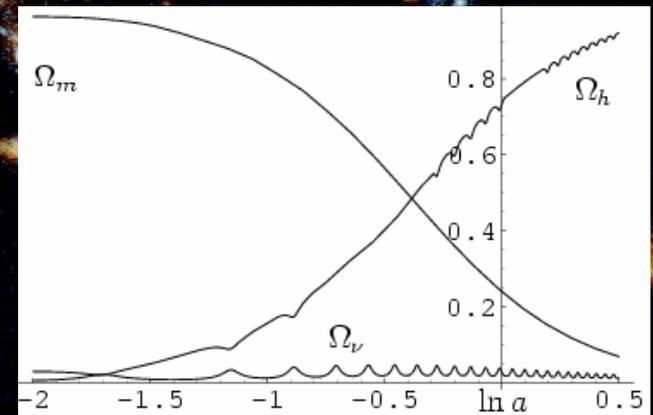
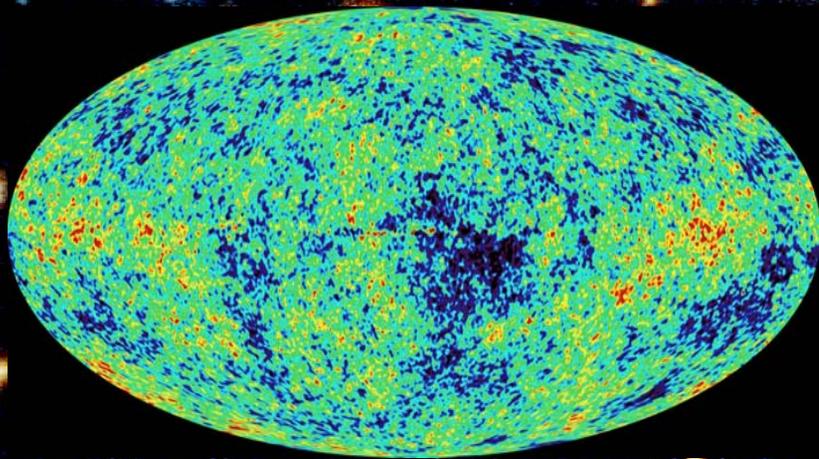


Dunkle Energie - ein kosmisches Rätsel



Quintessenz

C.Wetterich

A.Hebecker, M.Doran, M.Lilley, J.Schwindt,
C.Müller, G.Schäfer, E.Thommes, R.Caldwell, M.Bartelmann,
K.Kharwan, G.Robbers, T.Dent, S.Steffen,
L.Amendola, M.Baldi, N.Brouzakis, N.Tetradis,
D.Mota, V.Pettorino, T.Krüger, M.Neubert, N.Wintergerst

**Woraus besteht unser
Universum ?**



Quintessenz !

Feuer , Luft,
Wasser,
Erde !

Dunkle Energie dominiert das Universum

Energie - Dichte im Universum

=

Materie + Dunkle Energie

25 % + 75 %

Was ist Dunkle Energie ?

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

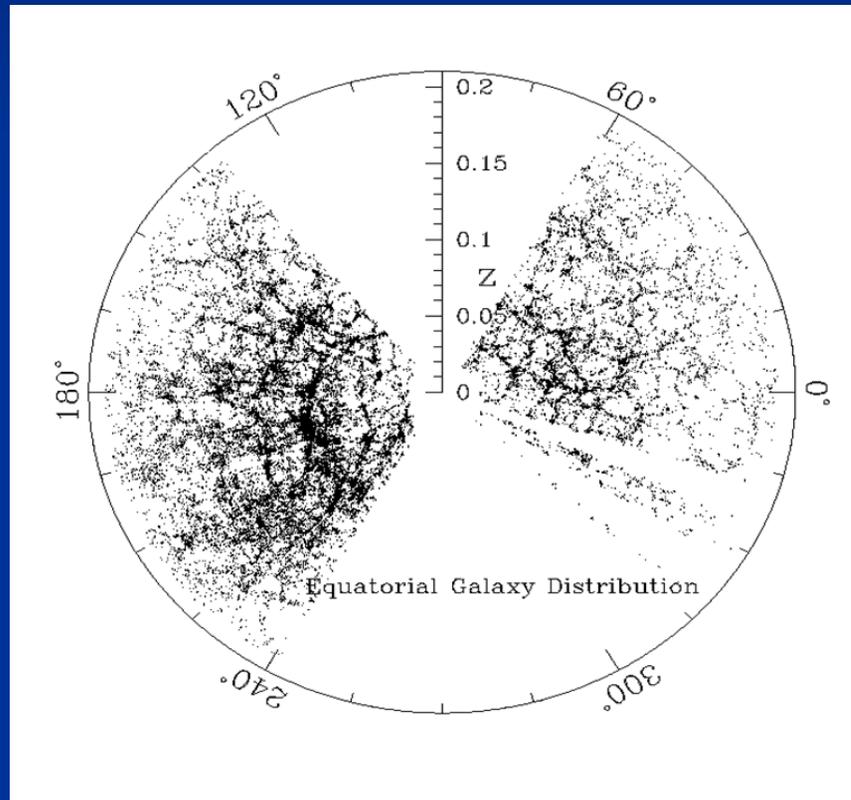
- $\Omega_b = \rho_b / \rho_c$

Anteil der Baryonen an der (kritischen)
Energiedichte

Baryonen/Atome

SDSS

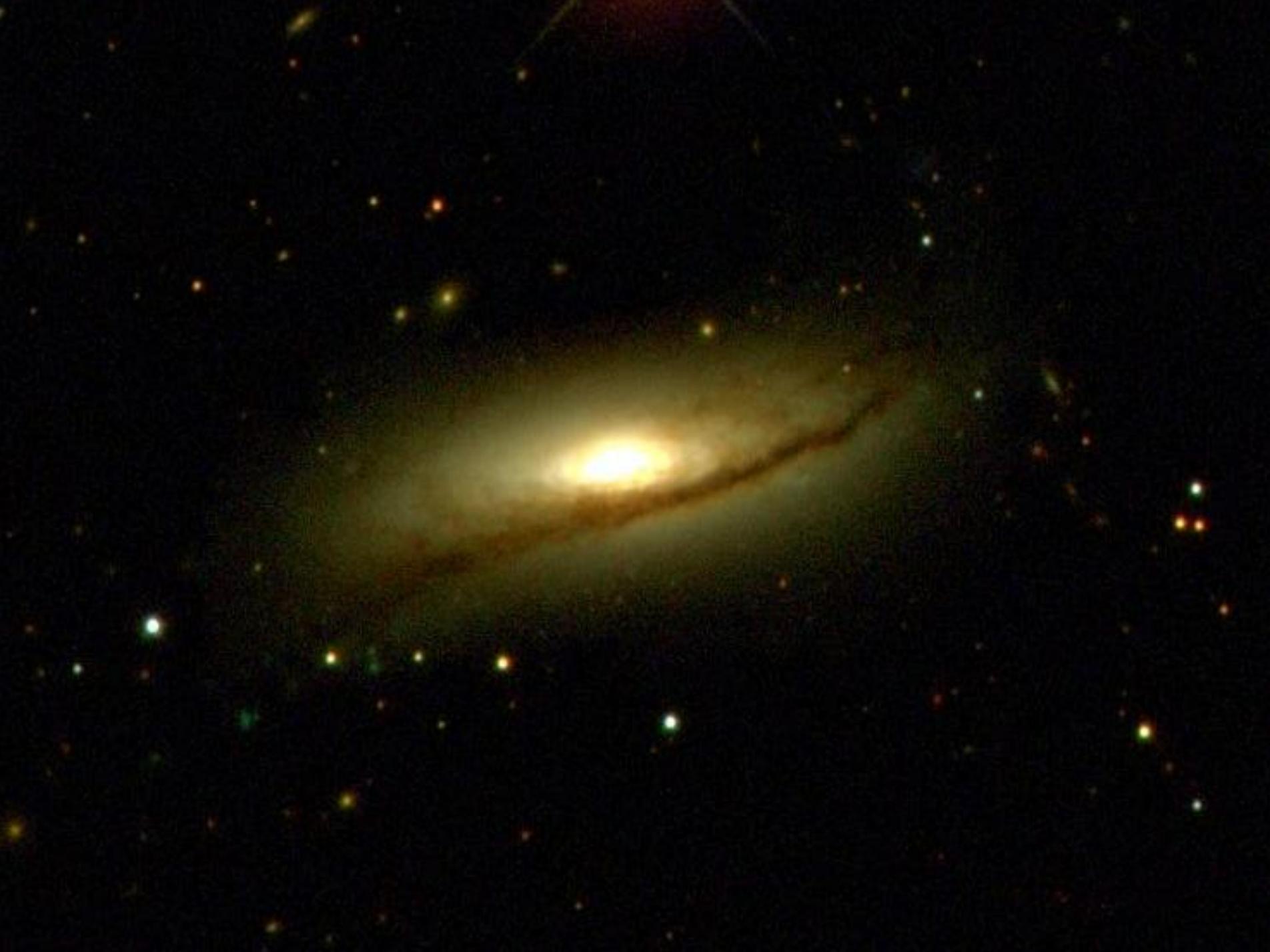
~60,000 von
>300,000
Galaxien



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



Abell 2255 Cluster
~300 Mpc

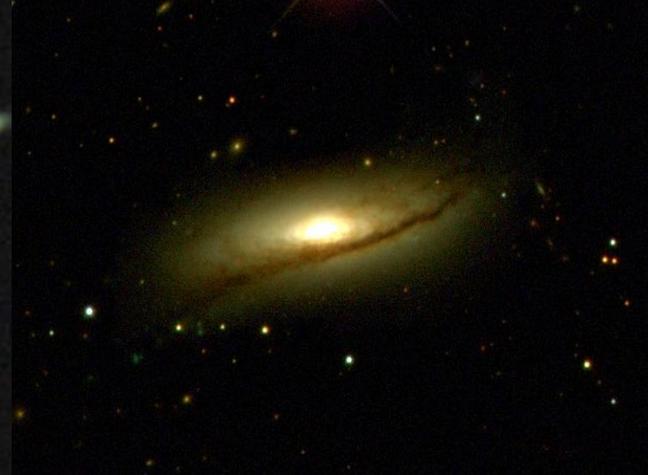


$$\Omega_b = 0.045$$

Von Nukleosynthese,
Kosmischer Hintergrundstrahlung

Materie :

Alles , was klumpt



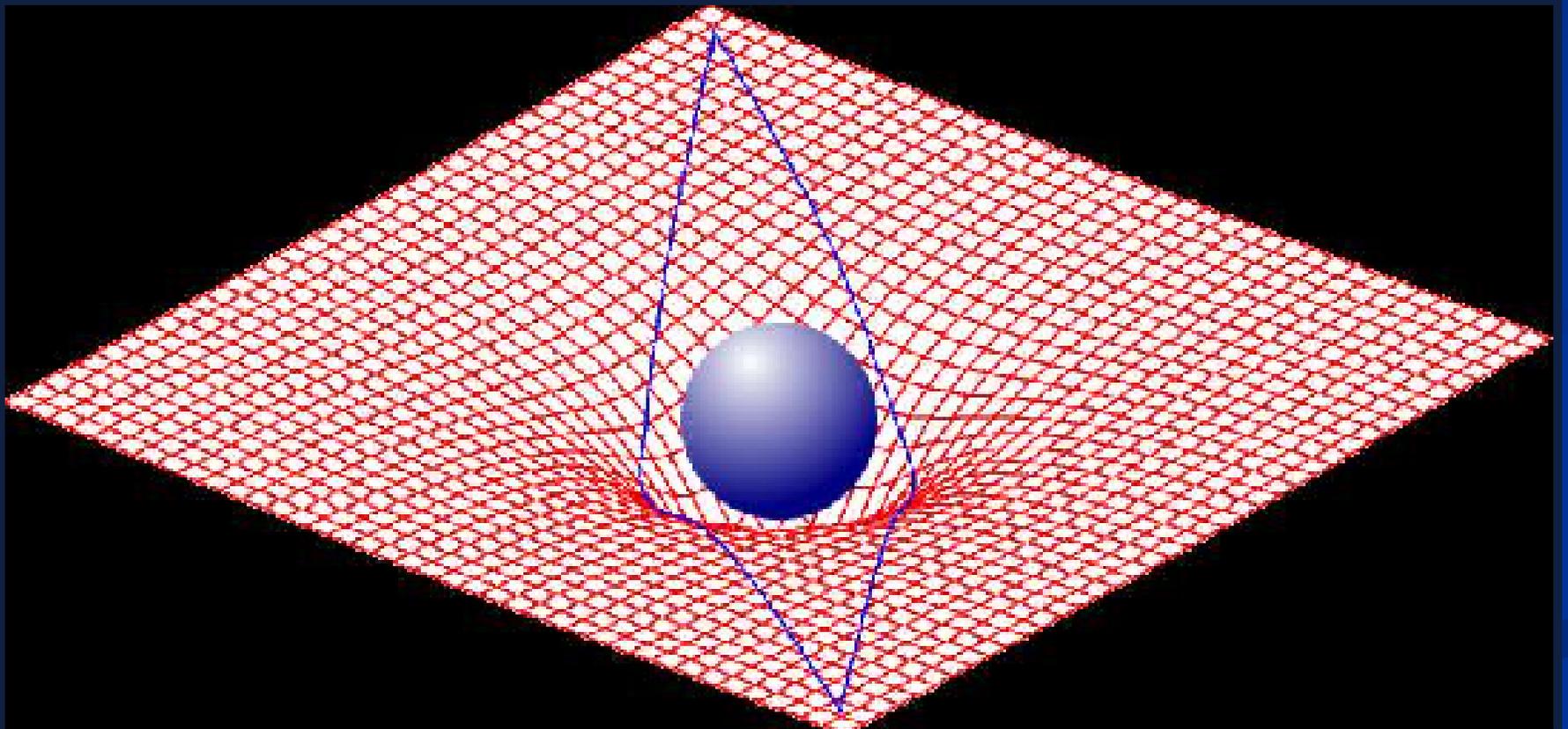
Dunkle Materie

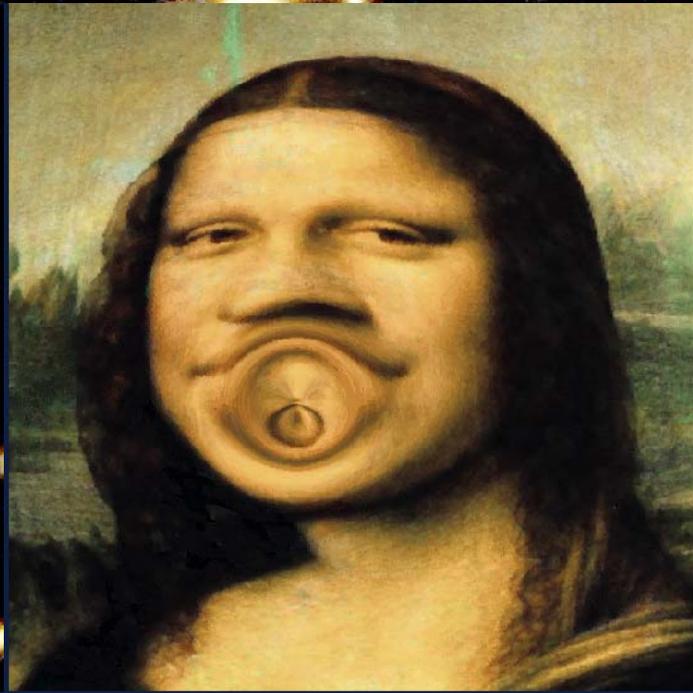
- $\Omega_m = 0.25$ “Materie” insgesamt
- Die meiste Materie ist dunkel !
- Bisher nur durch Gravitation spürbar
- Alles was klumpt!  Gravitationspotential



