwirkung



Gravitation

Kosmodynamik

Auf  
astronomischen  
Skalen:

Graviton

+

Kosmon

# Homogenes und isotropes Universum

- $\varphi(\mathbf{x},t)=\varphi(t)$
- Homogenes Kosmonfeld
- Homogener Beitrag zur Energiedichte

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

- Dynamische Dunkle Energie !

# Evolution des Kosmonfelds

Feldgleichung

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

Potenzial  $V(\varphi)$  bestimmt Details des Modells

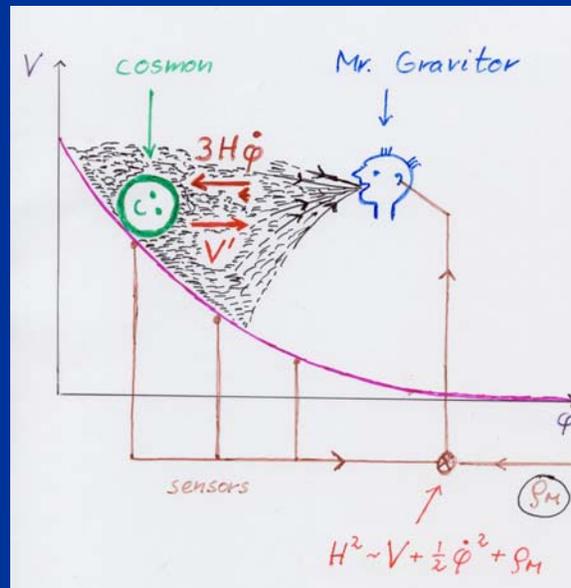
z.B.  $V(\varphi) = M^4 \exp(-\varphi/M)$

Für wachsendes  $\varphi$  fällt Potenzial gegen Null

# Kosmologische Gleichungen

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

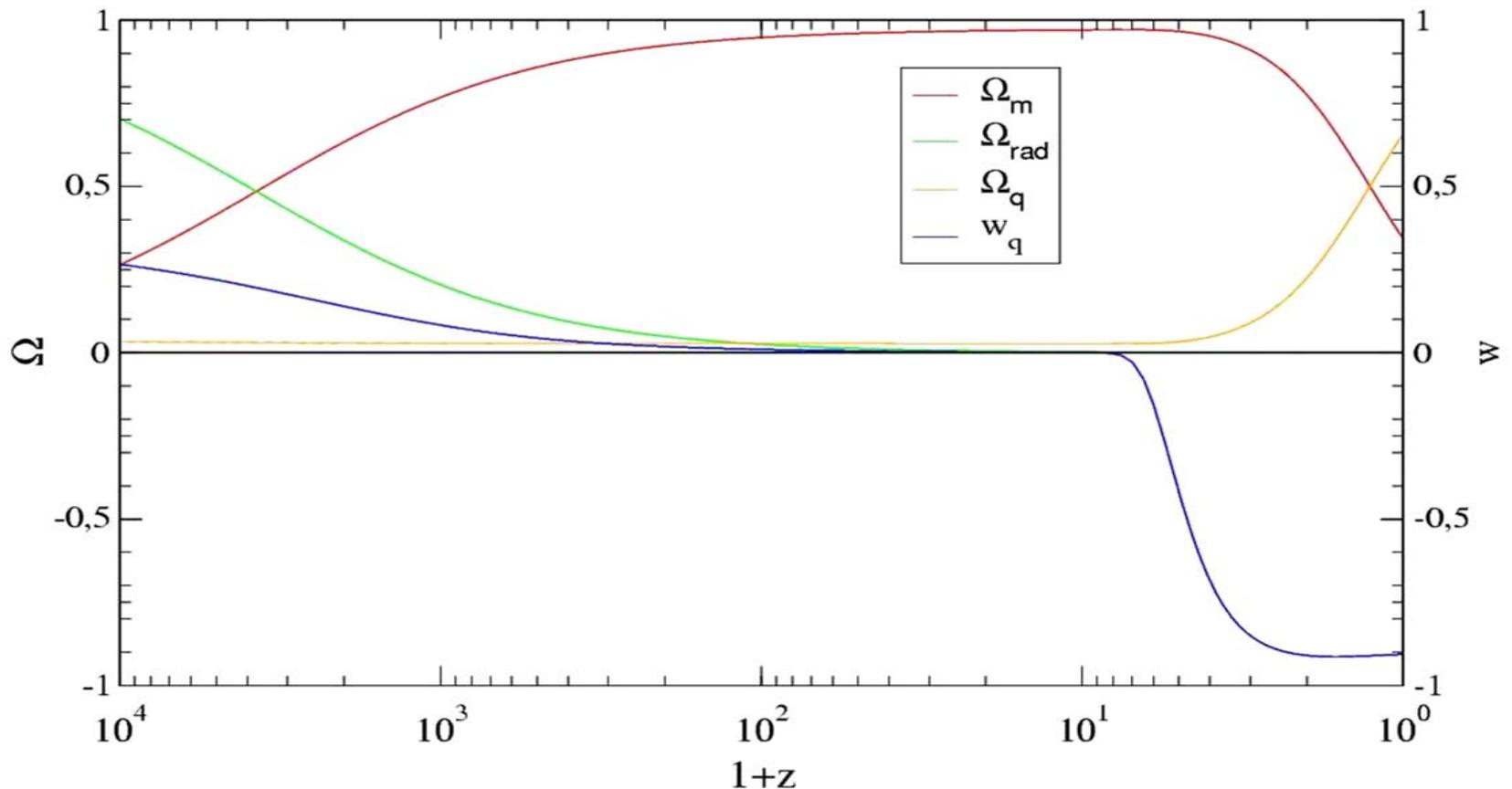
$$3M^2H^2 = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + \rho$$



*Details der Modelle  
hängen von  
Potenzial  $V(\varphi)$  ab*

# Quintessenz wird heute wichtig

Crossover Quintessence Evolution

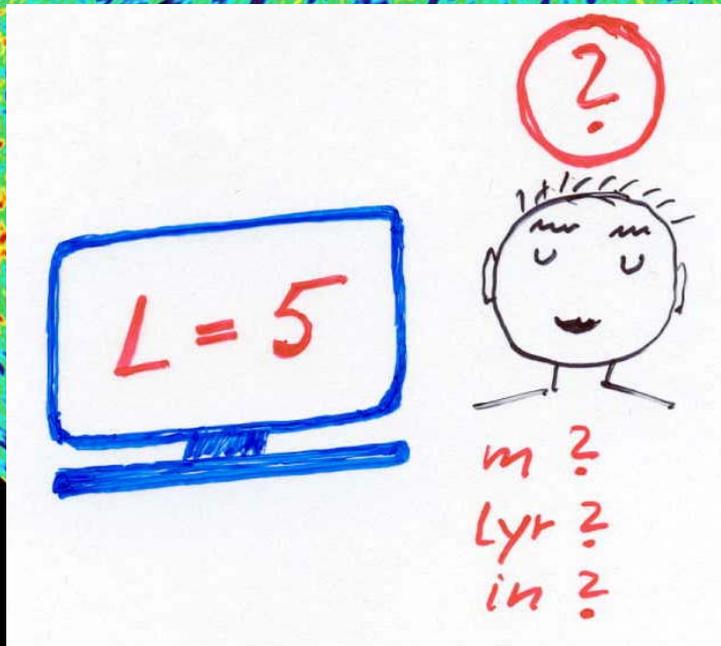


**Quintessenz**

**und**

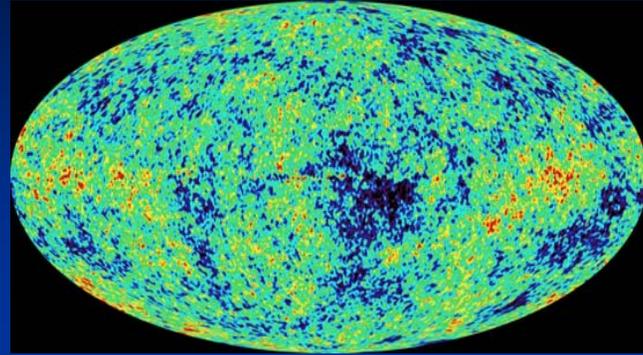
**fundamentale Massenskala**

# Woher kommen Längen und Massen ?

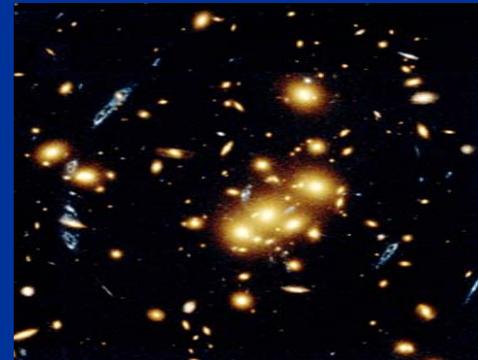


$$L = \sqrt{g} \left( -\frac{1}{2} \chi^2 R + \frac{1}{2} (\delta - 6) \partial^\mu \chi \partial_\mu \chi + V(\chi) + h \chi \bar{\psi} \psi \right)$$

$$\Omega_m + X = 1$$

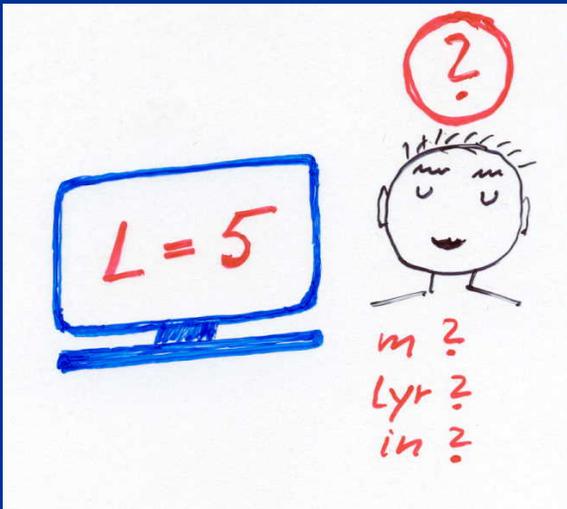


$$\Omega_m : 25\%$$



$$\Omega_h : 75\%$$

Dunkle Energie



# Messung , Beobachtung : nur dimensionslose Größen !

- Aber :  $m_{\text{Elektron}} = 511 \text{ keV}$  : gemessen!
- Was ist eV?
- $1 \text{ eV} = \text{Grundzustands-Energie des Wasserstoffatoms} / 13.6$
- Messung: Verhältnis der Grundzustands-Energie des Wasserstoffs zu Elektronenmasse.

