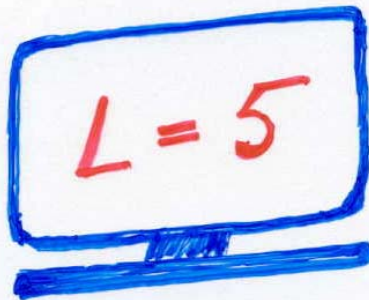


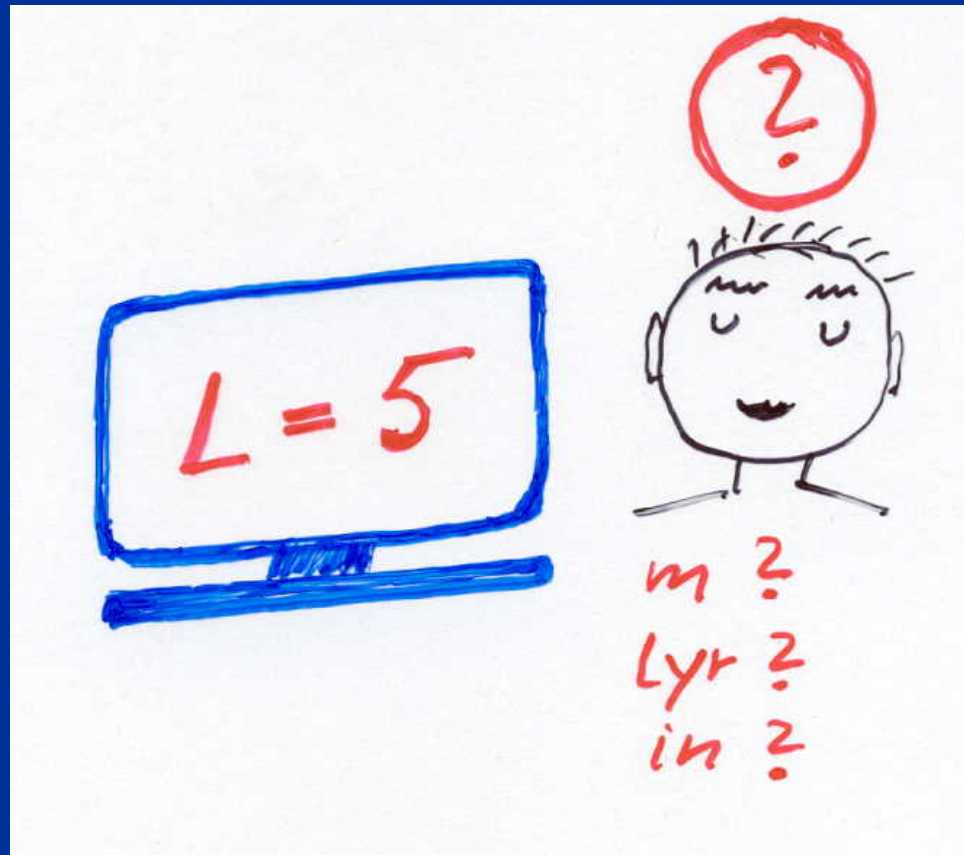
Von der Planck Masse zur Dunklen Energie

C. Wetterich

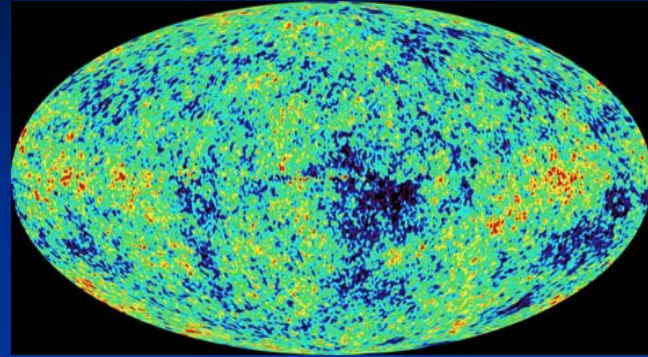


$$L = \sqrt{g} \left(-\frac{1}{2} \chi^2 R + \frac{1}{2} (\delta - 6) \partial^\mu \chi \partial_\mu \chi + V(\chi) + h \chi \bar{\psi} \psi \right)$$