Gravitationslinse, HST

Lichtstrahlen werden durch Massen abgelenkt





Gravitationslinse, HST

Dunkle +
baryonische Materie :

Alles was klumpt !

$$\Omega_m = 0.25$$

Räumlich flaches Universum

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

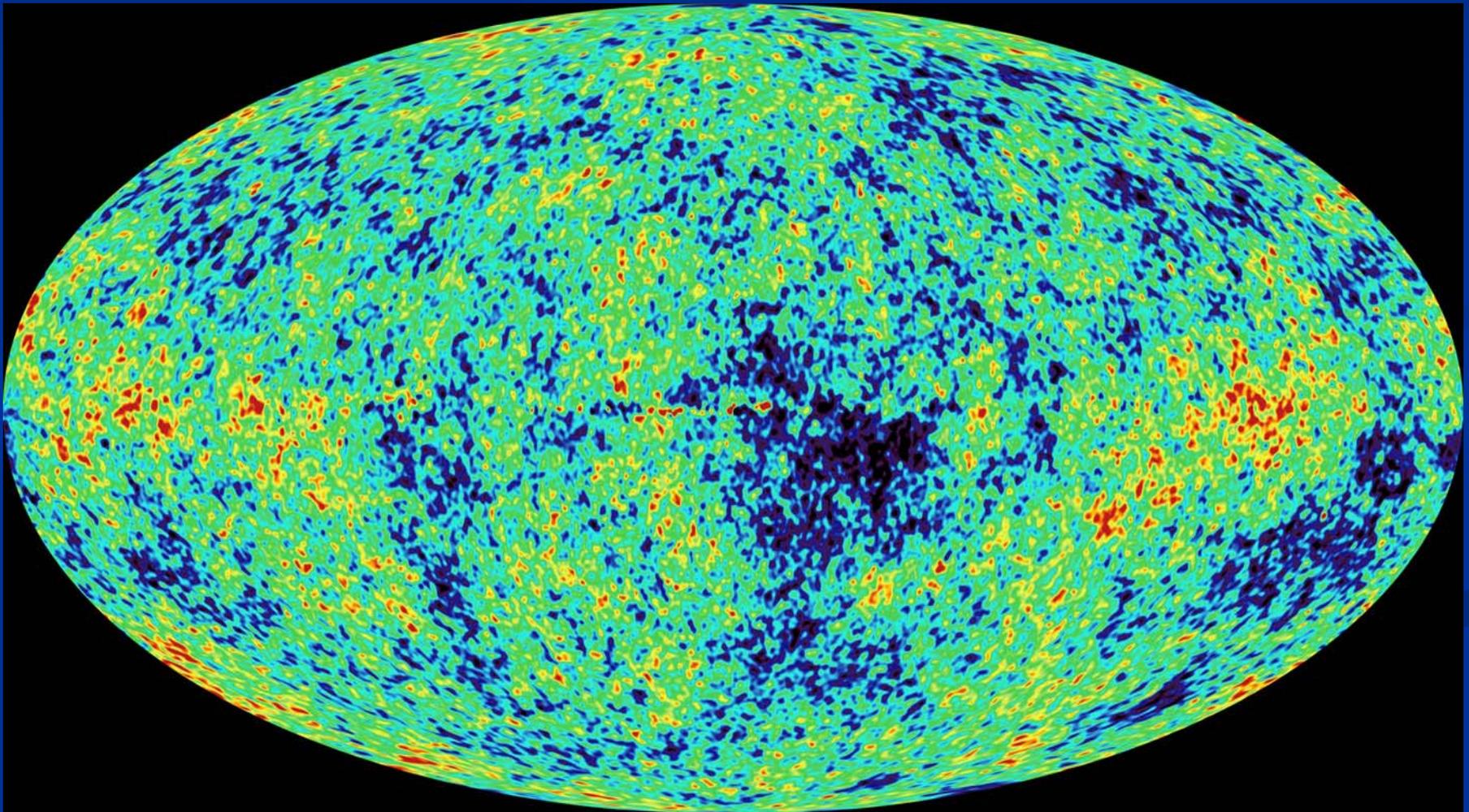
- Theorie (Inflationäres Universum)

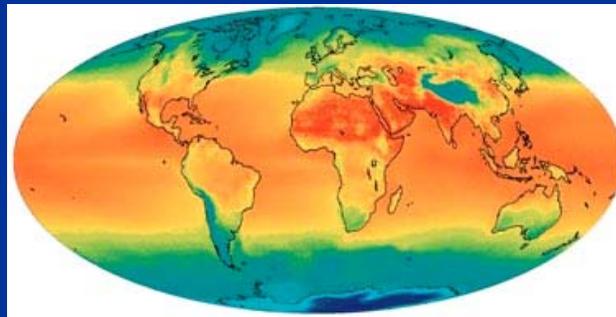
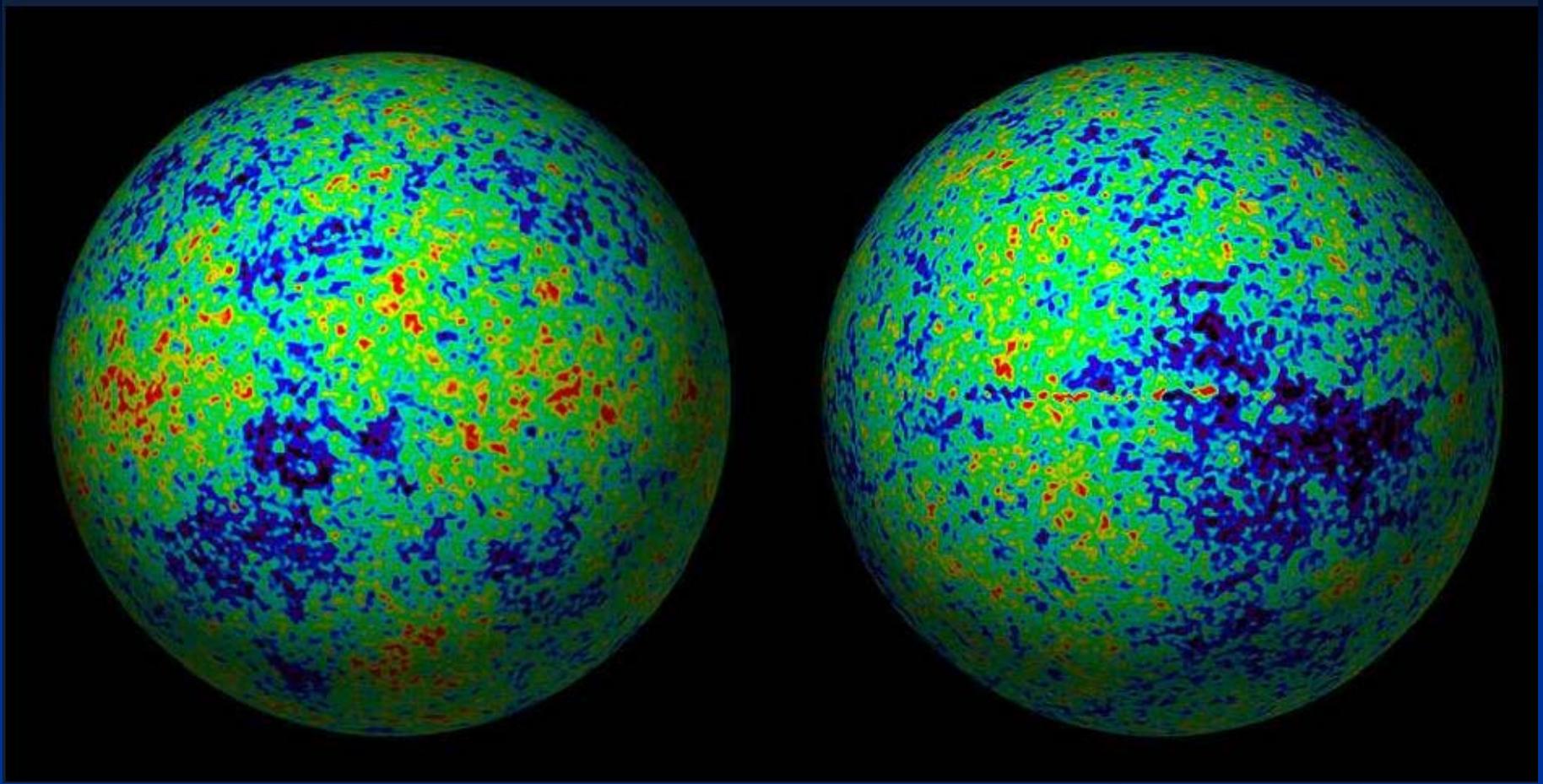
$$\Omega_{\text{tot}} = 1.0000\dots\dots\dots x$$