# Einheiten

- Man könnte die Elektron – Masse als Masseneinheit wählen
- $1 \text{ Gramm} = 1.1 \times 10^{27} m_{\text{Elektron}}$
- proportional zu Avogadro's Zahl

# Standard – Modell der elektroschwachen Wechselwirkung : Higgs - Mechanismus

- Die Massen aller fundamentalen Fermionen und Eichbosonen sind proportional zum Vakuumerwartungswert eines Skalarfelds  $\varphi$  ( Higgs Skalar )
- Für Elektron , Quarks , W- und Z- Bosonen gilt

$$m_{\text{Elektron}} = h_{\text{Elektron}} * \varphi \quad \text{etc.}$$

*Massen und Kopplungskonstanten*

*werden bestimmt durch die*

*Eigenschaften des **Vakuums** !*

ähnlich Maxwell – Gleichungen in Materie

**Hypothese:  
Quantengravitation -  
Theorie ohne explizite  
Massenskala ?**

# Fundamentale Massenskala

- Fester “Parameter” oder dynamische Skala ?
- Dynamische Skala  $\longleftrightarrow$  Feld

# Kosmon und Fundamentale Massen - Skalen

- Annahme : Alle Parameter mit Dimension Masse sind proportional zu Skalar - Feld  $\chi$   
(GUTs, Superstrings,...)

$$M \sim \chi, \quad m_{\text{proton}} \sim \chi, \quad \Lambda_{\text{QCD}} \sim \chi, \quad M_{\text{W}} \sim \chi$$

- $\chi$  kann sich mit der Zeit ändern
- $m_{\text{proton}}/M$  : ( fast ) konstant - *Beobachtung!*
- Nur Verhältnisse von Massenskalen sind beobachtbar !

# Trick für Theorie ohne fundamentale Massenskala:

Ersetze alle Massen durch  
dimensionslose Konstante mal  $\chi$

# Dilatations – symmetrische Gravitationstheorie

- Lagrange Dichte:

$$L = \sqrt{g} \left( -\frac{1}{2} \chi^2 R + \frac{1}{2} (\delta - 6) \partial^\mu \chi \partial_\mu \chi \right. \\ \left. + V(\chi) + h \chi \bar{\psi} \psi \right)$$

- Dilatations - Symmetrie für

$$V = \lambda \chi^4, \lambda = \text{const.}, \delta = \text{const.}, h = \text{const.}$$

- Konforme Symmetrie für  $\delta=0$

# Dilatations - Symmetrie

Reskalieren der Längenskalen

$$\mathbf{x} \rightarrow c^{-1} \mathbf{x}$$

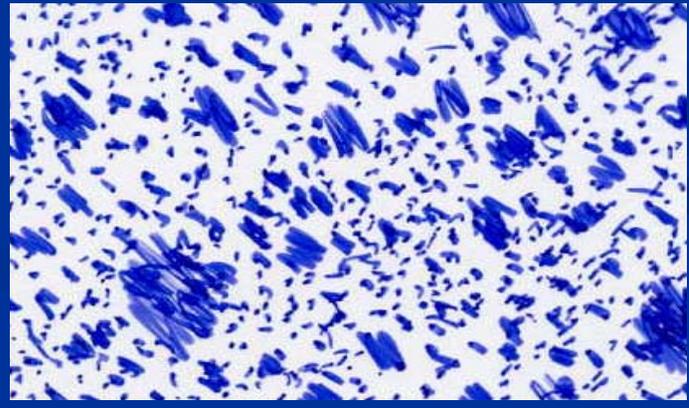
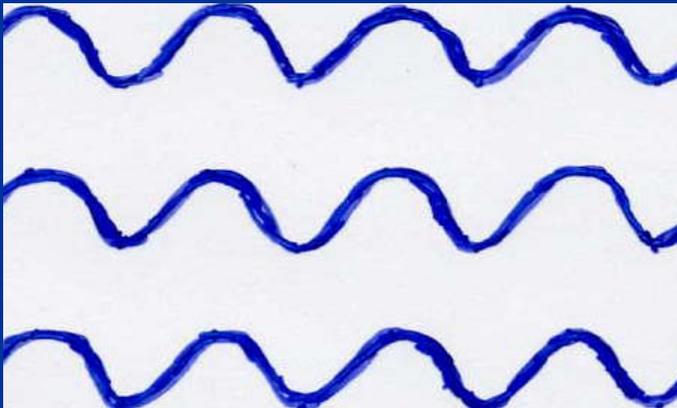
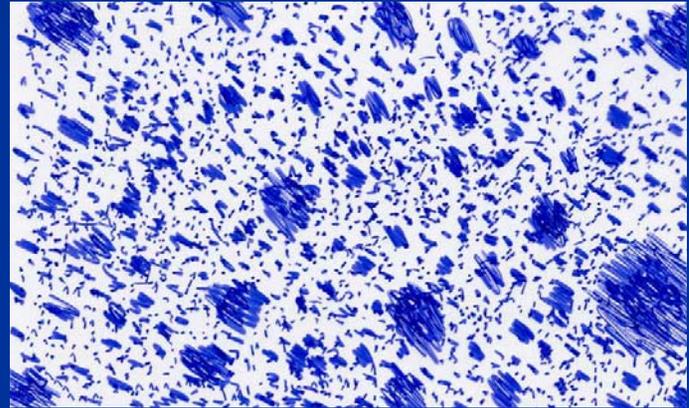
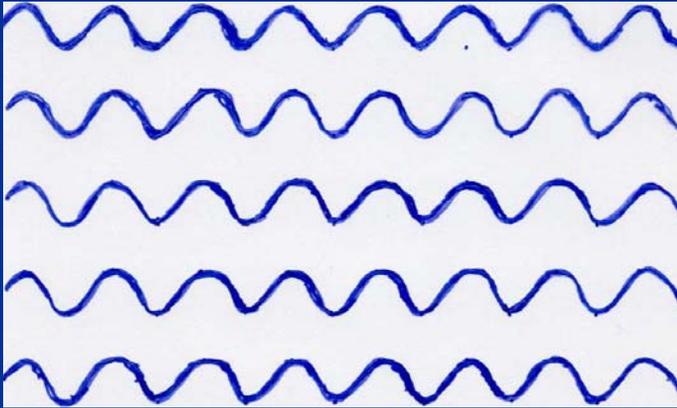
Sieht die Physik noch genauso aus ?

Skalen – invariant = Dilatations – symmetrisch

Wichtig für kritische Phänomene in statistischer Physik

*Wenn eine feste Massen – oder Längen - Skala eine Rolle spielt :*

*Keine Dilatations – Symmetrie !*



# Dilatations - Symmetrie

Reskalieren der Längenskalen

$$\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{c}^{-1} \mathbf{x}$$

begleitet von Reskalieren des Skalar - Felds

$$\chi \rightarrow \mathbf{c} \chi$$

**Verschiedene Längeneinheiten entsprechen verschiedenen Werten des Kosmon - Felds  $\chi$  !**

# Dilatations – symmetrische Gravitationstheorie

- Lagrange Dichte:

$$L = \sqrt{g} \left( -\frac{1}{2} \chi^2 R + \frac{1}{2} (\delta - 6) \partial^\mu \chi \partial_\mu \chi \right. \\ \left. + V(\chi) + h \chi \bar{\psi} \psi \right)$$

- Dilatations - Symmetrie für

$$V = \lambda \chi^4, \lambda = \text{const.}, \delta = \text{const.}, h = \text{const.}$$

# Woher kommen die beobachteten Massen – Skalen ?

Spontane Symmetriebrechung :

$$\chi \neq 0$$

Verletzt das Reskalieren der Massen und Längenskalen

$$\chi \rightarrow c \chi$$

Goldstone Boson = Dilaton  
**masseloses Teilchen !**

# Dilatations Anomalie

- Quanten - Fluktuationen führen zu Dilatations - Anomalie
- Laufende Kopplungen : **Hypothese**

$$\partial\lambda/\partial\ln\chi = -A\lambda, \quad \partial\delta/\partial\ln\chi = E\delta^2$$

- Renormierungs-Skala  $\mu$  : (Impuls-Skala )
- $\lambda \sim (\chi/\mu)^{-A}$

$$L = \sqrt{g} \left( -\frac{1}{2} \chi^2 R + \frac{1}{2} (\delta - 6) \partial^\mu \chi \partial_\mu \chi + V(\chi) + h \chi \bar{\psi} \psi \right)$$

$$V = \lambda \chi^4$$

# Dilatations Anomalie

$$\partial\lambda/\partial\ln\chi = -A\lambda$$

■  $V \sim \chi^{4-A}$  ,  $M_{\text{planck}}(\chi) \sim \chi$

$$V = \lambda\chi^4$$

■  $V/M_p^4 \sim \chi^{-A}$  :

fällt für wachsendes  $\chi$  !!

# Grundlage für Kosmologie

$$L = \sqrt{g} \left( -\frac{1}{2} \chi^2 R + \frac{1}{2} (\delta - 6) \partial^\mu \chi \partial_\mu \chi + c \chi^{4-A} \right)$$

Graviton + Kosmon

# Kosmologie

Kosmologie :  $\chi$  **wächst** mit der Zeit !

( Grund: Kopplung von  $\chi$  zum gravitationellen Krümmungs - Skalar )

Für wachsendes  $\chi$  : Das Verhältnis  $V/M^4$  tendiert zu Null !