Woher kommen Längen und Massen ?



$$\Omega_m + X = 1$$

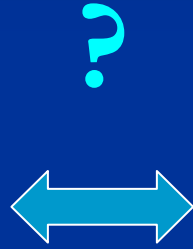
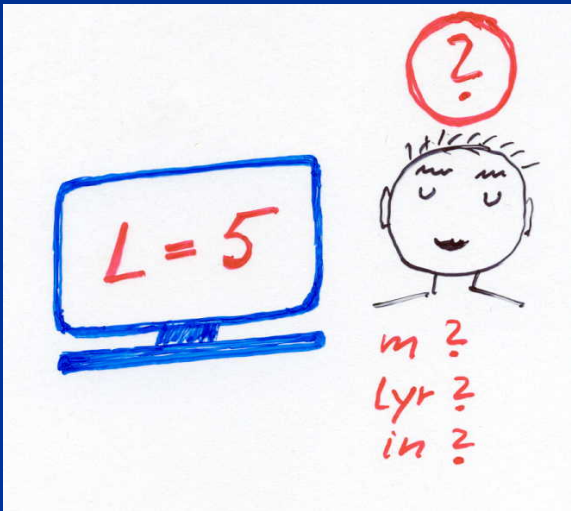


$$\Omega_m : 25\%$$



$$\Omega_h : 75\%$$

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.

Standard – Modell der elektroschwachen Wechselwirkung : Higgs - Mechanismus

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

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

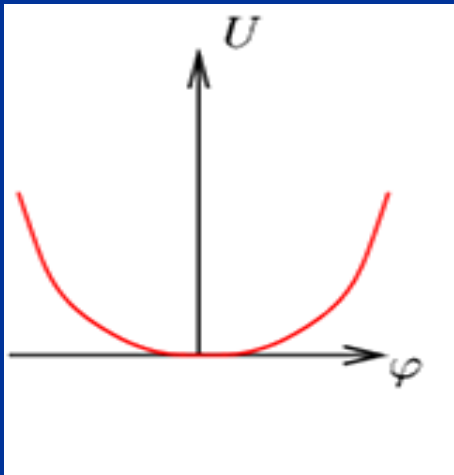
Skalar - Feld $\varphi(x,y,z,t)$

ähnlich elektrischem Feld , aber keine Richtung :
daher Erwartungswert möglich,
ohne Isotropie zu verletzen