- 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

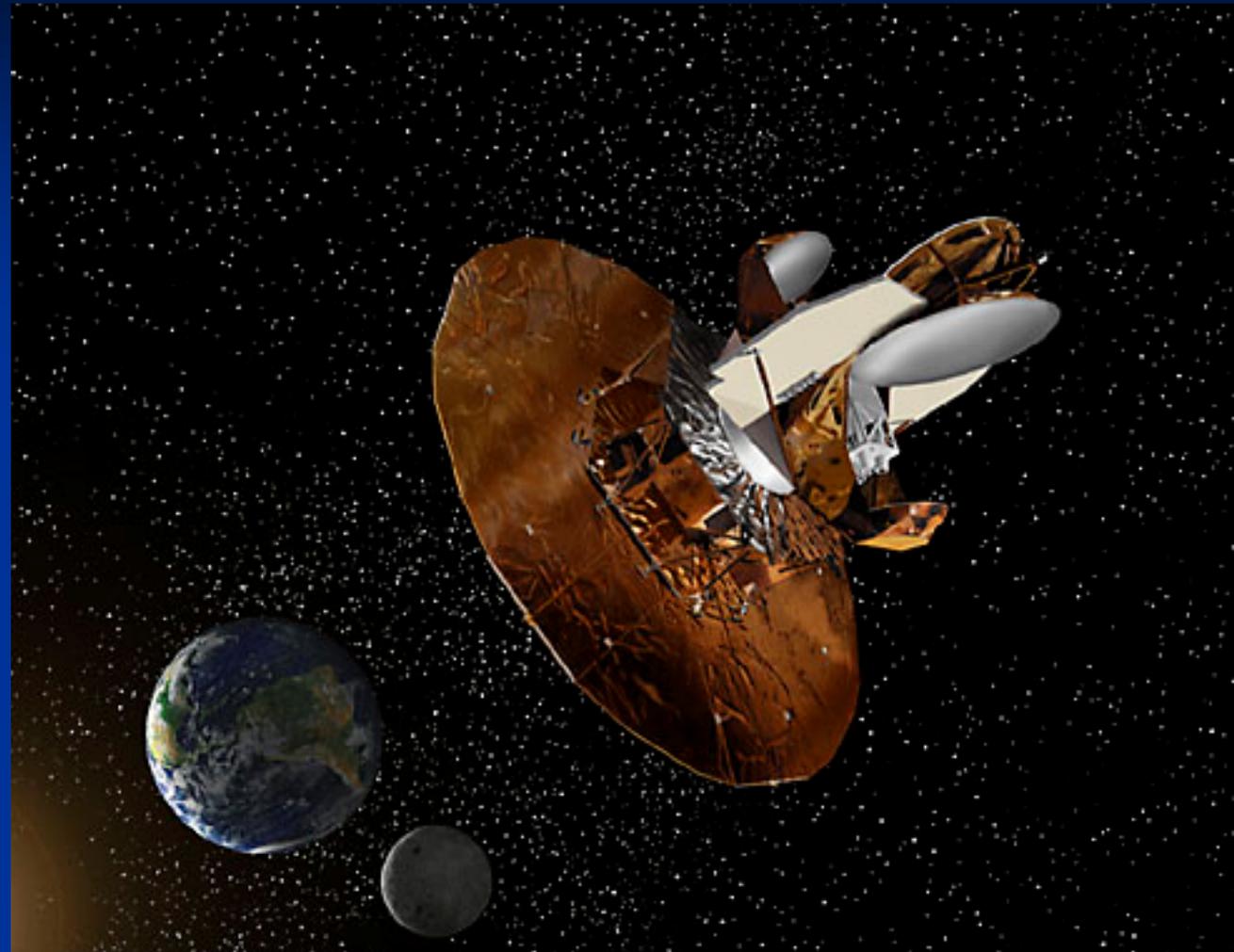
Ed Wollack

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

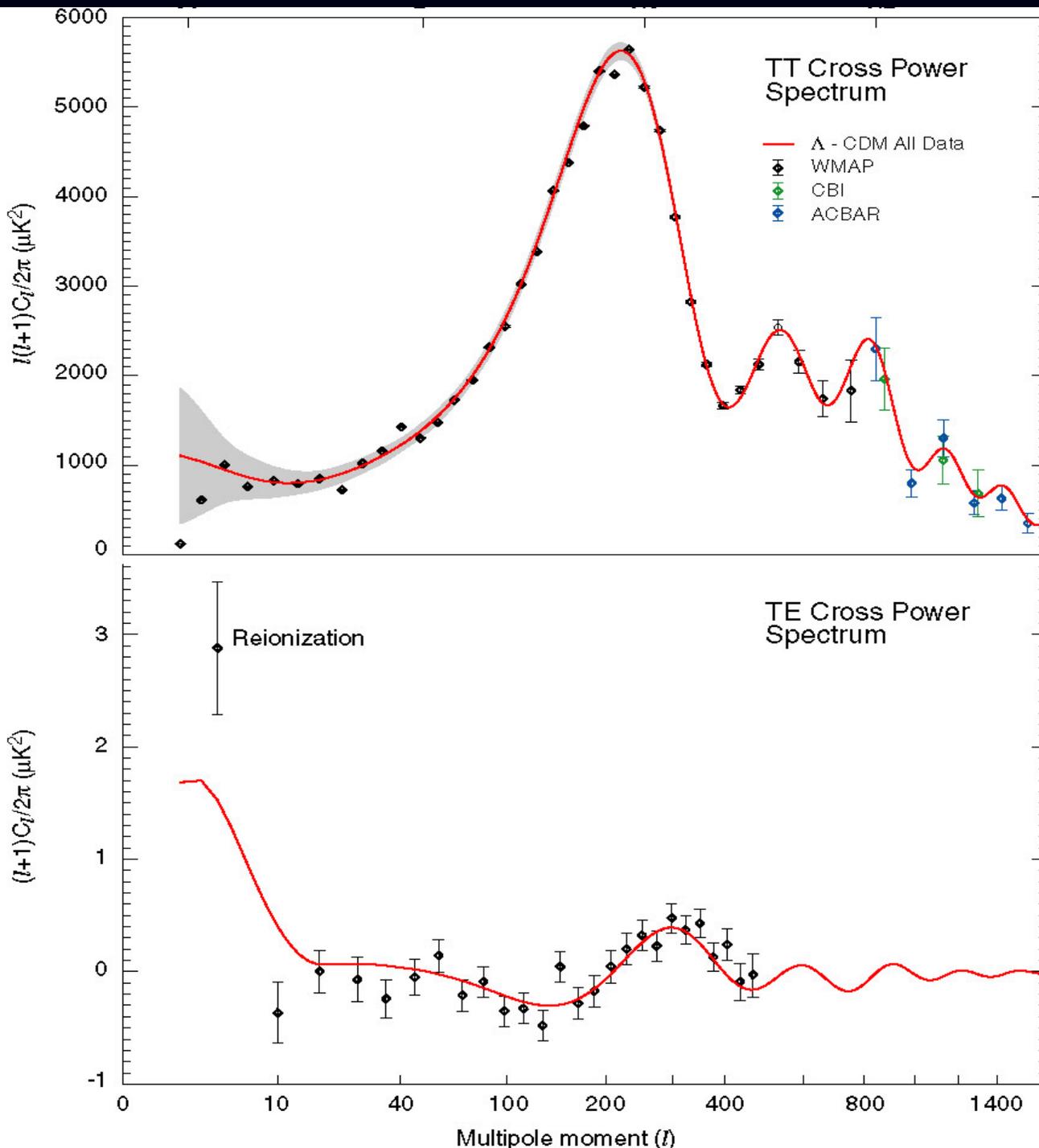
Mittelwerte WMAP 2003

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

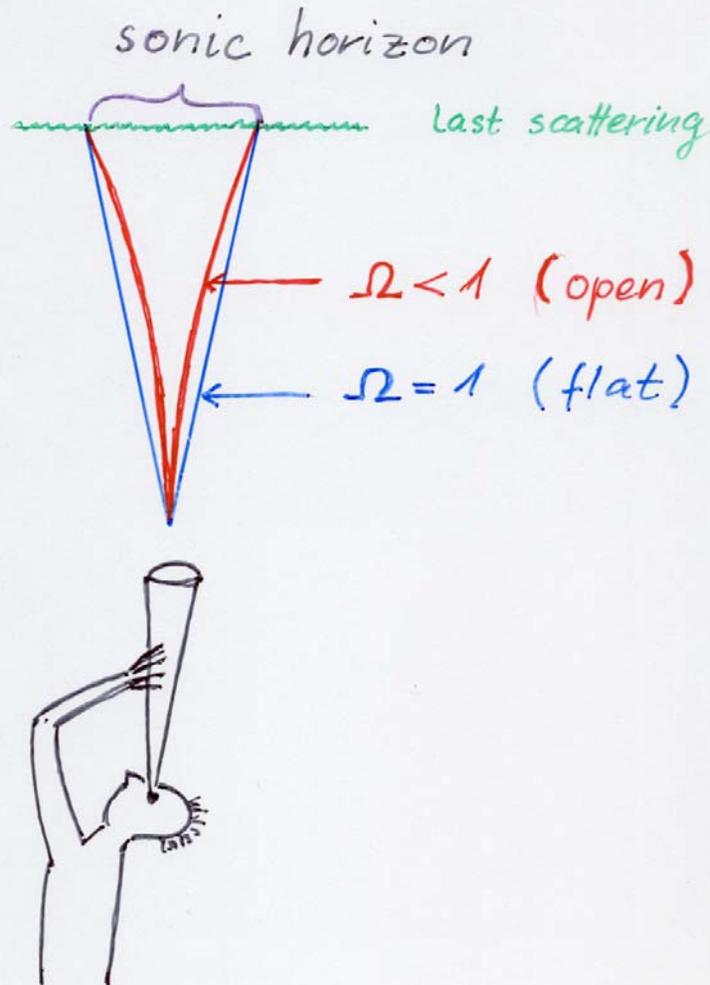
$$\Omega_{\text{m}} = 0.27$$

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

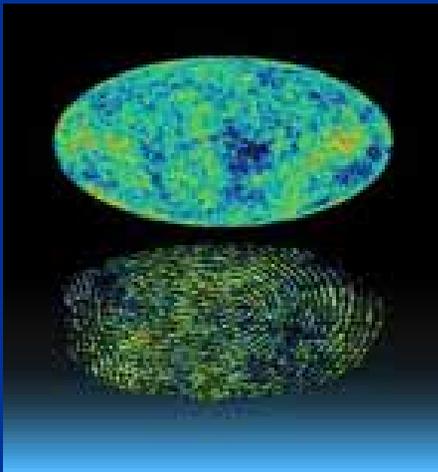
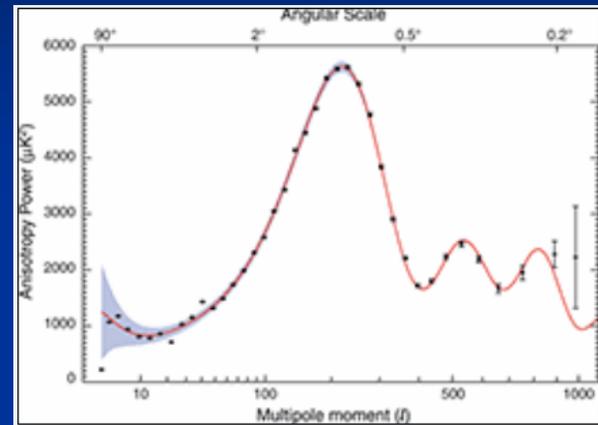
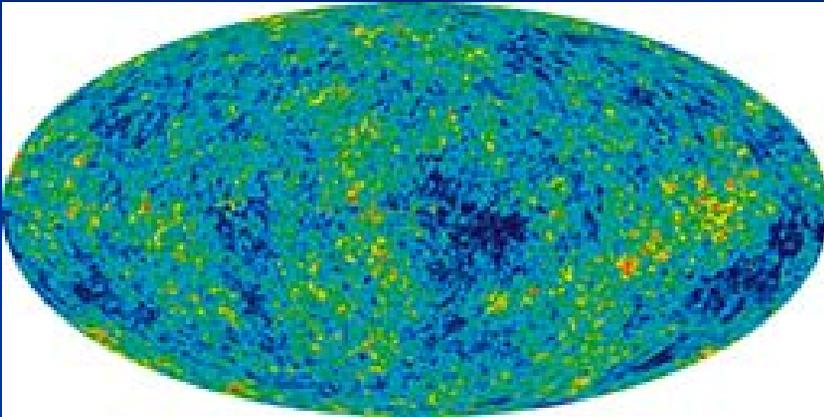
$$\Omega_{\text{dm}} = 0.225$$



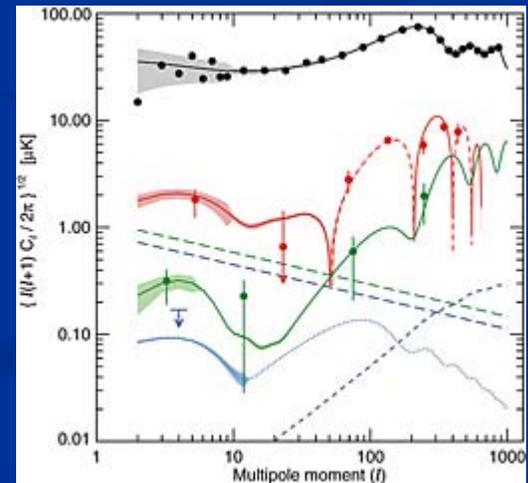
$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$



WMAP 2006



Polarisation



Dunkle Energie

$$\Omega_m + X = 1$$

$$\Omega_m : 25\%$$

$$\Omega_h : 75\%$$

Dunkle Energie

h : homogen , oft auch Ω_Λ statt Ω_h

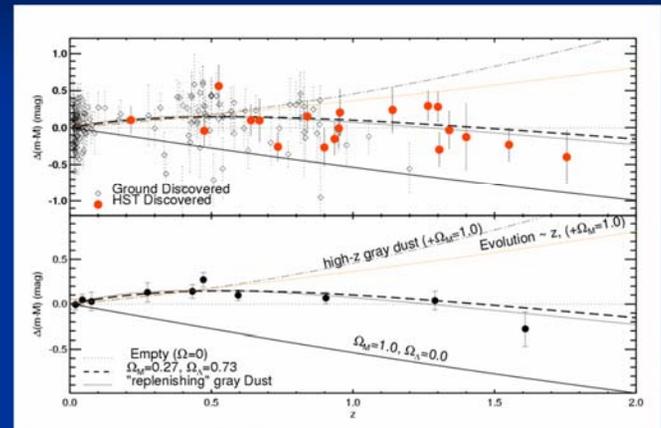
Dunkle Energie :