**Effektive kosmologische Konstante  
verschwindet asymptotisch für große  $t$  !**

# Weyl Reskalierung

$$\text{Weyl Reskalierung : } g_{\mu\nu} \rightarrow (M/\chi)^2 g_{\mu\nu},$$
$$\varphi/M = \ln (\chi^4/V(\chi))$$

$$L = \sqrt{g} \left( -\frac{1}{2} M^2 R + \frac{1}{2} k^2(\phi) \partial^\mu \phi \partial_\mu \phi \right. \\ \left. + V(\phi) + m(\phi) \bar{\psi} \psi \right)$$

Exponentielles Potenzial :  $V = M^4 \exp(-\varphi/M)$

**Keine zusätzliche Konstante !**

Ohne Dilatations – Anomalie :

$V = \text{const.}$

Masseloses Goldstone Boson = Dilaton

Dilatations – Anomalie :

$V(\varphi)$

Winzige zeitabhängige Masse : Kosmon

# Kosmologie mit Dunkler Energie

# Homogenes und isotropes Universum

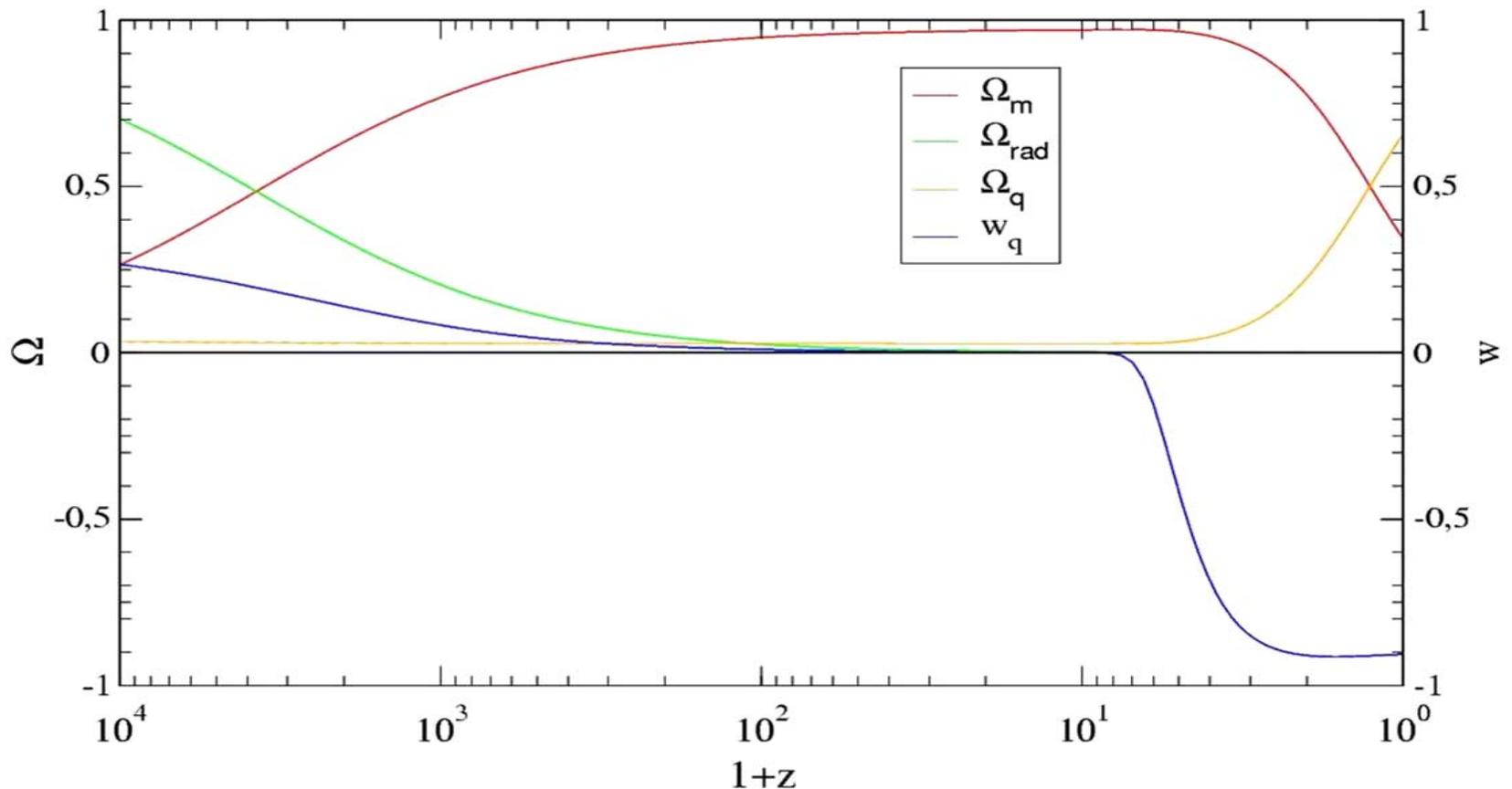
- $\varphi(\mathbf{x},t)=\varphi(t)$
- Homogenes Kosmonfeld
- Homogener Beitrag zur Energiedichte

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

- Dynamische Dunkle Energie !

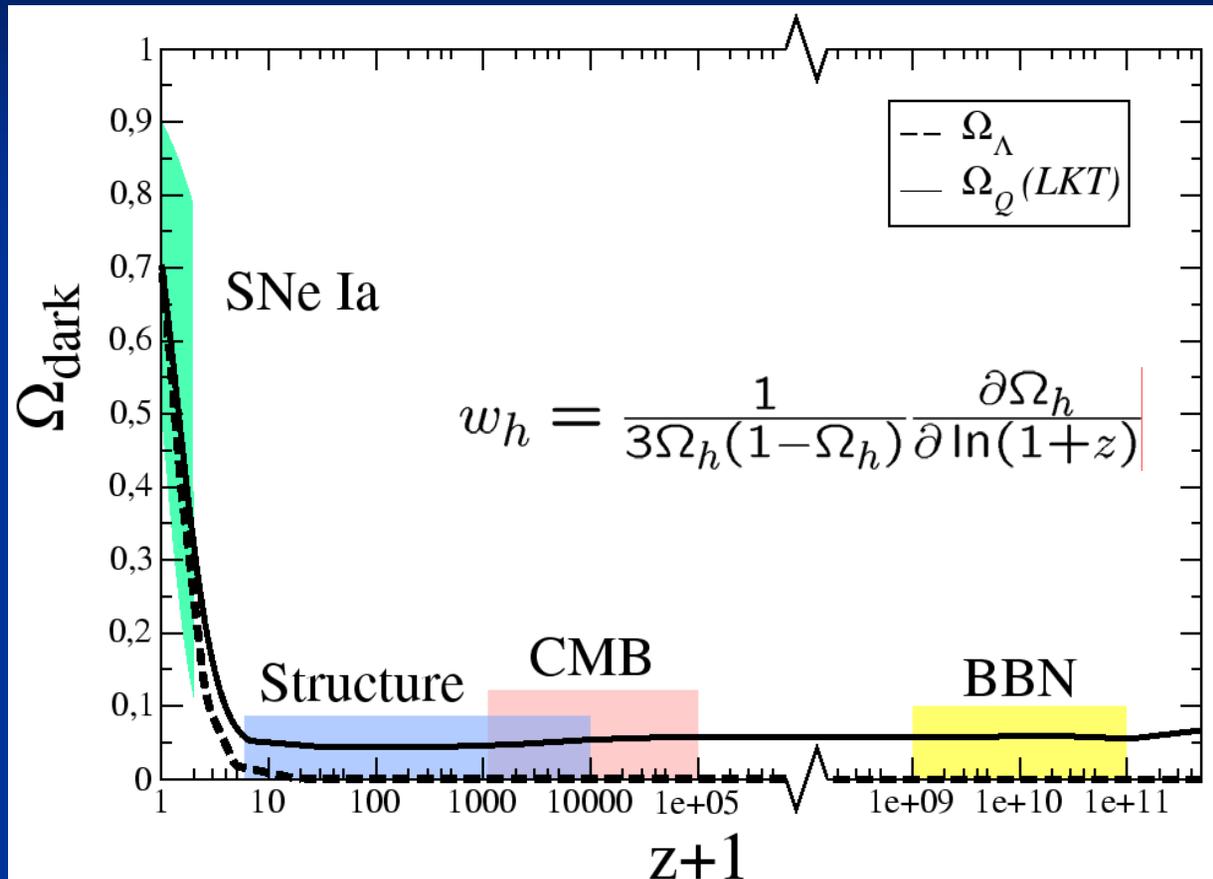
# Quintessenz wird heute wichtig

Crossover Quintessence Evolution



Wie kann man Quintessenz von  
kosmologischer Konstanten  
unterscheiden ?