homogen verteilt

Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

*Die Expansion des Universums
beschleunigt sich heute !*

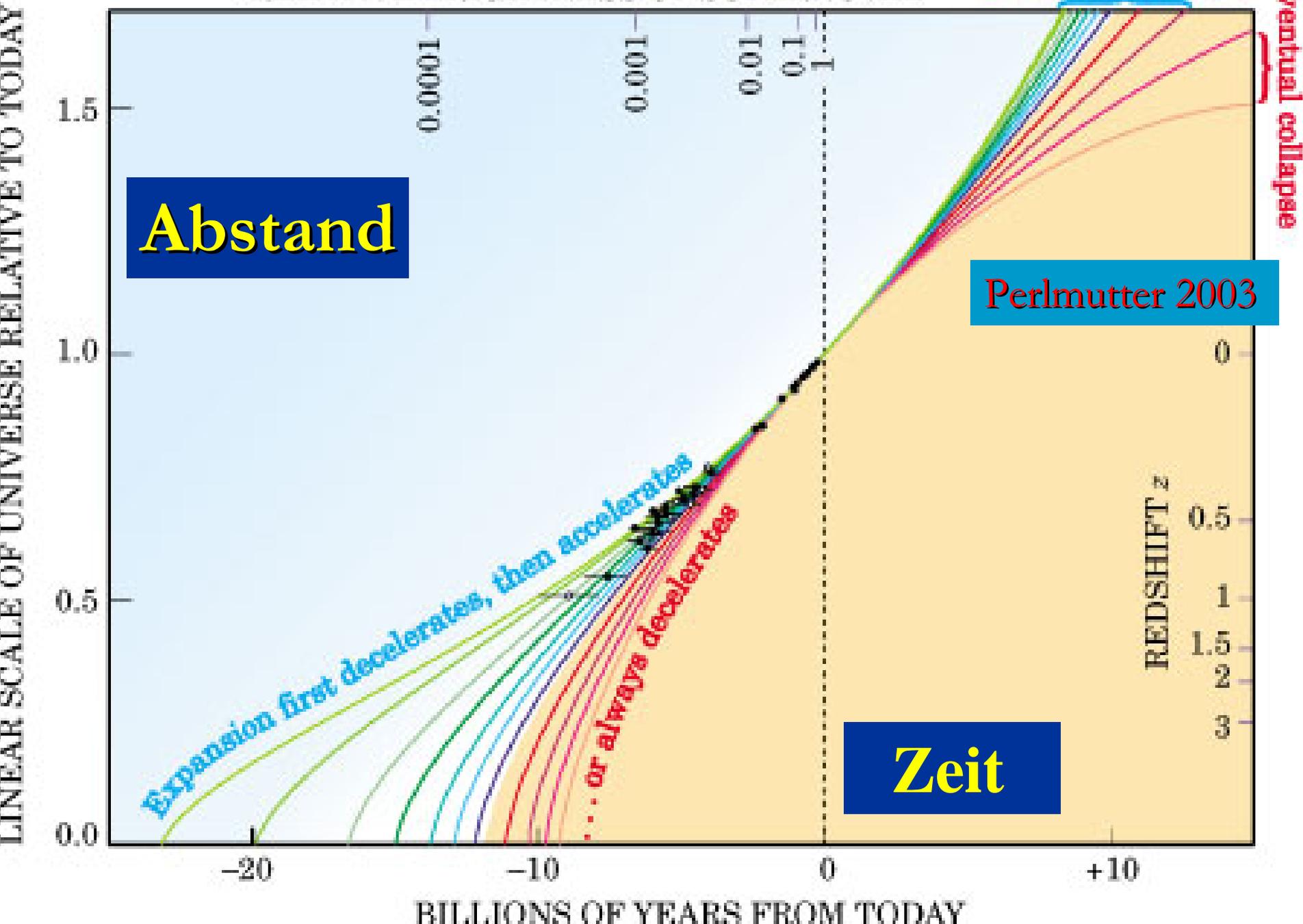
Supernova Ia Hubble-Diagramm



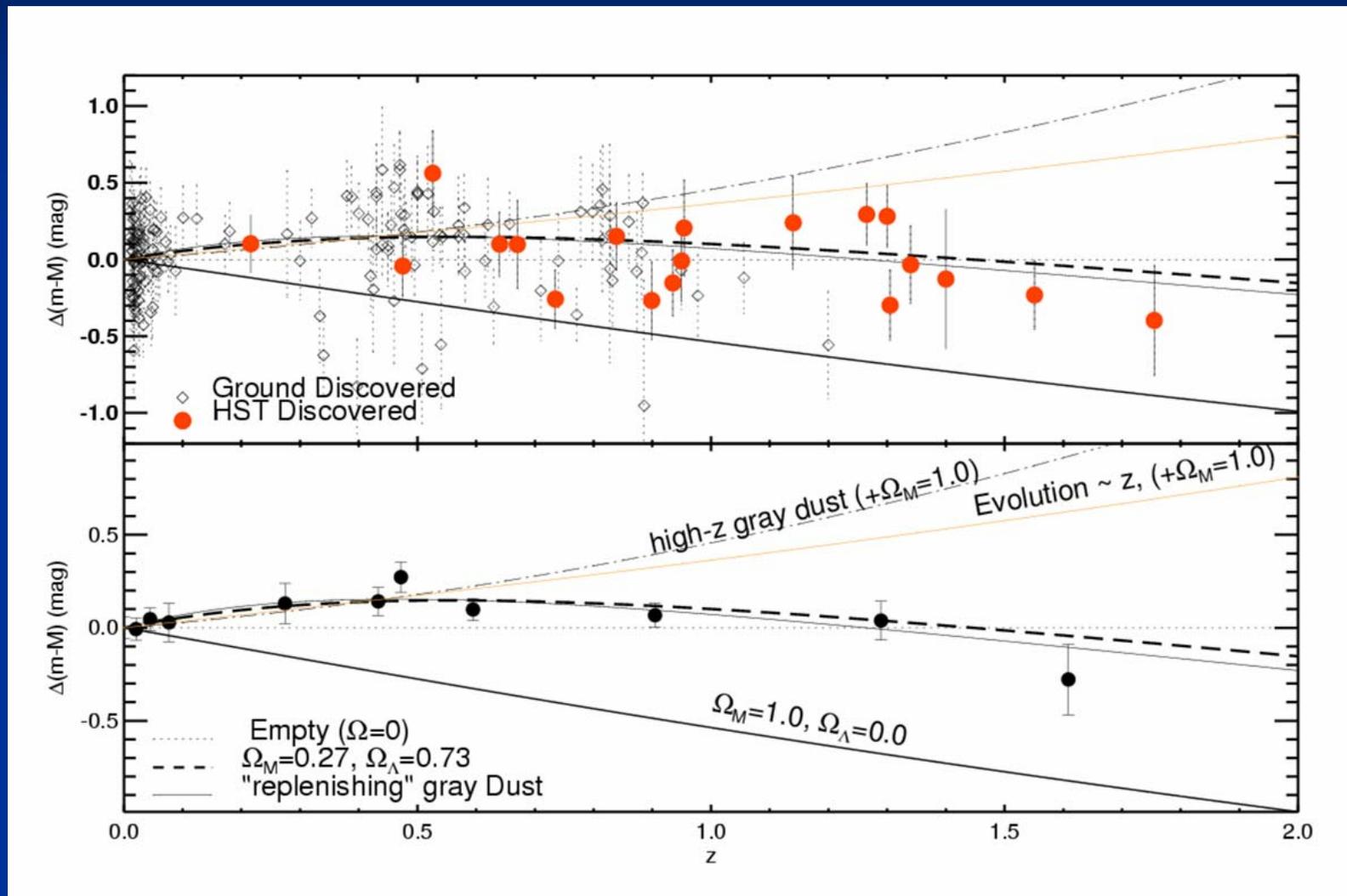
Rotverschiebung z

Riess et al. 2004

RELATIVE BRIGHTNESS OF SUPERNOVAE



Supernova Ia Hubble-Diagramm

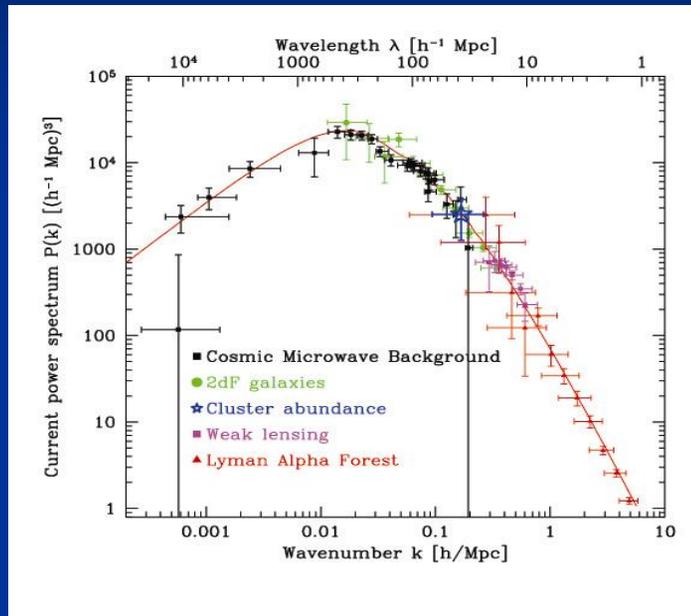


Rotverschiebung z

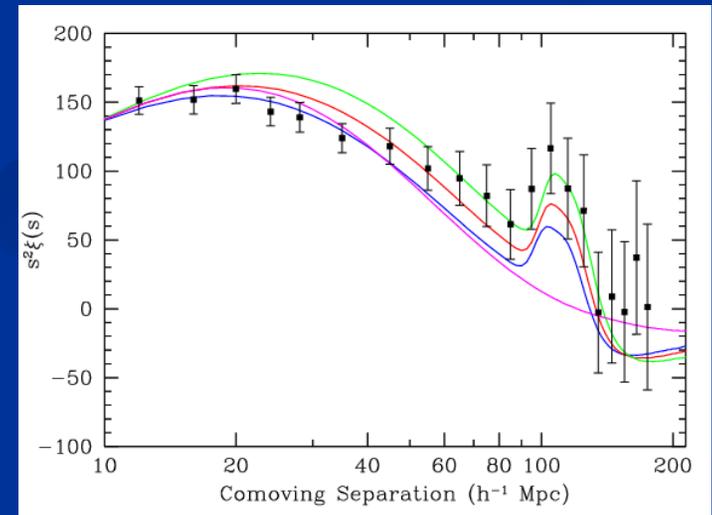
Riess et al. 2004

Fluktuations-Spektrum

Baryon - Peak



Galaxien – Korrelations – Funktion



*Strukturbildung :
Ein primordiales
Fluktuations-Spektrum*

SDSS

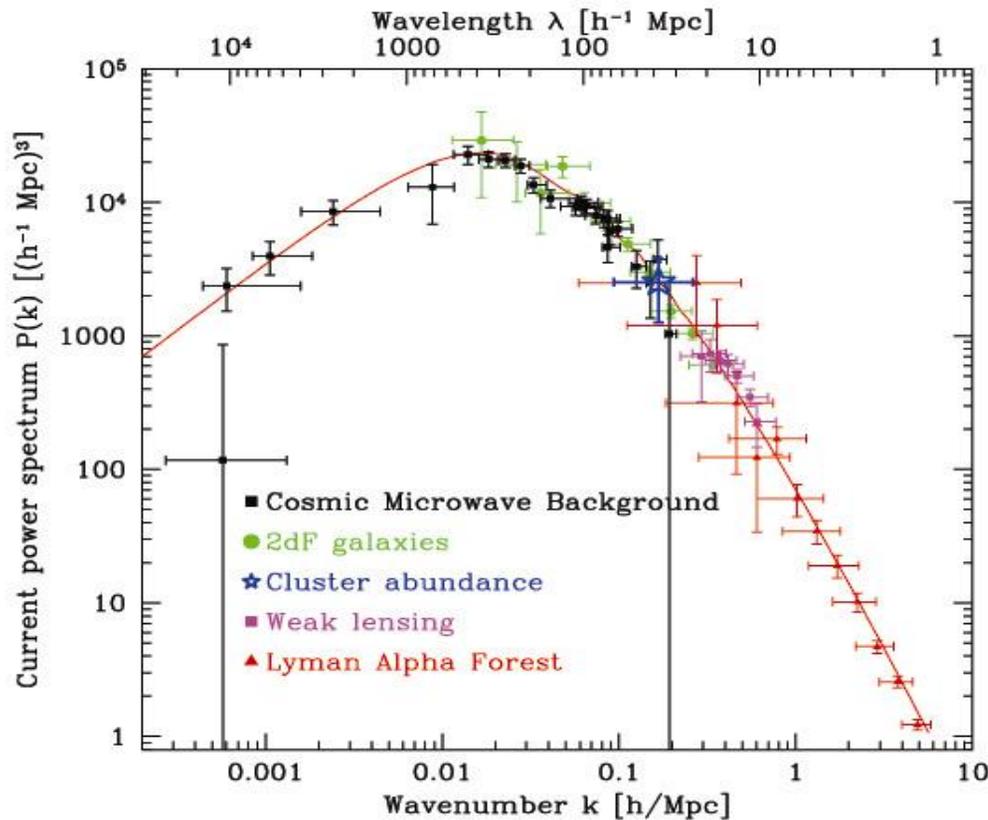
Strukturbildung

Aus winzigen Anisotropien wachsen die
Strukturen des Universums

Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen

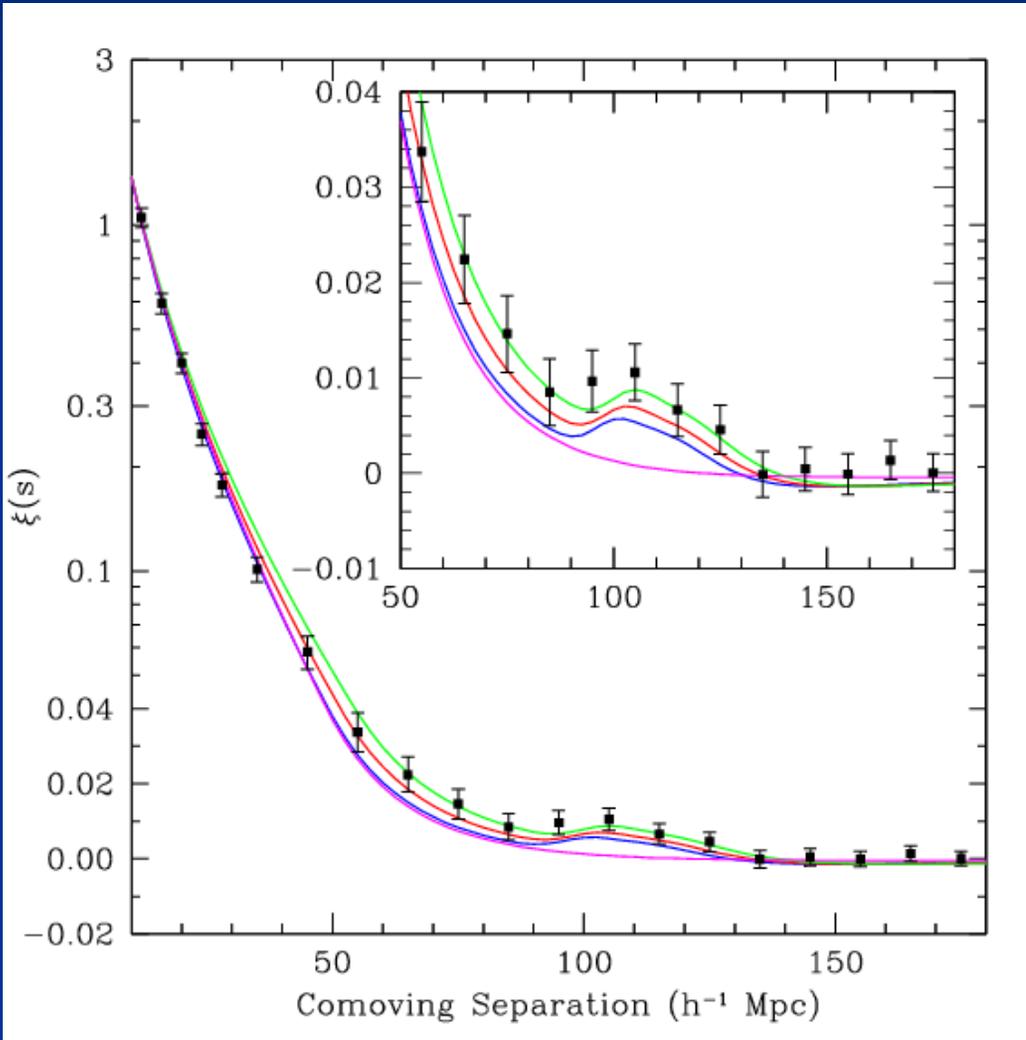
Ein primordiales Fluktuationsspektrum beschreibt
alle Korrelationsfunktionen !

Strukturbildung : Ein primordiales Fluktuationsspektrum

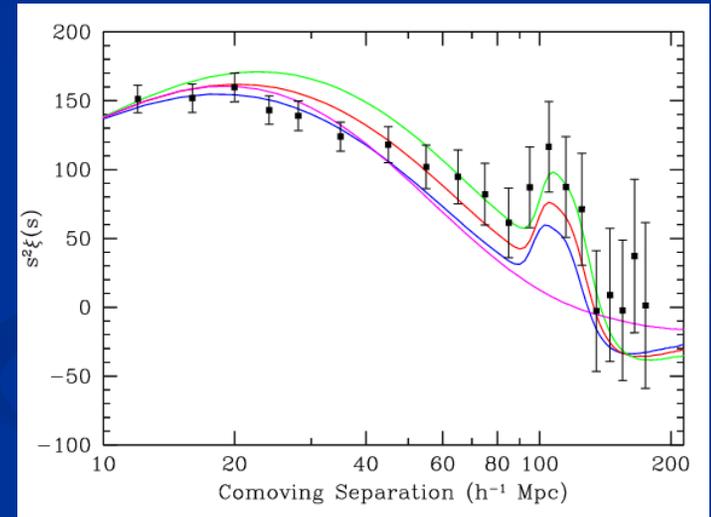


CMB passt mit
Galaxienverteilung
Lyman - α
und
Gravitationslinsen-
Effekt !

Baryon - Peak



SDSS



Galaxien –
Korrelations –
Funktion

Konsistentes kosmologisches Modell !

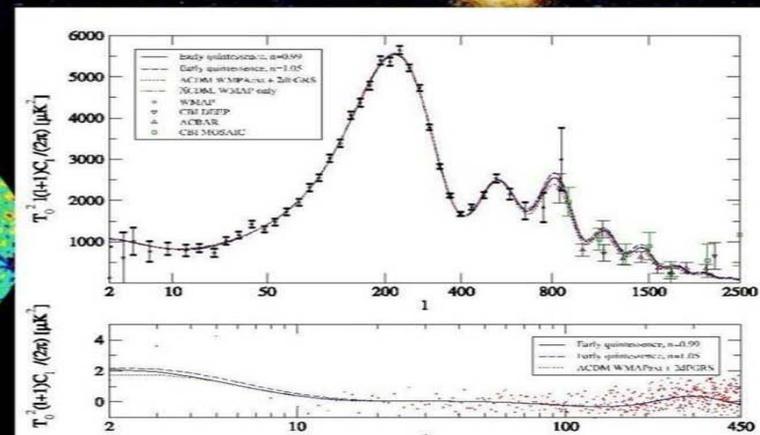
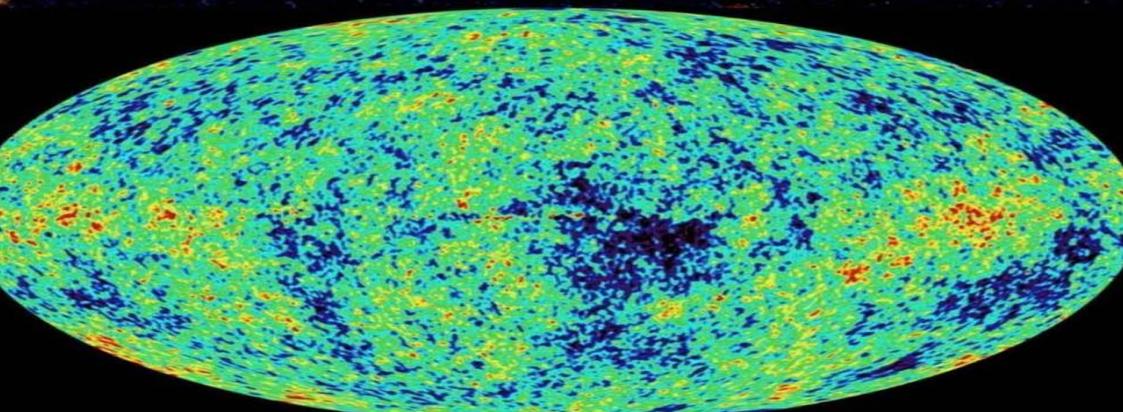
Zusammensetzung des Universums

$\Omega_b = 0.05$ sichtbar klumpt

$\Omega_{dm} = 0.2$ unsichtbar klumpt

$\Omega_h = 0.75$ unsichtbar homogen

Dunkle Energie- ein kosmisches Rätsel



Was ist die dunkle Energie ?

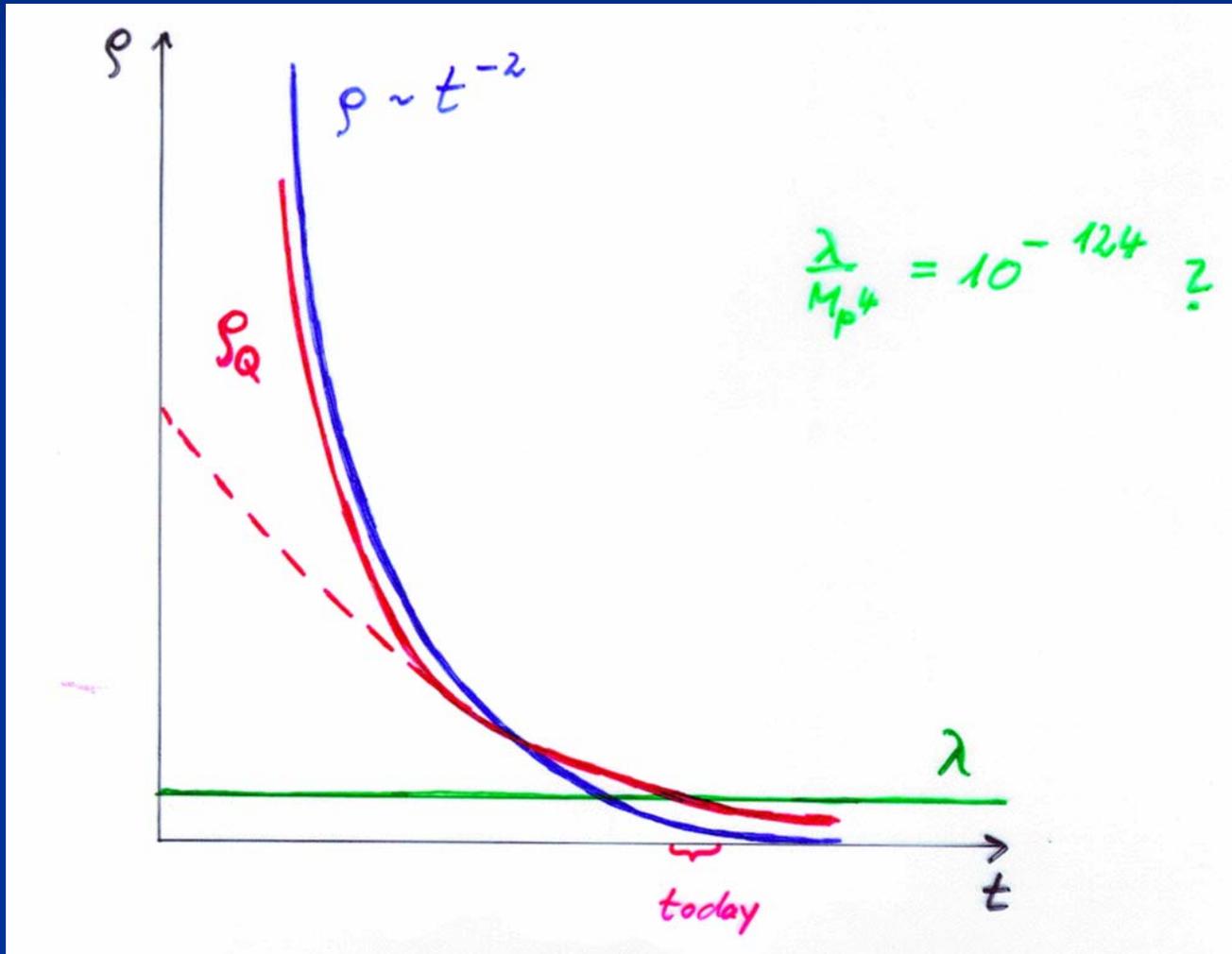
Kosmologische Konstante
oder
Quintessenz ?

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 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

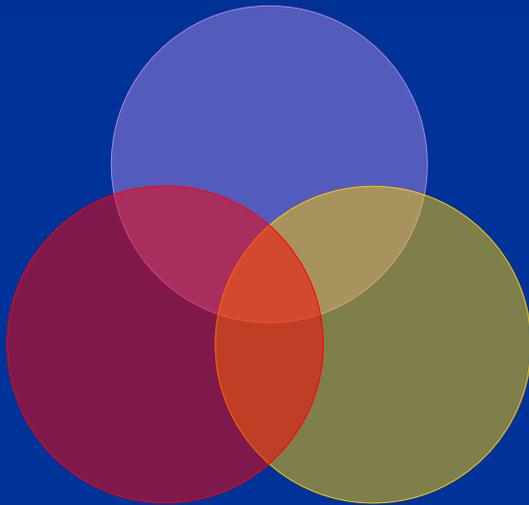
- *Skalarfeld ändert seinen Wert auch in der heutigen kosmologischen Entwicklung*
- *Potenzielle und kinetische Energie des Kosmons tragen zur Energiedichte des Universums bei*
- *Zeitabhängige dunkle Energie :*
 $\rho_b(t)$ fällt mit der Zeit !

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

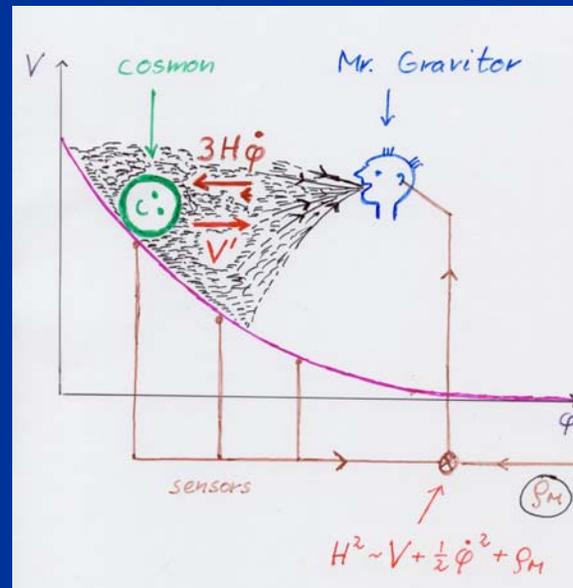
z.B. $V(\varphi) = M^4 \exp(-\alpha\varphi/M)$

Für wachsendes φ fällt Potenzial gegen Null

Kosmologische Gleichungen

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

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



Kosmische Attraktoren

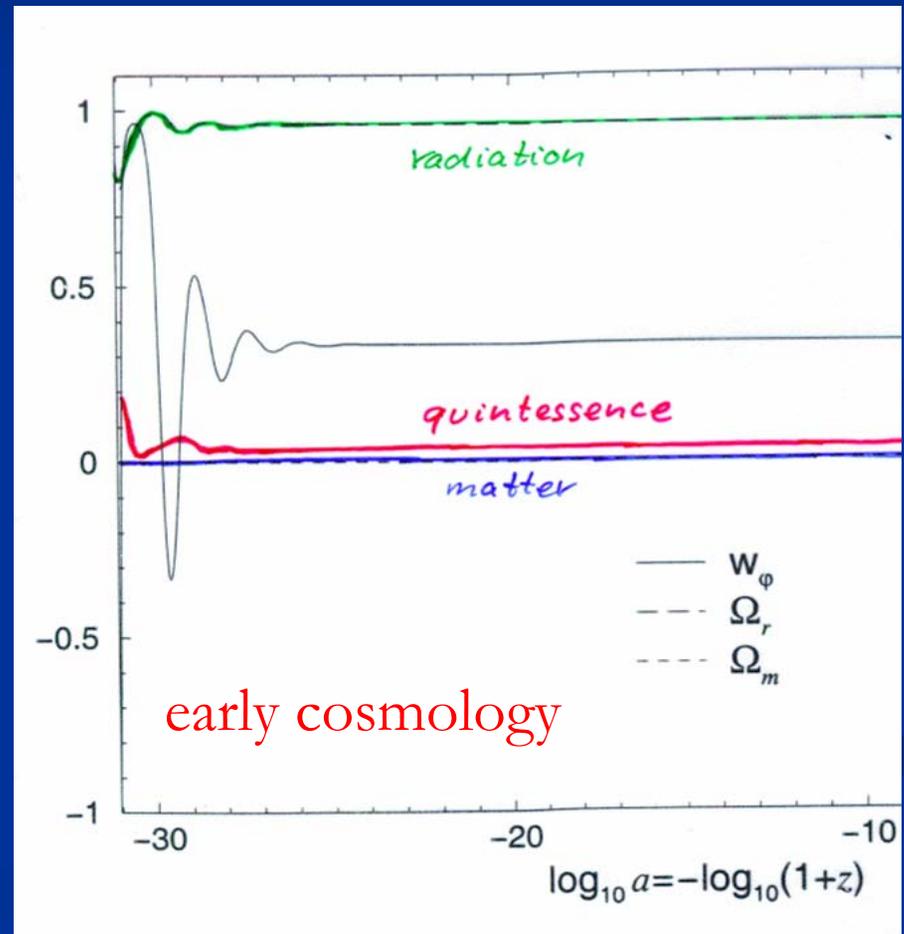
Loesungen werden
unabhaengig von
Anfangsbedingungen

$$V \sim t^{-2}$$

$$\varphi \sim \ln(t)$$

$$\Omega_h \sim \text{const.}$$

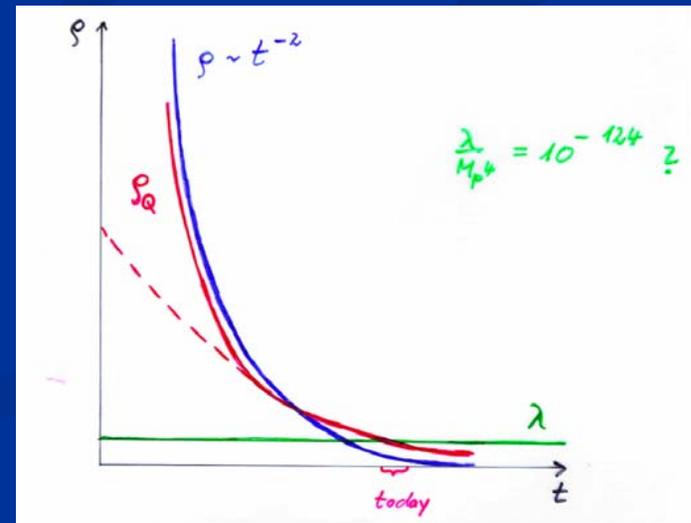
Details haengen von $V(\varphi)$
oder kinetischem Term ab



exponentielles Potential \longrightarrow konstanter Anteil an dunkler Energie

$$\Omega_h = 3/\alpha^2$$

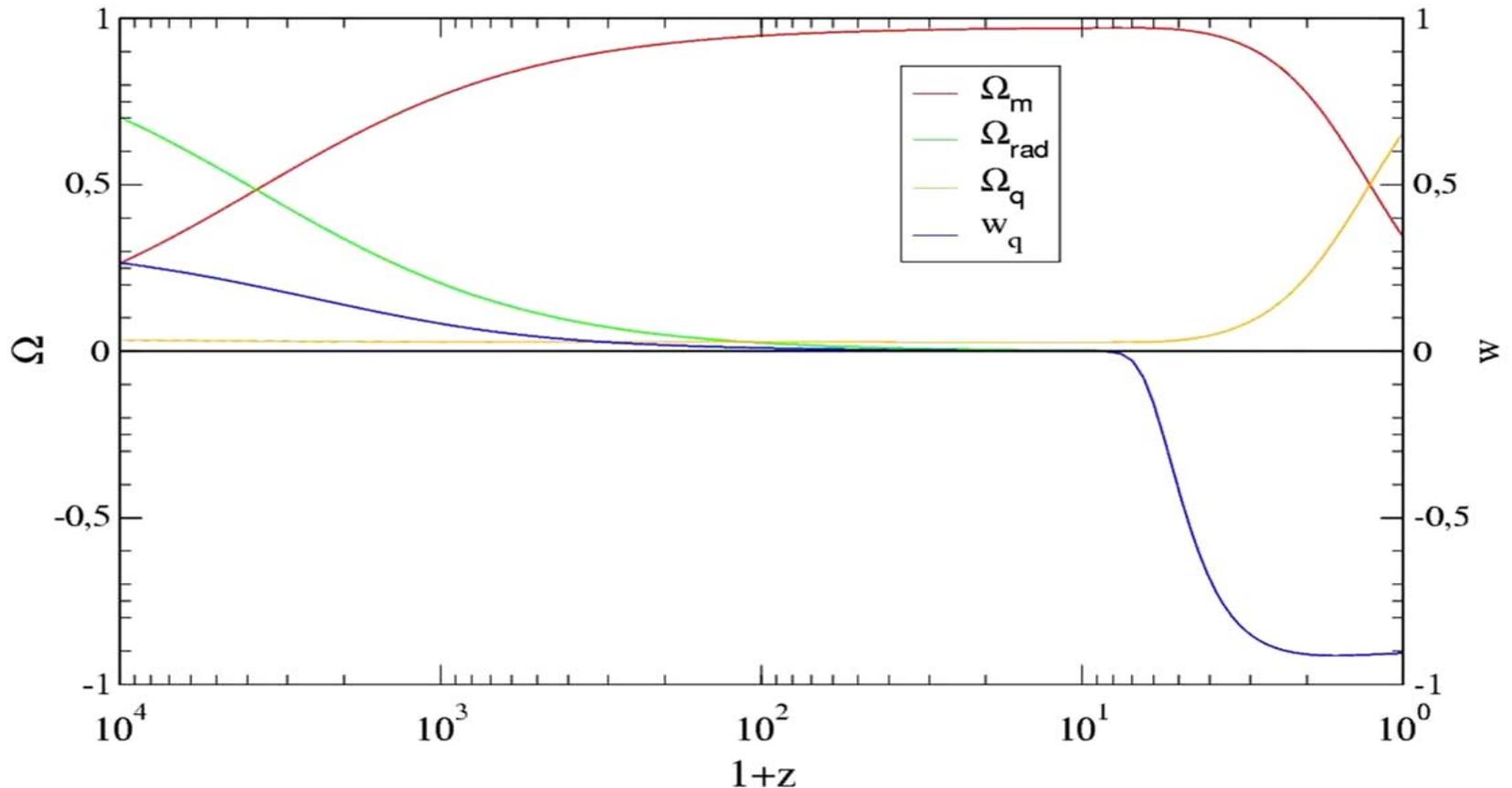
kann die
Groessenordnung
der dunklen Energie
erklaren !