# Zeitabhängigkeit der dunklen Energie

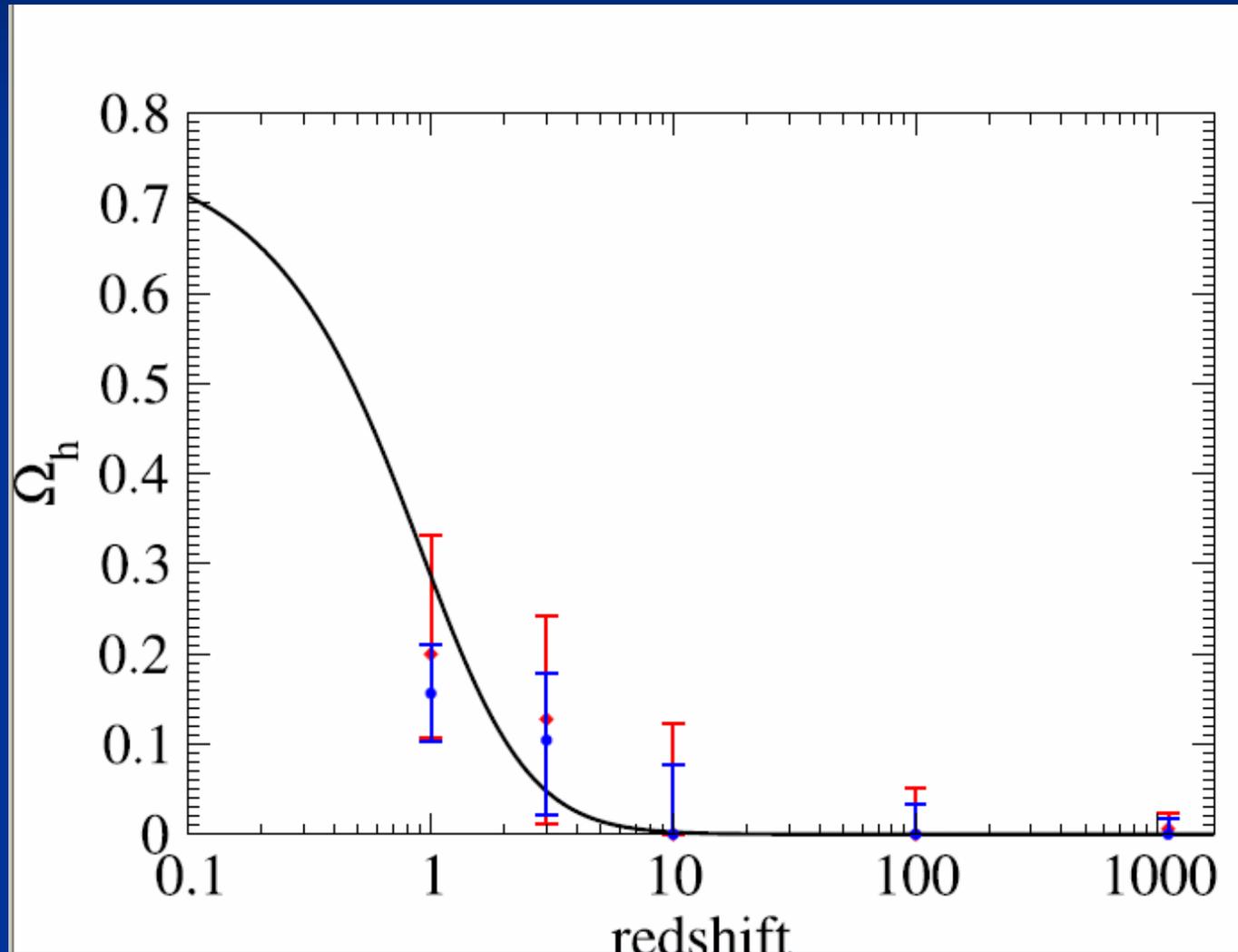


$w=p/\rho$

Kosmologische Konstante :  $\Omega_h \sim t^2 \sim (1+z)^{-3}$

M.Doran,...

# Beobachtung: Grenzen für $\Omega_h$



# Wie unterscheidet man $Q$ von $\Lambda$ ?

A) Messung  $\Omega_h(z) \iff H(z)$

$\Omega_h(z)$  zur Zeit der  
Strukturbildung , CMB - Emission  
oder Nukleosynthese

B) Zeitvariation der fundamentalen  
“Konstanten”

# Quintessenz und Zeitabhängigkeit fundamentaler Konstanten

C.Wetterich , Nucl.Phys.B302,645(1988)

# Sind fundamentale “Konstanten” zeitabhängig ?

Feinstrukturkonstante  $\alpha$  (elektrische Ladung)

Verhältnis Neutron-Masse zu Proton-Masse

Verhältnis Nukleon-Masse zu Planck-Masse

# Quintessenz und Zeitabhängigkeit der “fundamentalen Konstanten”

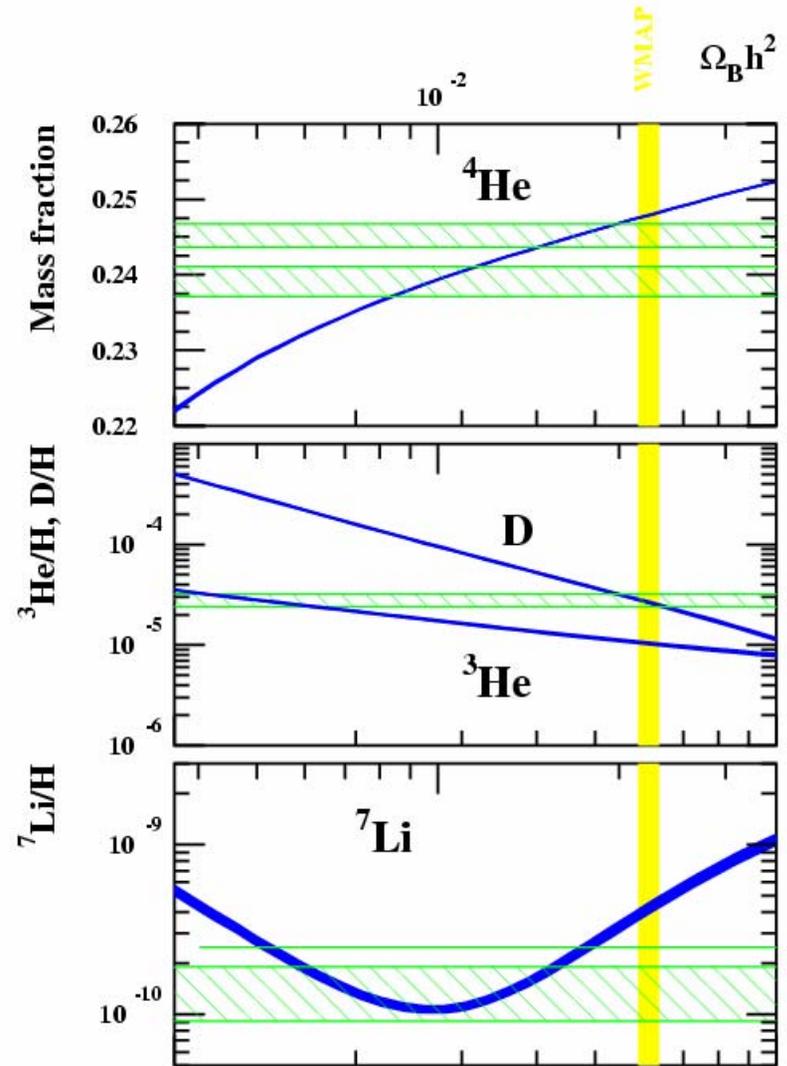
- Feinstrukturkonstante hängt vom Wert des Kosmon Felds ab:  $\alpha(\varphi)$

ähnlich Higgsfeld in schwacher Wechselwirkung

- Zeitentwicklung von  $\varphi$    
Zeitentwicklung von  $\alpha$

Jordan

Primordiale  
Häufigkeiten der  
leichten Elemente  
aus der  
Nukleosynthese



$^4\text{He}$  :

typische mögliche Werte der  
Variation der Feinstrukturkonstanten:

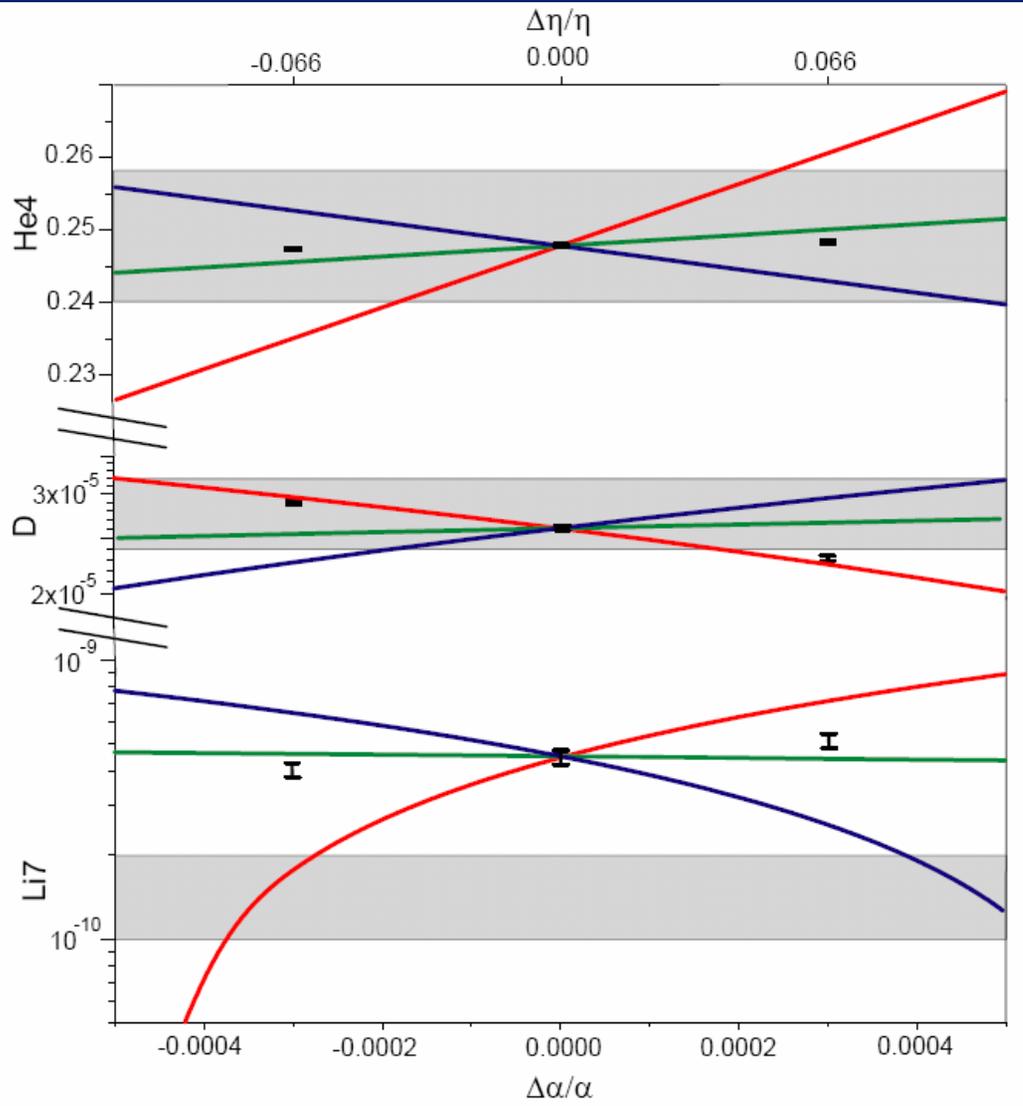
$$\Delta\alpha/\alpha (z=10^{10}) = -1.0 \cdot 10^{-3} \quad \text{GUT 1}$$

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

C.Mueller, G.Schaefer, ...

# Variation der Li- Häufigkeit

He



D

Li

gegenwärtige  
Beobachtungen:  
 $1\sigma$

T.Dent,  
S.Stern,...

# drei GUT Modelle

- Vereinheitlichungs-Skala  $\sim$  Planck Masse
- 1) Alle Massen der Teilchenphysik  $\sim \Lambda_{\text{QCD}}$
- 2) Fermi Skala und Fermion-Massen  $\sim$  Vereinheitlichungs-Skala
- 3) Fermi Skala ändert sich schneller als  $\Lambda_{\text{QCD}}$

$\Delta\alpha/\alpha \approx 4 \cdot 10^{-4}$  erlaubt für GUT 1 und 3 , grösser für GUT 2

$\Delta\ln(M_n/M_p) \approx 40 \Delta\alpha/\alpha \approx 0.015$  erlaubt

Zeitvariation der Kopplungskonstanten  
ist winzig –

wäre aber von grosser Bedeutung !

Mögliches Signal für Quintessenz

# Zusammenfassung

- $\Omega_h = 0.75$
- $Q/\Lambda$  : dynamische und statische  
dunkle Energie unterscheidbar
- $Q$  : zeitlich veränderliche  
“fundamentale Kopplungen”,  
Verletzung des Äquivalenzprinzips

????????????????????????????????

Warum wird Quintessenz gerade in der heutigen kosmologischen Epoche wichtig ?

Haben dunkle Energie und dunkle Materie etwas miteinander zu tun ?

Kann Quintessenz in einer fundamentalen vereinheitlichten Theorie erklärt werden ?

# Die Antwort der Künstlerin ...



*Laura Pesce*



Ende

# Kosmodynamik

Kosmon vermittelt neue langreichweitige  
Wechselwirkung

Reichweite : Grösse des Universums – Horizont

Stärke : schwächer als Gravitation

Photon            Elektrodynamik

Graviton        Gravitation

Kosmon         Kosmodynamik

Kleine Korrekturen zum Gravitationsgesetz

# Verletzung des Äquivalenzprinzips

Verschiedene Kopplung  
des Kosmons an  
Proton und Neutron

Differentielle  
Beschleunigung

Scheinbare Verletzung  
des Äquivalenzprinzips



# Differentielle Beschleunigung $\eta$

Für vereinheitlichte Theorien ( GUT ) :

$$\eta = -1.75 \cdot 10^{-2} \Delta R_z \left( \frac{\partial \ln \alpha}{\partial z} \right)^2 \frac{1 + \tilde{Q}}{\Omega_h (1 + w_h)}$$