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

Quintessenz wird heute wichtig

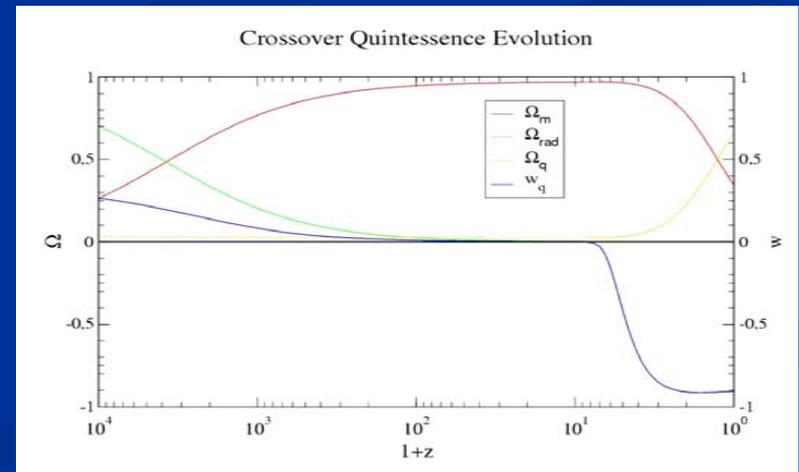
Crossover Quintessence Evolution



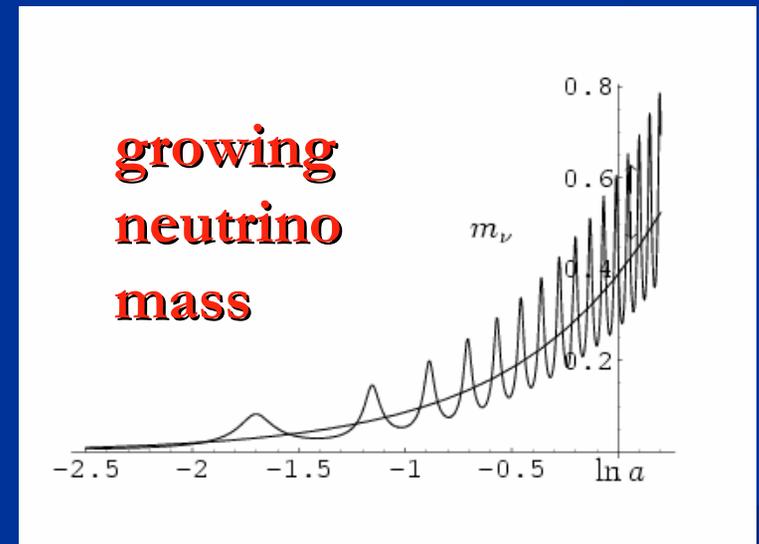
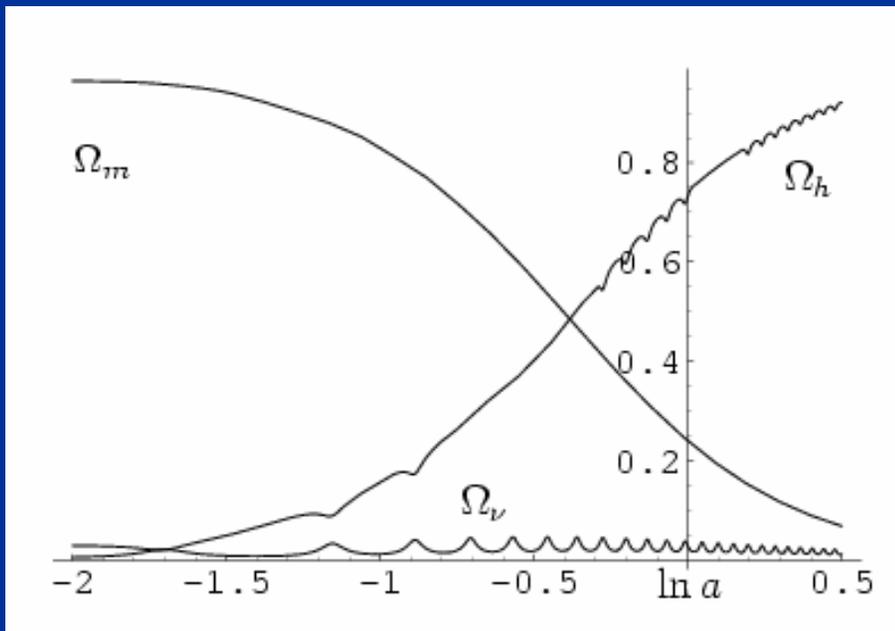
Koinzidenz - Problem

Was ist verantwortlich fuer Wachsen von Ω_h fuer $z < 6$?

Warum jetzt ?



Neutrinos mit wachsender Masse als Trigger fuer Uebergang zu fast statischer dunkler Energie



L.Amendola, M.Baldi,...

Effektiver kosmologischer Trigger für Stop der Cosmon -Evolution : Neutrinos werden nicht-relativistisch

- Dies passierte in jüngster Zeit ! ($z=5$)
- Bestimmt die Größenordnung der dunklen Energie !

kosmologische Selektion

- jetziger Wert der dunklen Energie wird bestimmt durch kosmologisches Ereignis :
Neutrinos werden nicht – relativistisch
- nicht durch Eigenschaften des Grundzustands gegeben !

Zusammenhang zwischen jetziger Dunkler Energie - Dichte und Neutrino - Masse

$$[\rho_h(t_0)]^{\frac{1}{4}} = 1.27$$

$$\left(\frac{\gamma m_\nu(t_0)}{eV} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$10^{-3} eV$$

Dunkle Energiedichte : $\rho^{1/4} \sim 2.4 \times 10^{-3} eV$

jetzige Zustandsgleichung ist
gegeben durch Neutrino - Masse !

$$w_0 \approx -1 + \frac{m_\nu(t_0)}{12eV}$$

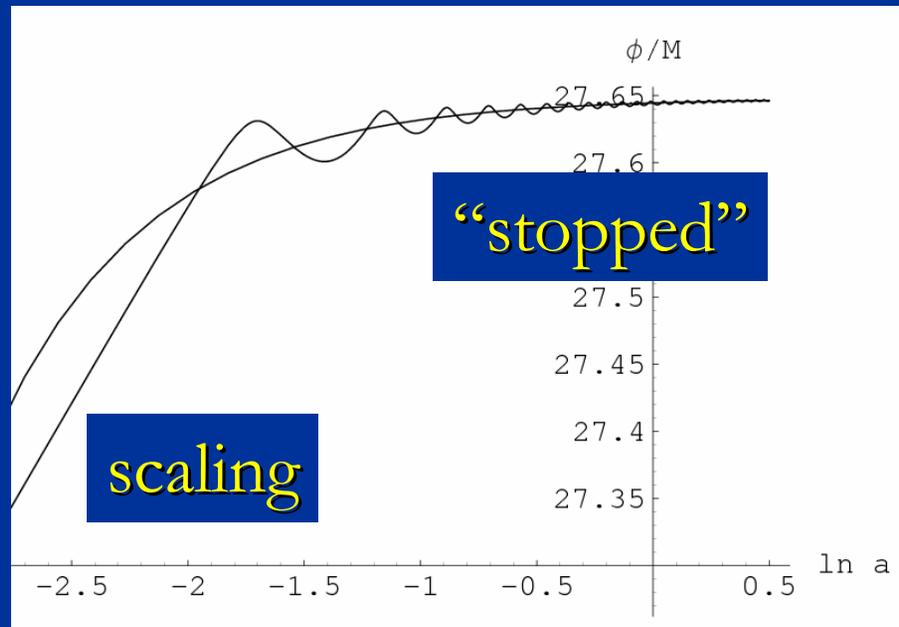
Cosmon - Neutrino Kopplung β

$$\Omega_h(t_0) \approx \frac{\gamma m_\nu(t_0)}{16eV}$$

$$\gamma = -\frac{\beta}{\alpha}$$

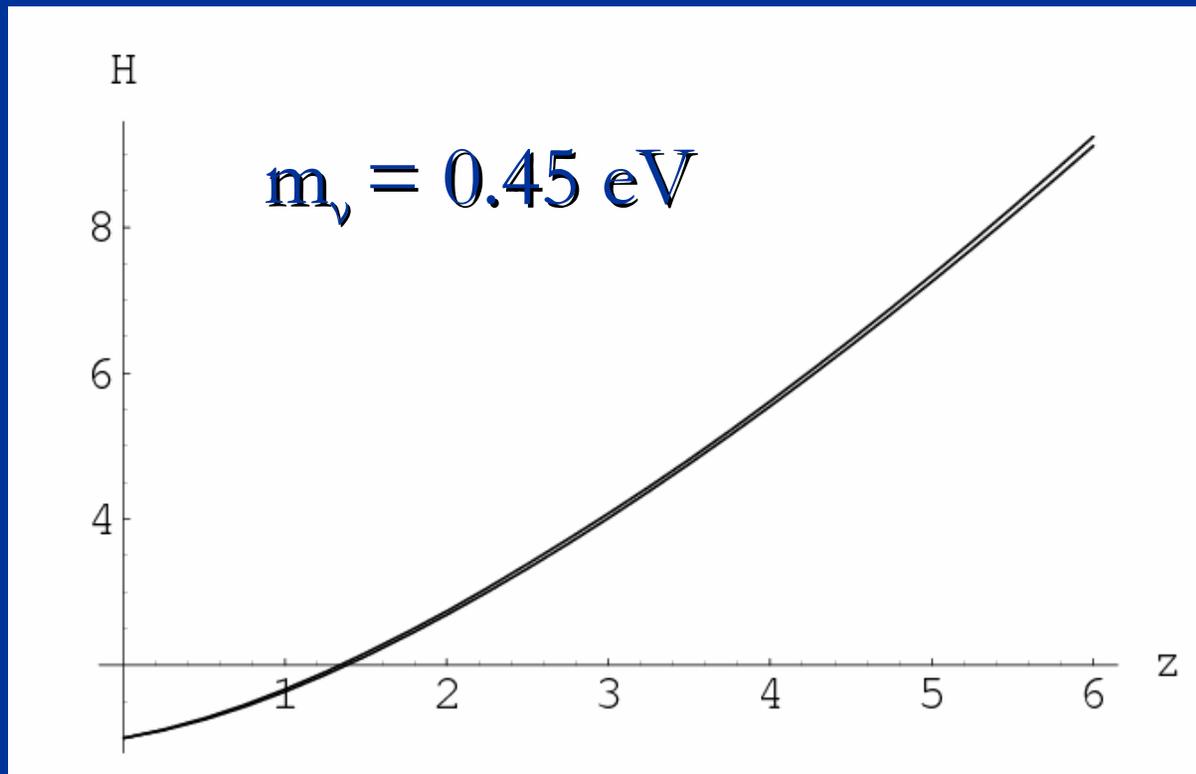
Wachsende Neutrino - Masse stoppt Kosmon - Evolution

$$\ddot{\varphi} + 3H\dot{\varphi} = -\frac{\partial V}{\partial \varphi} + \frac{\beta(\varphi)}{M}(\rho_\nu - 3p_\nu),$$
$$\beta(\varphi) = -M \frac{\partial}{\partial \varphi} \ln m_\nu(\varphi) = \frac{M}{\varphi - \varphi_t}$$



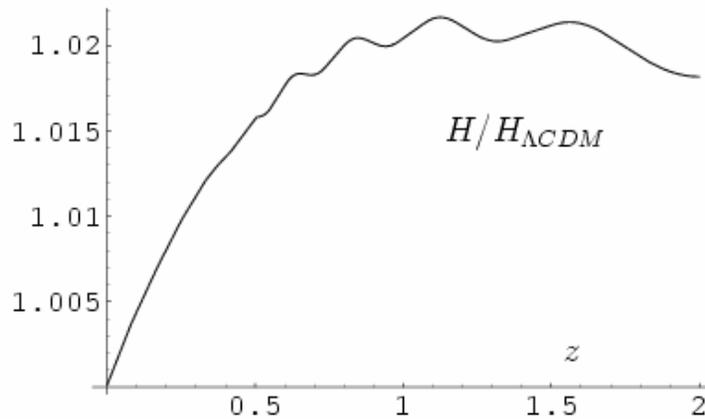
Hubble Parameter

im Vergleich zu Λ CDM



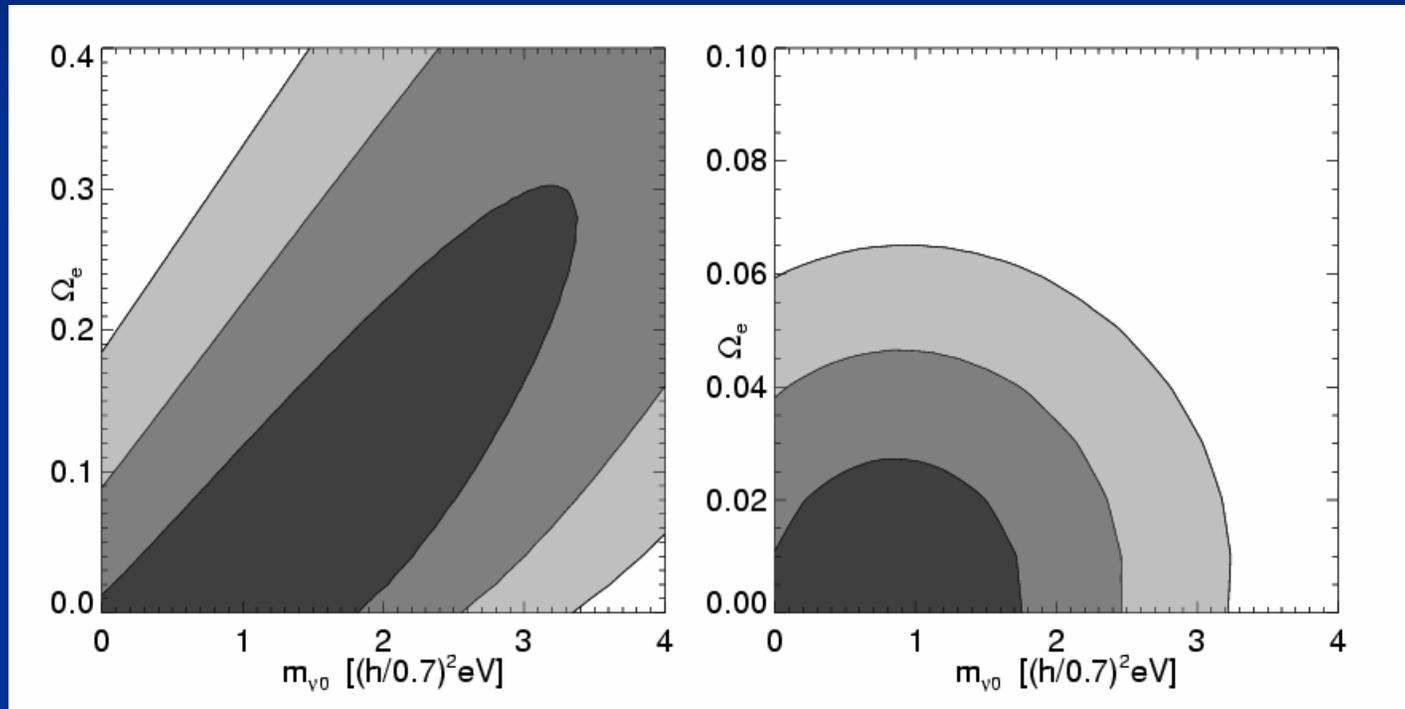
Hubble Parameter ($z < z_c$)

$$H^2 = \frac{1}{3M^2} \left\{ V_t + \rho_{m,0} a^{-3} + 2\tilde{\rho}_\nu,0 a^{-\frac{3}{2}} \right\}$$



nur kleiner
Unterschied
zu
 Λ CDM!