$$\Delta R_z = \frac{\Delta Z}{Z + N} \approx 0.1$$

Q : Zeitabhängigkeit anderer Parameter

*Verknüpfung zwischen Zeitabhängigkeit von  $\alpha$*

*und Verletzung des Äquivalenzprinzips*

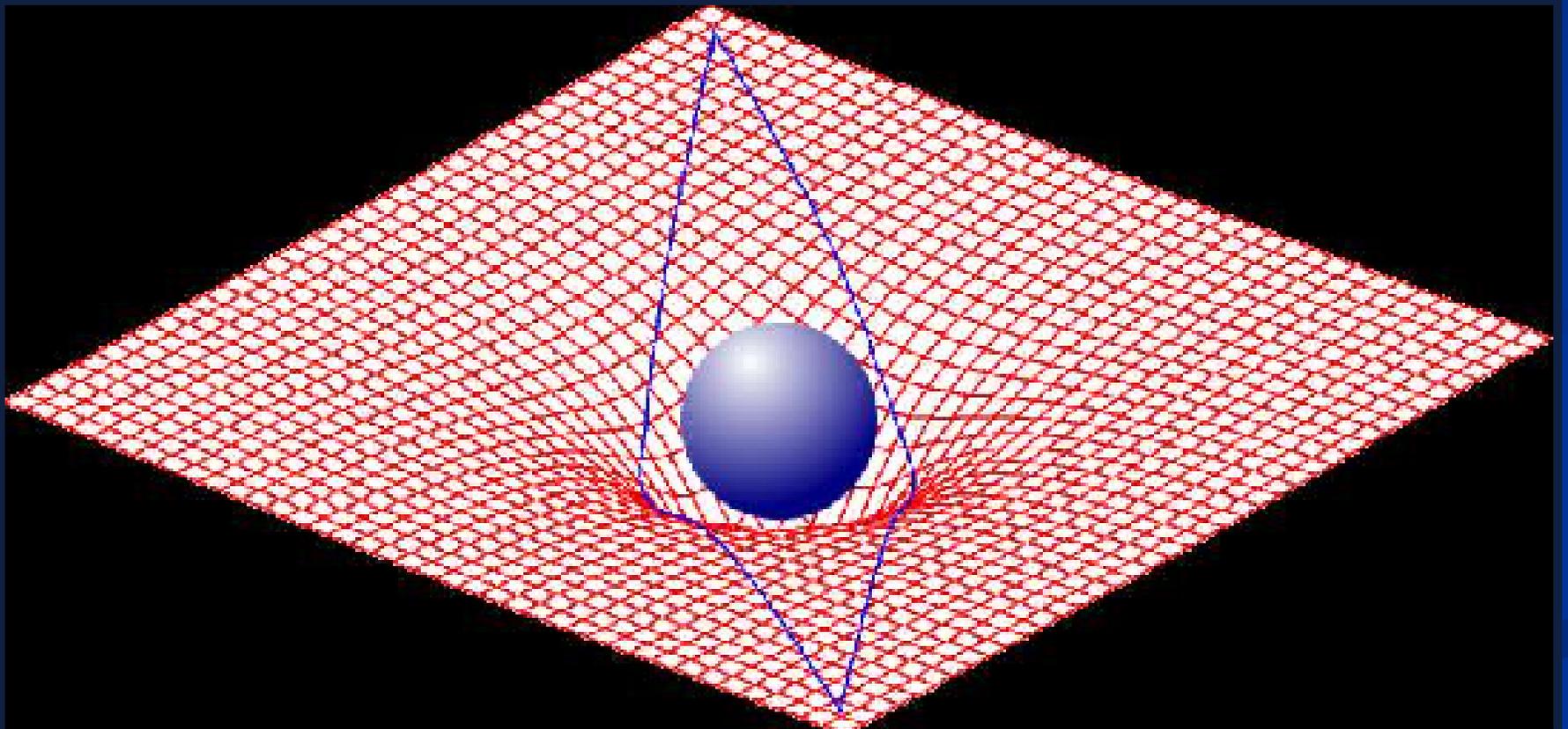
differentielle Beschleunigung  $\eta$

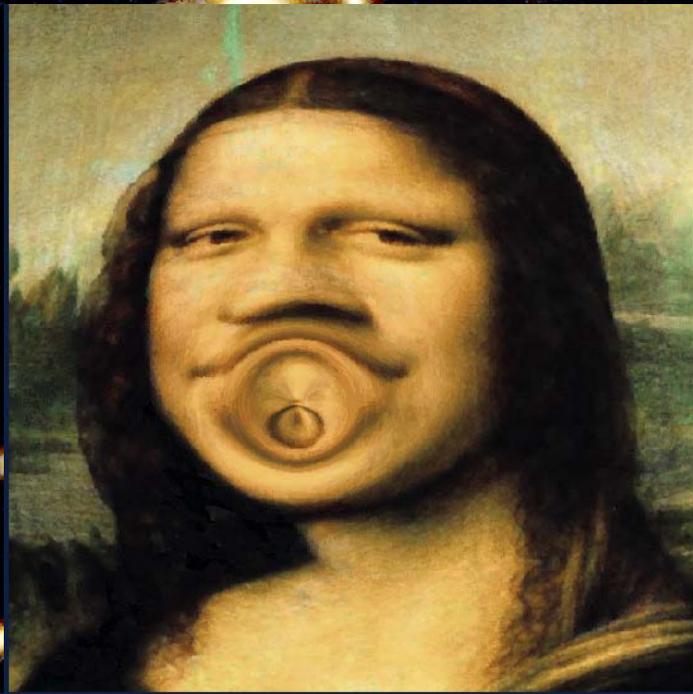
typisch :  $\eta = 10^{-14}$

**MICROSCOPE – Satteliten-Mission**



# Lichtstrahlen werden durch Massen abgelenkt





Gravitationslinse, HST

# 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

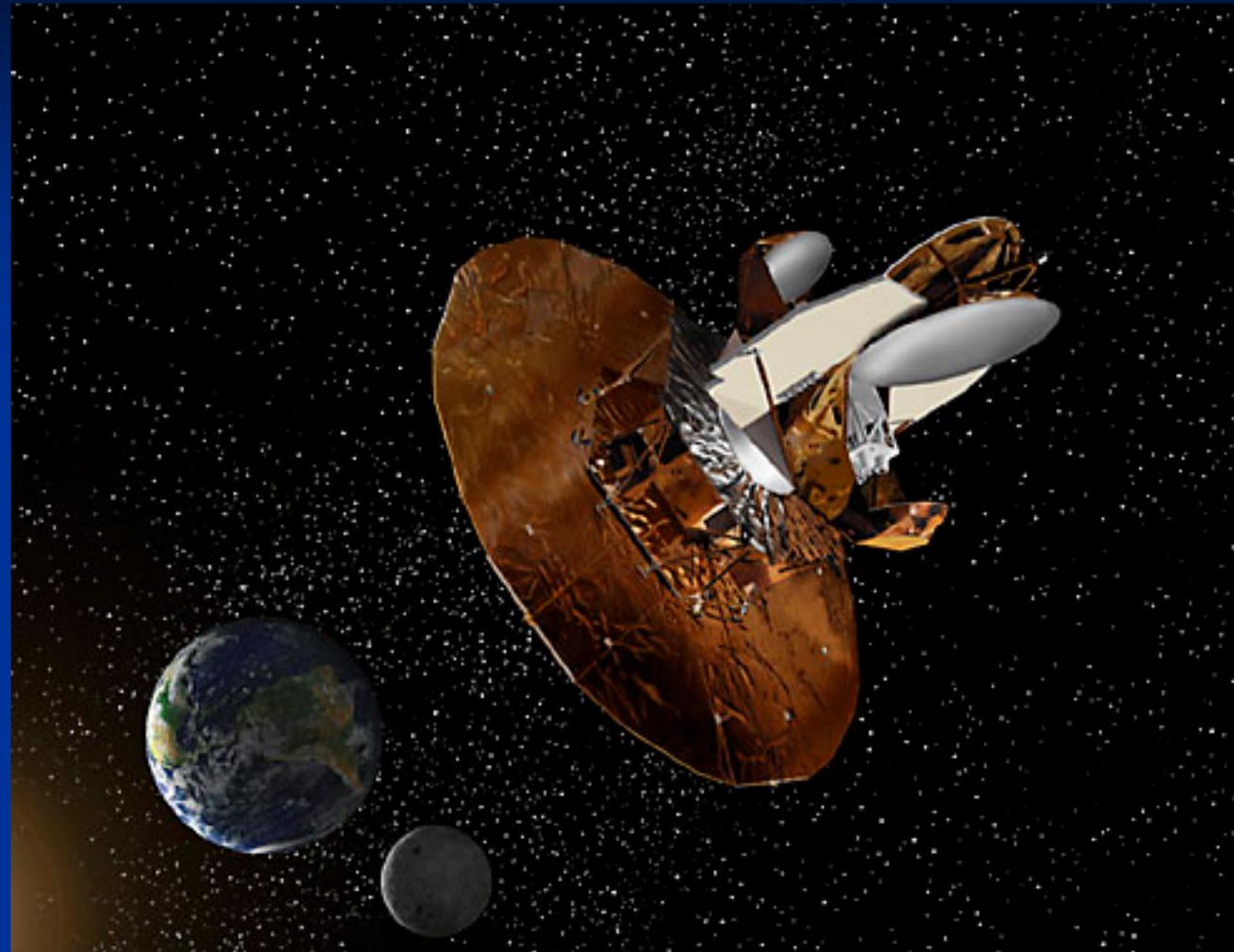
Ed Wollack

### Brown

Greg Tucker

### UCLA

Ned Wright



### UBC

Mark Halpern

### Chicago

Stephan Meyer

### Princeton

Chris Barnes

Norm Jarosik

Eiichiro Komatsu

Michael Nolte

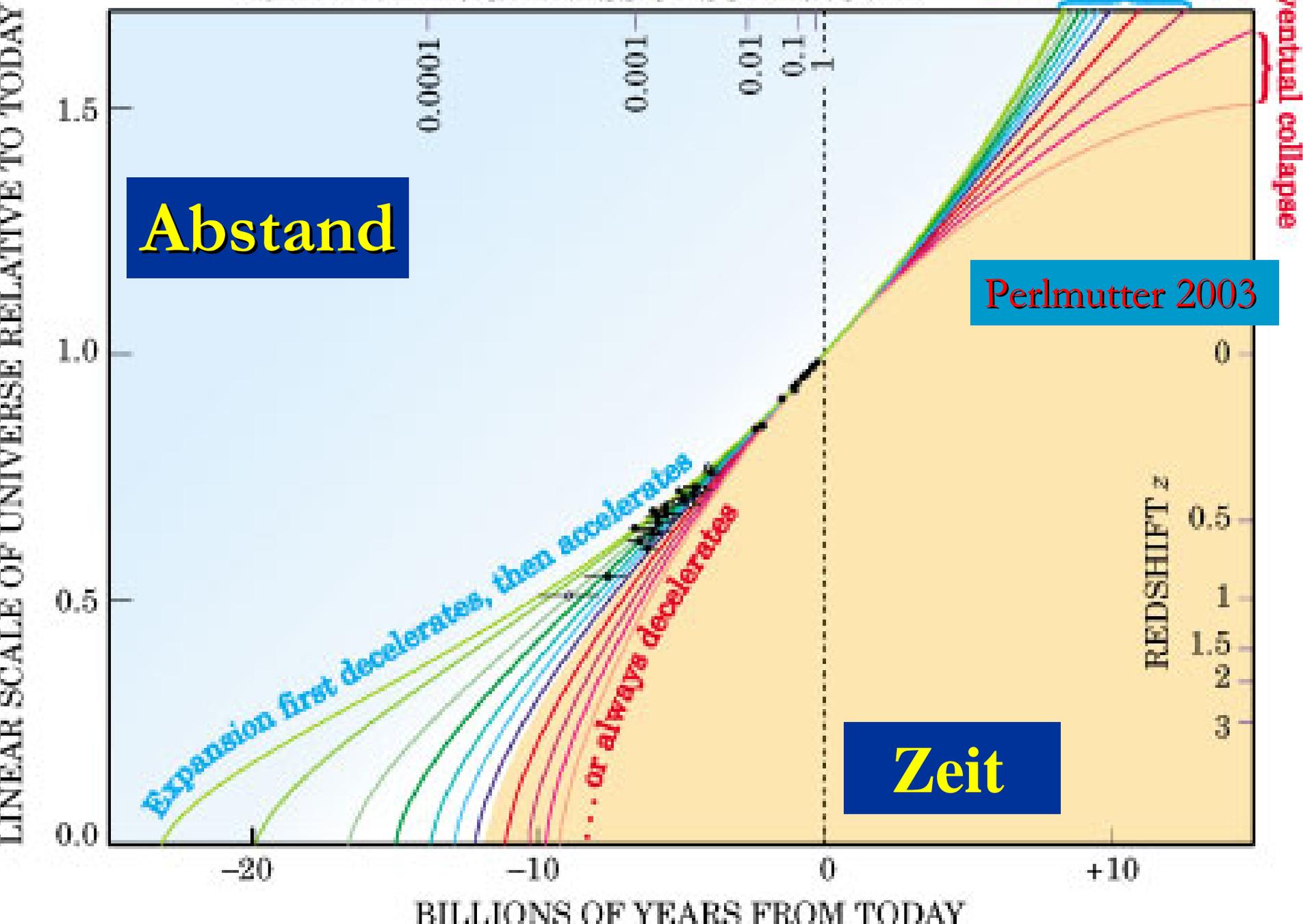
Lyman Page

Hiranya Peiris

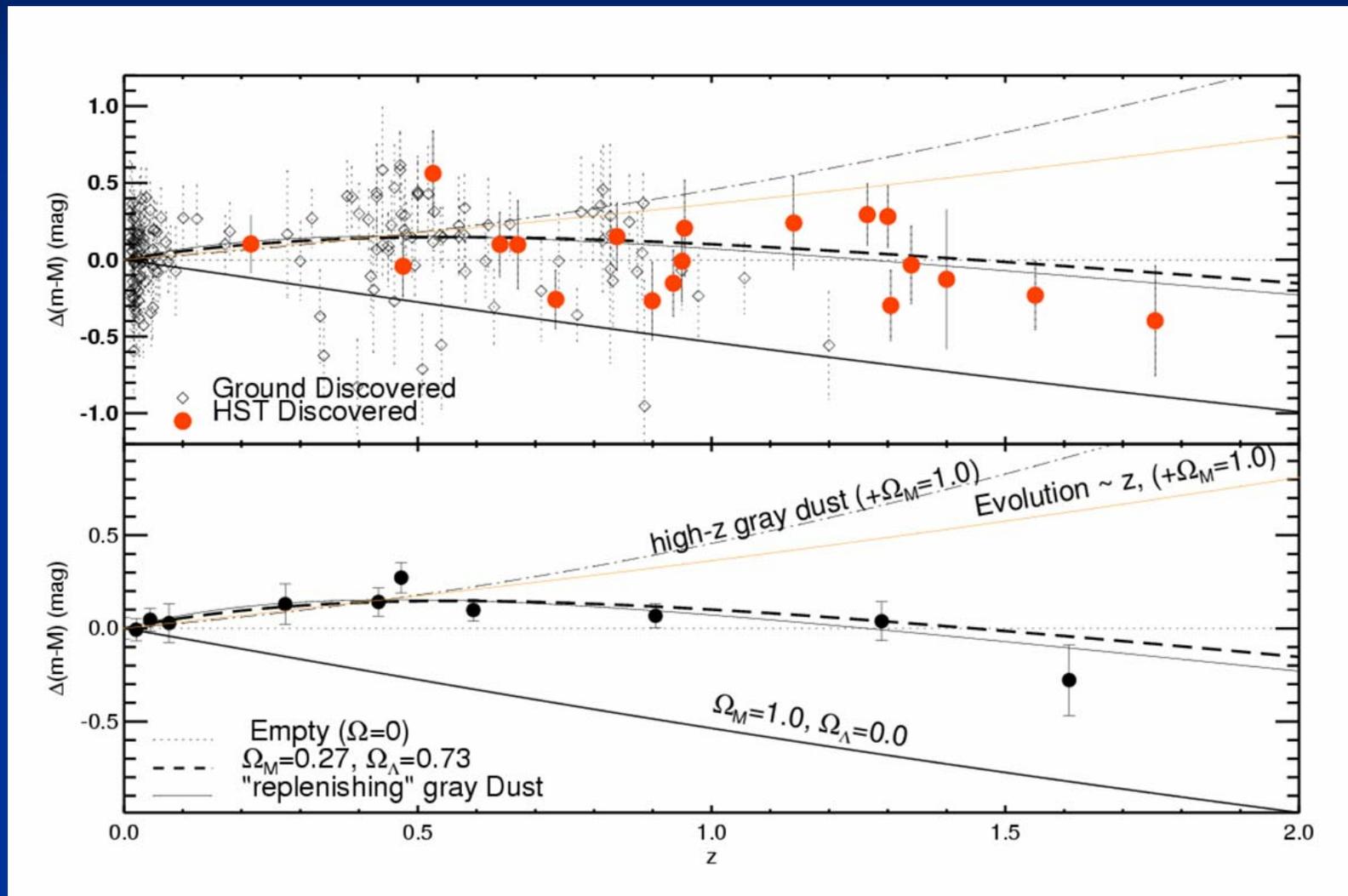
David Spergel

Licia Verde

# RELATIVE BRIGHTNESS OF SUPERNOVAE



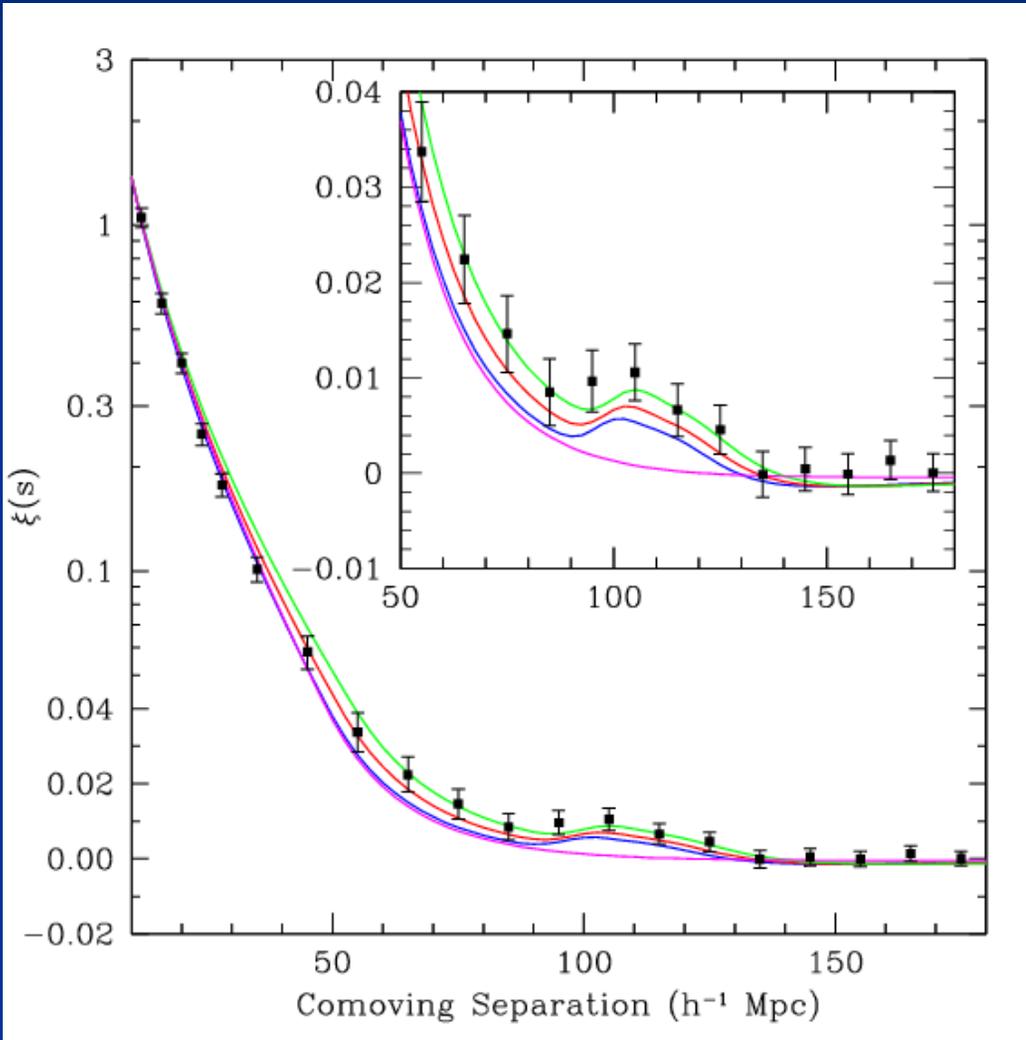
# Supernova Ia Hubble-Diagramm



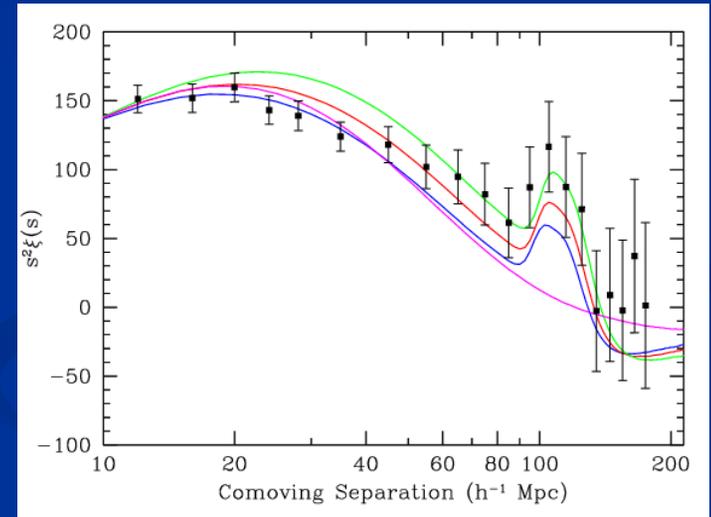
Rotverschiebung  $z$

Riess et al. 2004

# Baryon - Peak



SDSS



Galaxien –  
Korrelations –  