Grenzen für mittlere Neutrino-Masse

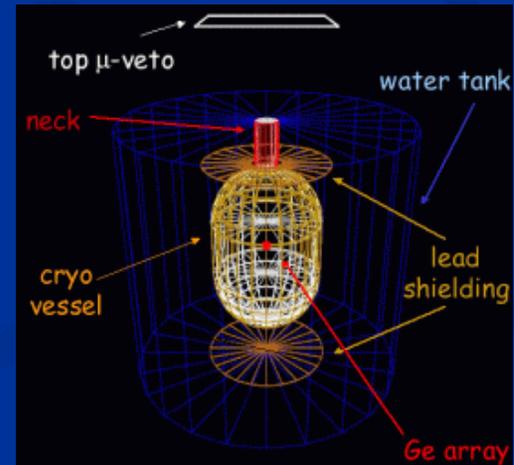


Looking Beyond Lambda with the Union Supernova Compilation

D. Rubin^{1,2}, E. V. Linder^{1,3}, M. Kowalski⁴, G. Aldering¹, R. Amanullah^{1,3}, K. Barbary^{1,2},
N. V. Connolly⁵, K. S. Dawson¹, L. Faccioli^{1,3}, V. Fadeyev⁶, G. Goldhaber^{1,2}, A. Goobar⁷,
I. Hook⁸, C. Lidman⁹, J. Meyers^{1,2}, S. Nobili⁷, P. E. Nugent¹, R. Pain¹⁰, S. Perlmutter^{1,2},
P. Ruiz-Lapuente¹¹, A. L. Spadafora¹, M. Strovink^{1,2}, N. Suzuki¹, and H. Swift^{1,2}
(Supernova Cosmology Project)

Ist Zeitentwicklung der Neutrino - Masse beobachtbar ?

- Obere Grenze aus Kosmologie für frühe Zeit
- Heutiger Beobachtungswert kann darüber liegen
(KATRIN, neutrino-loser doppelter Betazerfall)

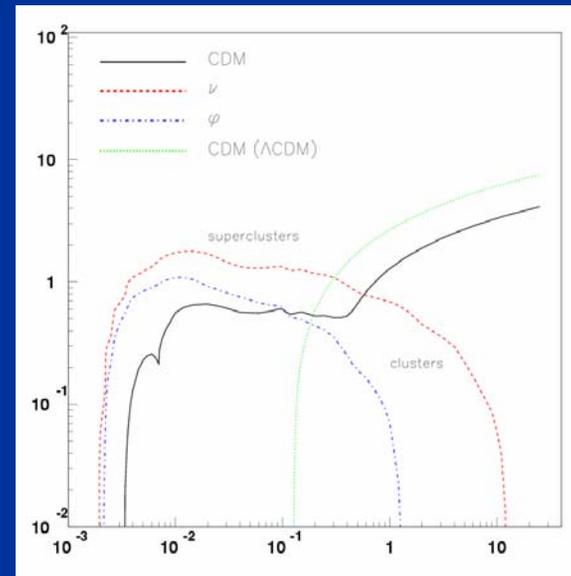
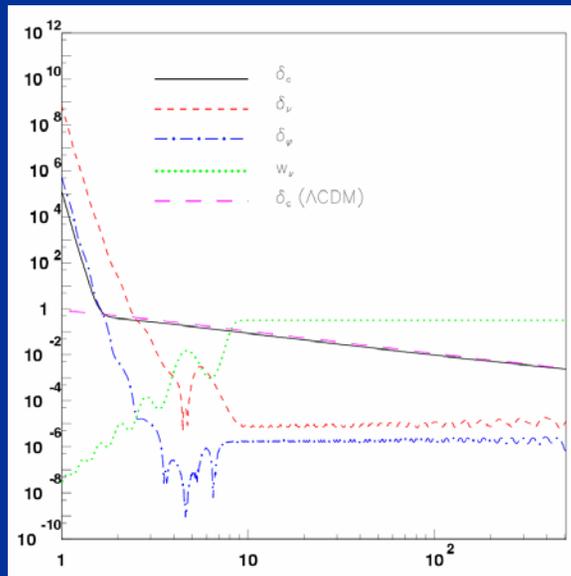


GERDA

Neutrino Fluktuationen

Neutrino-Strukturen werden nichtlinear bei $z \sim 1$
für Supercluster-Scalen

D.Mota , G.Robbers , V.Pettorino , ...



stabile Neutrino-Cosmon Klumpen existieren

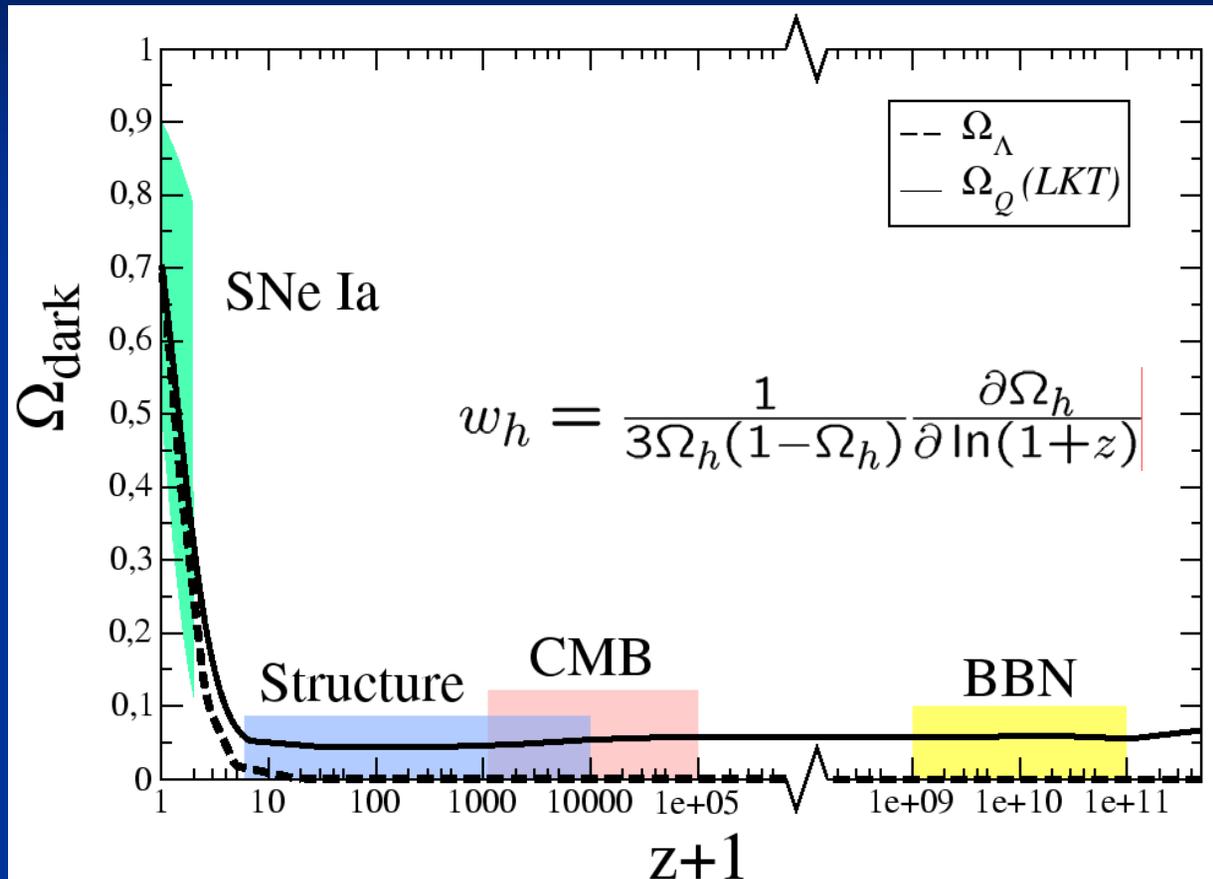
N.Brouzakis , N.Tetradis , ...

Zusammenfassung

Wachsende Masse der Neutrinos kann “Stop” der
Änderung des Cosmon – Felds bewirken !

Wie kann man Quintessenz von
kosmologischer Konstanten
unterscheiden ?

Zeitabhängigkeit der dunklen Energie



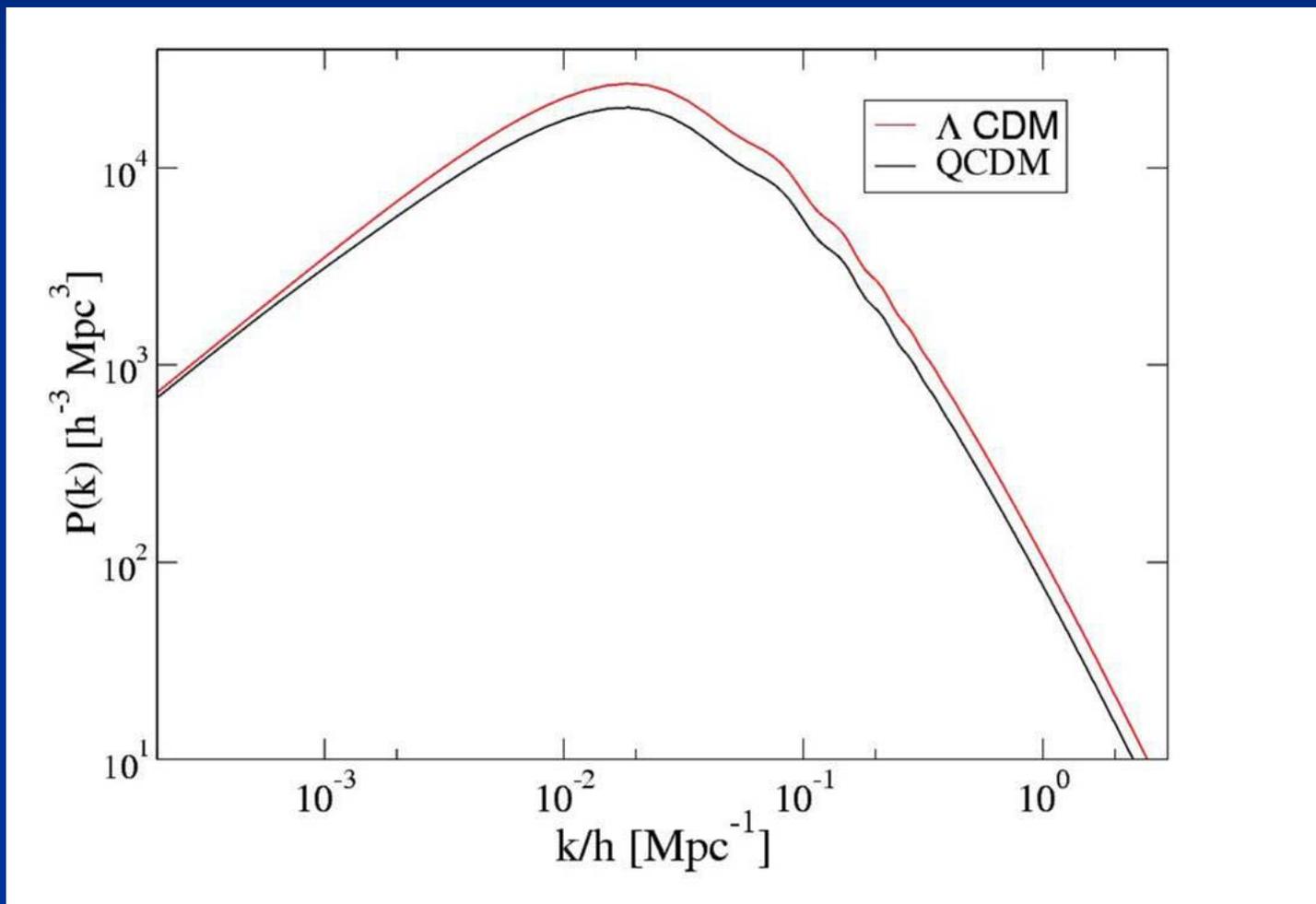
$w=p/q$

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

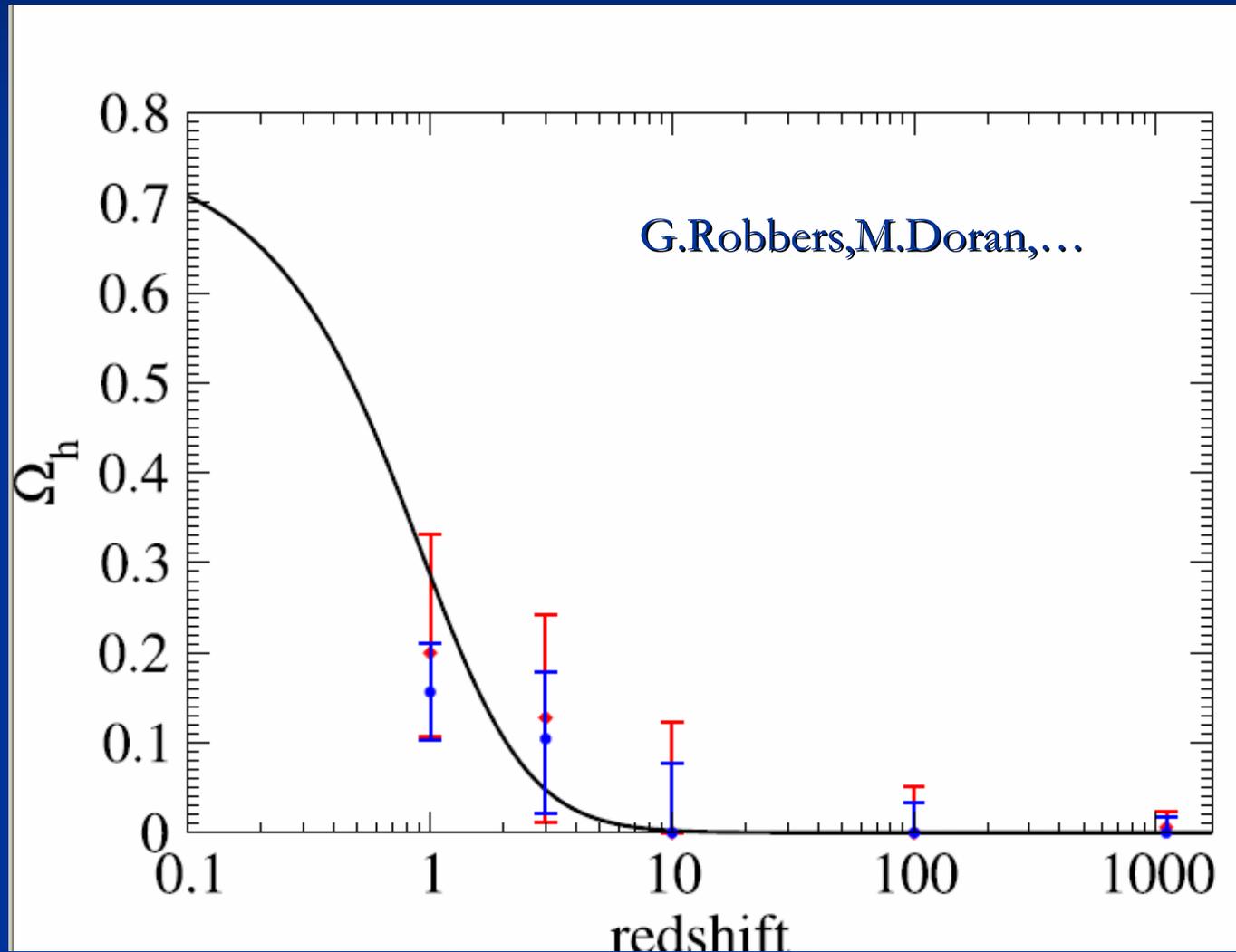
M.Doran,...