Funktion

# Akustischer Peak in Galaxien - Korrelationsfunktion

- Geometrischer Test für Dunkle Energie
- Bei Aussenden der Hintergrundstrahlung :  
Baryonen und Photonen sind gekoppelt
- Lineare Störungstheorie : Akustischer Peak  
bleibt im Spektrum der Baryon – Fluktuationen
- Lage des Peaks : Test für Verhältnis der Skalen  
bei  $z = 0.35$  und  $z = 1089$
- Konsistent mit Dunkler Energie :  $\Omega_m = 0.27(3)$

# Zustandsgleichung

$$p = T - V$$

Druck

kinetische Energie

$$\rho = T + V$$

Energiedichte

$$T = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2$$

Zustandsgleichung

$$w = \frac{p}{\rho} = \frac{T - V}{T + V}$$

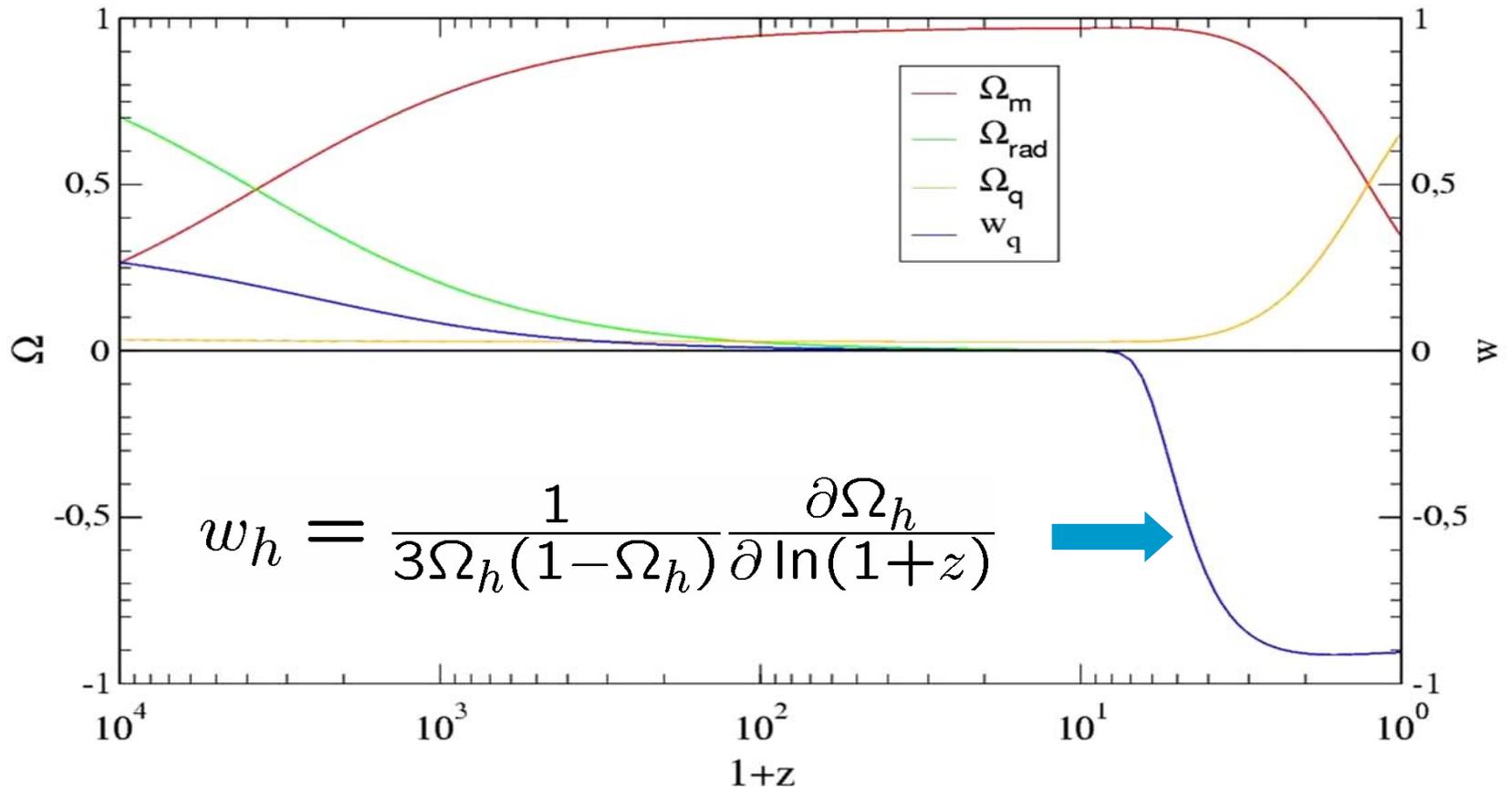
hängt von spezifischer Evolution des Skalarfelds ab

# Negativer Druck

- $w < 0$        $\Omega_h$  wächst
- $w < -1/3$       Expansion des Universums ist beschleunigt
- $w = -1$       Kosmologische Konstante

# Negativer Druck

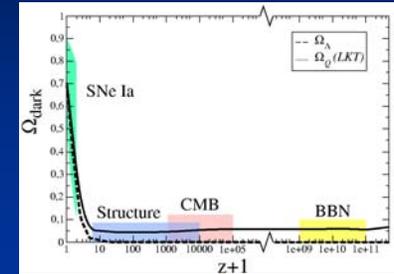
Crossover Quintessence Evolution



**Dunkle Energie  
im frühen Universum :**

**unter 10 %**

# Zunehmende Wichtigkeit der Dunklen Energie



Vorhersage:

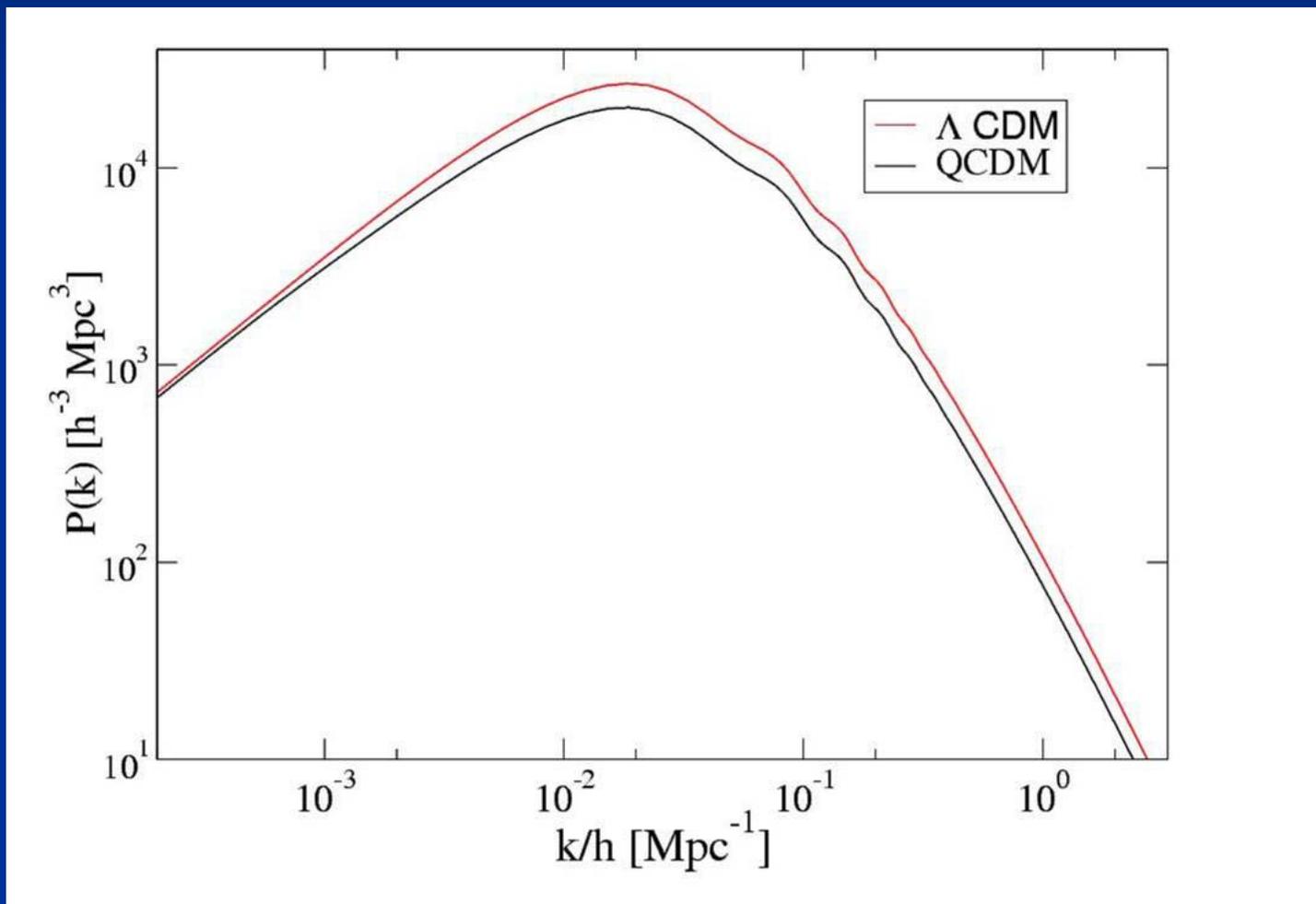
$$w_h = \frac{1}{3\Omega_h(1-\Omega_h)} \frac{\partial\Omega_h}{\partial\ln(1+z)}$$

*Die Expansion  
des Universums  
beschleunigt sich heute !*

$$w_h < -1/3$$

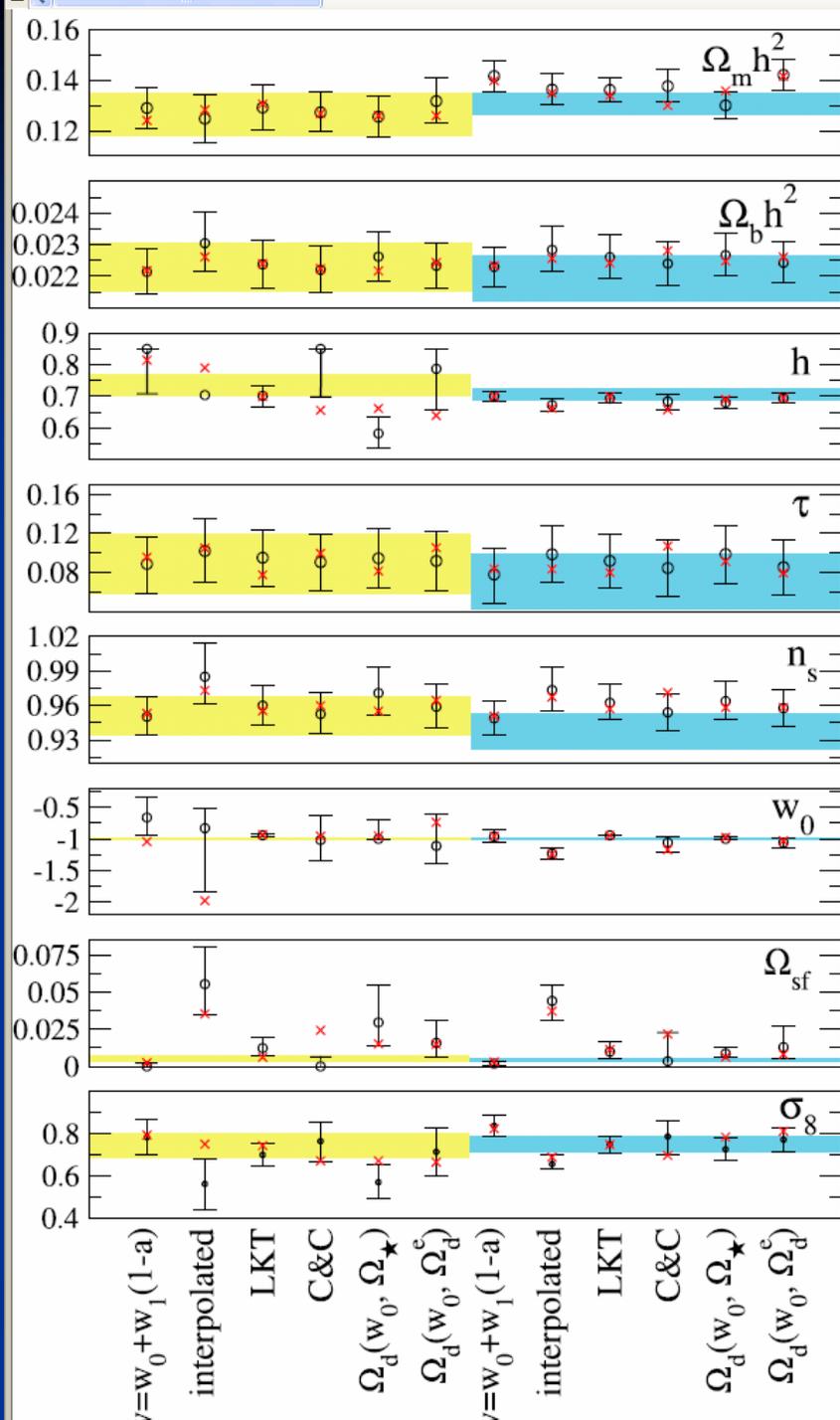
# *Effekte früher dunkler Energie*

## *Strukturwachstum wird verlangsamt*



# Grenzen für frühe dunkle Energie nach WMAP'06

G.Robbers, M.Doran, ...



# coincidence problem

What is responsible for increase of  $\Omega_h$  for  $z < 10$  ?

# a) Properties of cosmon potential or kinetic term

## Late quintessence

- $w$  close to -1
- $\Omega_h$  negligible in early cosmology
  
- needs tiny parameter, similar to cosmological constant

## Early quintessence

- $\Omega_h$  changes only modestly
- $w$  changes in time

## transition

- special feature in cosmon potential or kinetic term becomes important “now”
- tuning at ‰ level

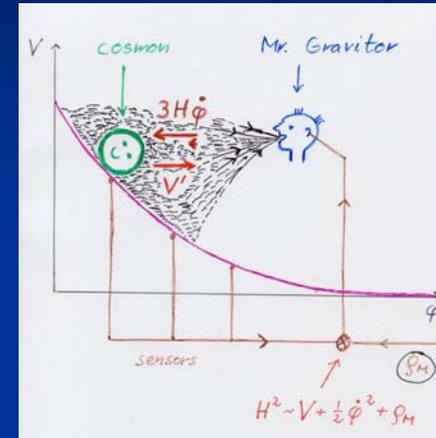
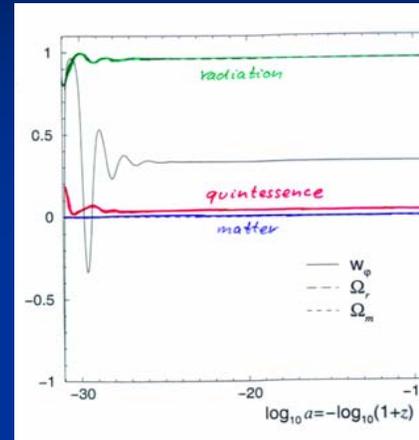
# Dynamics of quintessence

- Cosmon  $\varphi$  : scalar singlet field
- Lagrange density  $L = V + \frac{1}{2} \mathbf{k}(\varphi) \partial\varphi \partial\varphi$   
(units: reduced Planck mass  $M=1$ )
- Potential :  $V = \exp[-\varphi]$
- “Natural initial value” in Planck era  $\varphi=0$
- today:  $\varphi=276$
- models characterized by “kinetial”  $\mathbf{k}(\varphi)$

# attractor solutions

Small almost constant  $k$  :

- Small almost constant  $\Omega_h$



➡ This can explain tiny value of Dark Energy !

Large  $k$  :

- Cosmon dominated universe ( like inflation )

$$\mathcal{L}(\phi) = \frac{1}{2}(\partial\phi)^2 k^2(\phi) + \exp[-\phi]$$

# Transition to cosmon dominated universe

- Large value  $k \gg 1$  : universe is dominated by scalar field
- $k$  increases rapidly : evolution of scalar field essentially stops
- Realistic and natural quintessence:  
 $k$  changes from small to large values after structure formation

## b) Quintessence reacts to some special event in cosmology

- Onset of matter dominance

K-essence

Amendariz-Picon, Mukhanov,  
Steinhardt

needs higher derivative  
kinetic term

- Appearance of non-linear structure

Back-reaction effect

needs coupling between  
Dark Matter and  
Dark Energy