Effekte früher dunkler Energie

Strukturwachstum wird verlangsamt



Interpolation von Ω_h



Dunkle Energie
im frühen Universum :

unter 10 %

Zusammenfassung

$$\Omega_h = 0.75$$

Q/ Λ : dynamische und statische
dunkle Energie unterscheidbar

Q : zeitlich veränderliche “fundamentale
Kopplungen”, Verletzung des Äquivalenzprinzips

Q : Neutrinos mit zeitlicher veränderlicher Masse könnten
erklären, warum Dunkle Energie “heute” wichtig ist

Wie unterscheidet man Q von Λ ?

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 α (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 φ \rightarrow
Zeitentwicklung von α

Jordan

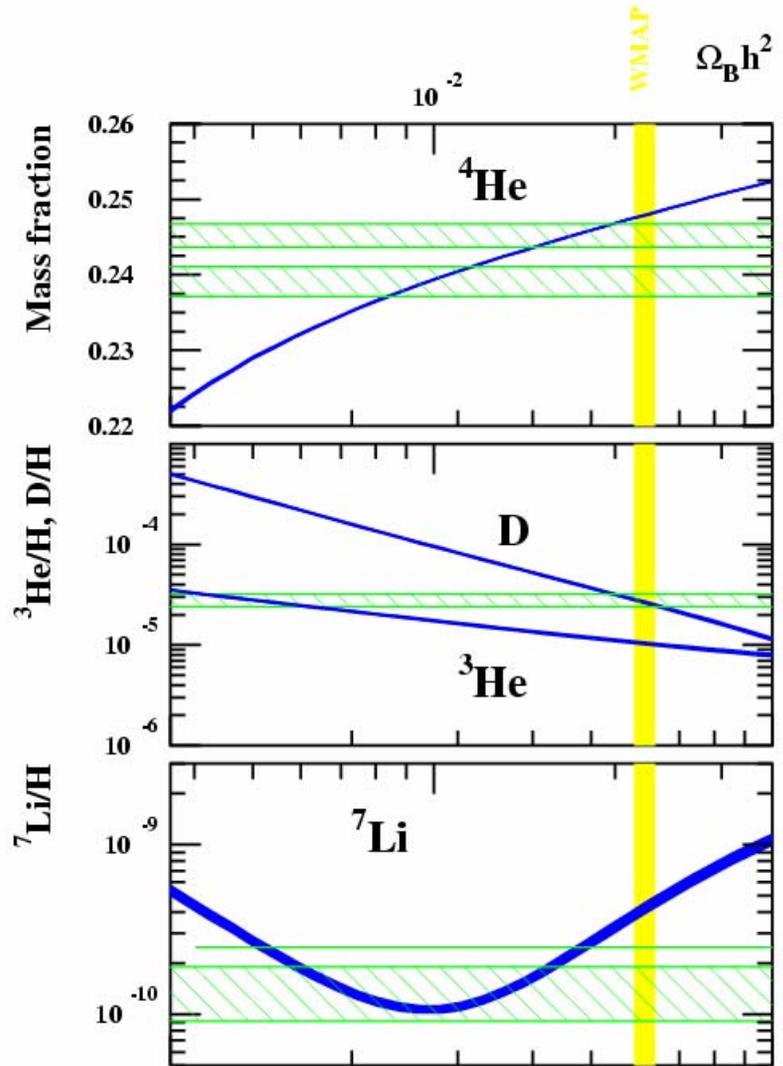


baryons :

the matter of stars and humans

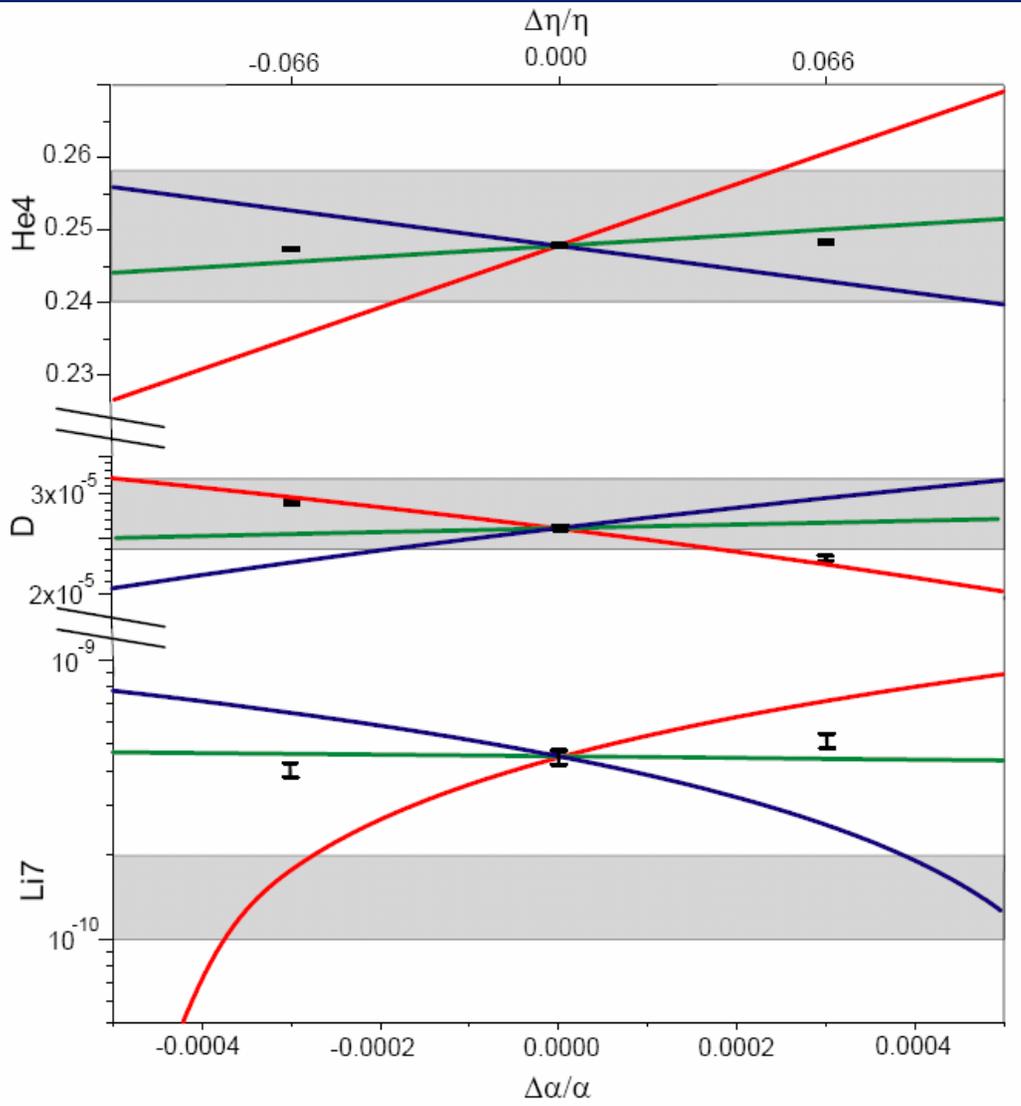
$$\Omega_b = 0.045$$

Primordiale
Häufigkeiten der
leichten Elemente
aus der
Nukleosynthese



Variation der Li- Häufigkeit

He



D

Li

gegenwärtige
Beobachtungen:
 1σ

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 Λ_{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/ Λ : dynamische und statische
dunkle Energie unterscheidbar

Q : zeitlich veränderliche “fundamentale
Kopplungen”, Verletzung des Äquivalenzprinzips

Q : Neutrinos mit zeitlicher veränderlicher Masse könnten
erklären, warum Dunkle Energie “heute” wichtig ist

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

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 ?

**Quintessenz sollte mit
Lösung des Problems der
kosmologischen Konstante
verknüpft sein !**

Zustandsgleichung

$$p = T - V$$

Druck

kinetische Energie

$$\rho = T + V$$

Energiedichte

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

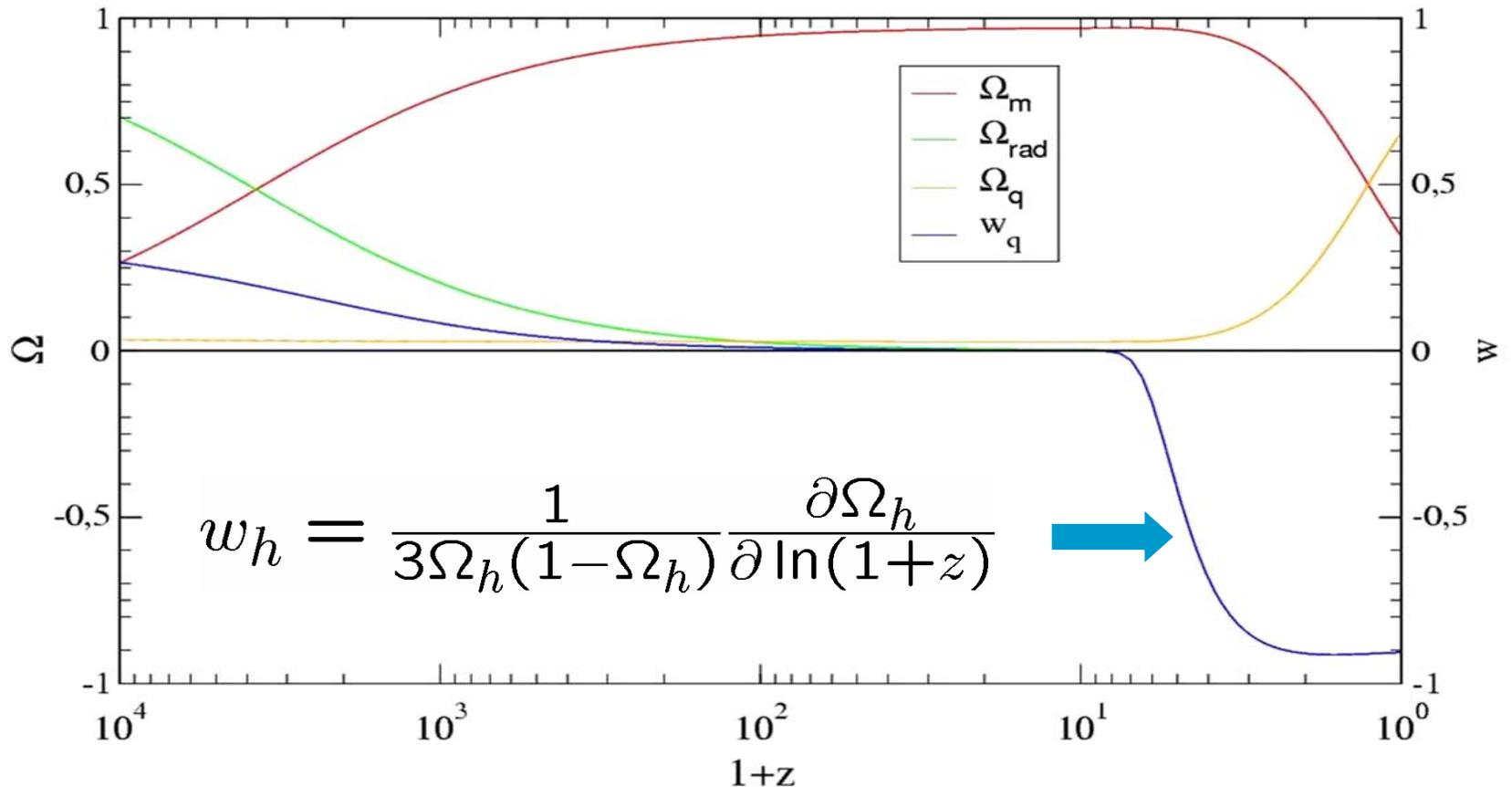
Zustandsgleichung

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

hängt von spezifischer Evolution des Skalarfelds ab

Negativer Druck

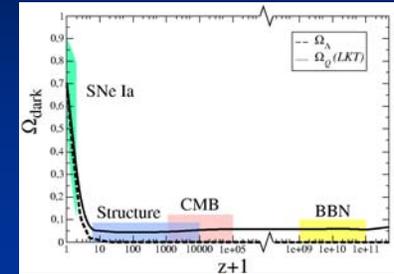
Crossover Quintessence Evolution



Negativer Druck

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

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 !

$$w_h < -1/3$$

Kosmon und Fundamentale Massen - Skalen

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

$$M_p \sim \chi, \quad m_{\text{proton}} \sim \chi, \quad \Lambda_{\text{QCD}} \sim \chi, \quad M_W \sim \chi$$

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

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 Anomalie

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

■ $V \sim \chi^{4-A}$, $M_p(\chi) \sim \chi$

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

■ $V/M_p^4 \sim \chi^{-A}$:

fällt für wachsendes χ !!

Kosmologie

Kosmologie : χ **wächst** mit der Zeit !

(Grund: Kopplung von χ zum gravitationellen Krümmungs - Skalar)

Für wachsendes χ : 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 !

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

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

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

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

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 η

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 α

und Verletzung des Äquivalenzprinzips

differentielle Beschleunigung η

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

MICROSCOPE – Satteliten-Mission