Spontane Symmetrie - Brechung

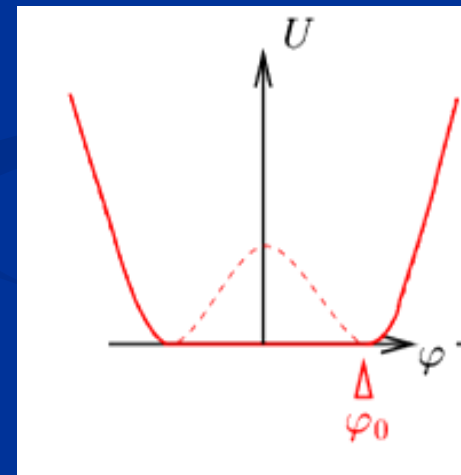
SYM

$$\langle \varphi \rangle = 0$$



SSB

$$\langle \varphi \rangle = \varphi_0 \neq 0$$



Higgs – Potenzial in SM

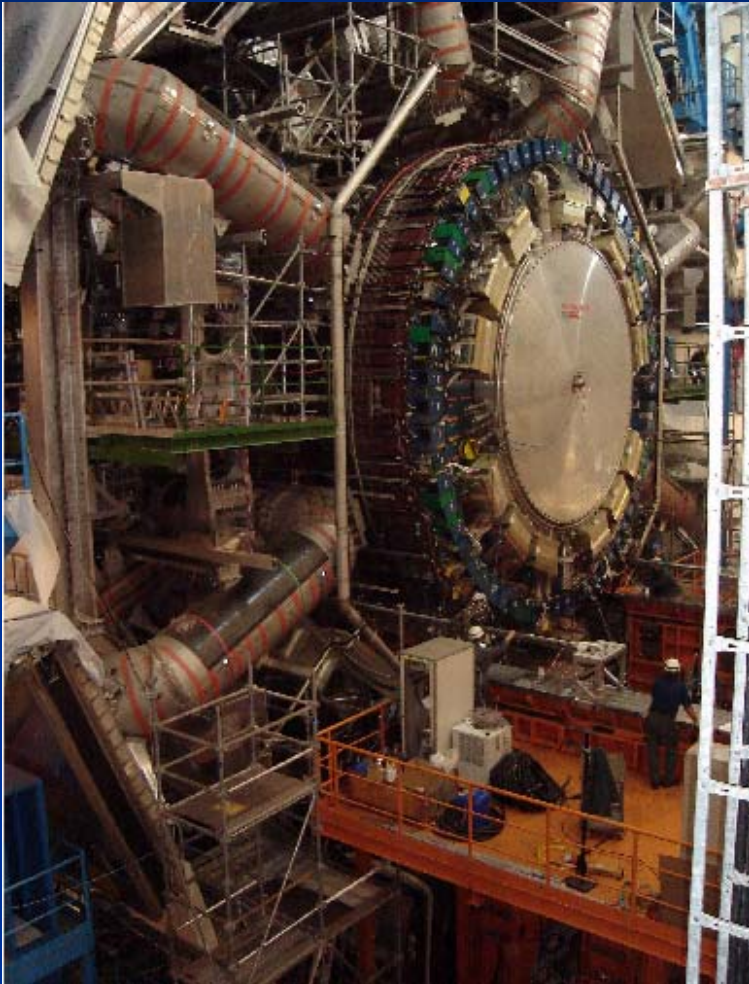
Massen und Kopplungskonstanten

werden bestimmt durch die

*Eigenschaften des **Vakuums** !*

ähnlich Maxwell – Gleichungen in Materie

LHC



*Hatten Kopplungskonstanten im
frühen Universum
andere Werte ?*

Ja !

Restoration der Symmetrie bei hohen Temperaturen im frühen Universum

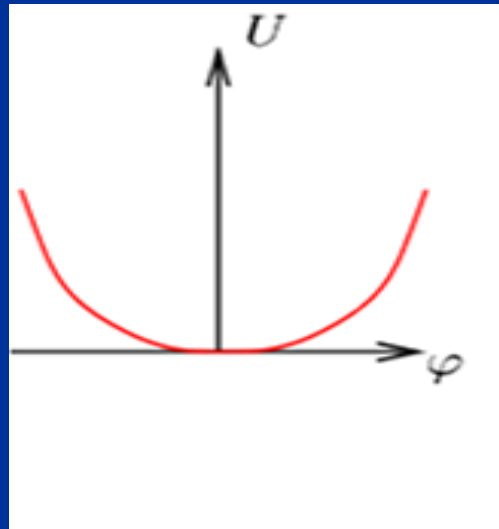
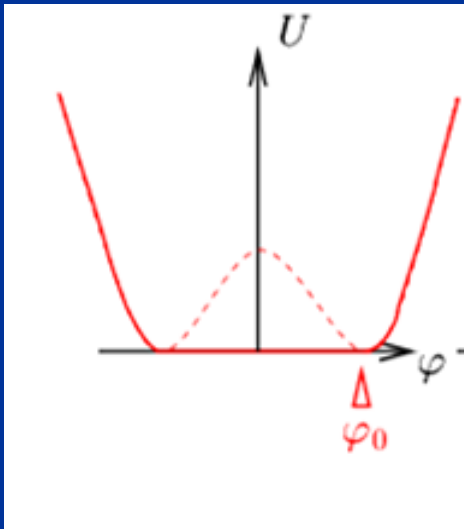
Niedrige T
SSB

$$\langle \varphi \rangle = \varphi_0 \neq 0$$

Hohe T
SYM

$$\langle \varphi \rangle = 0$$

hohe T :
weniger Ordnung
mehr Symmetrie



Beispiel:
Magnete

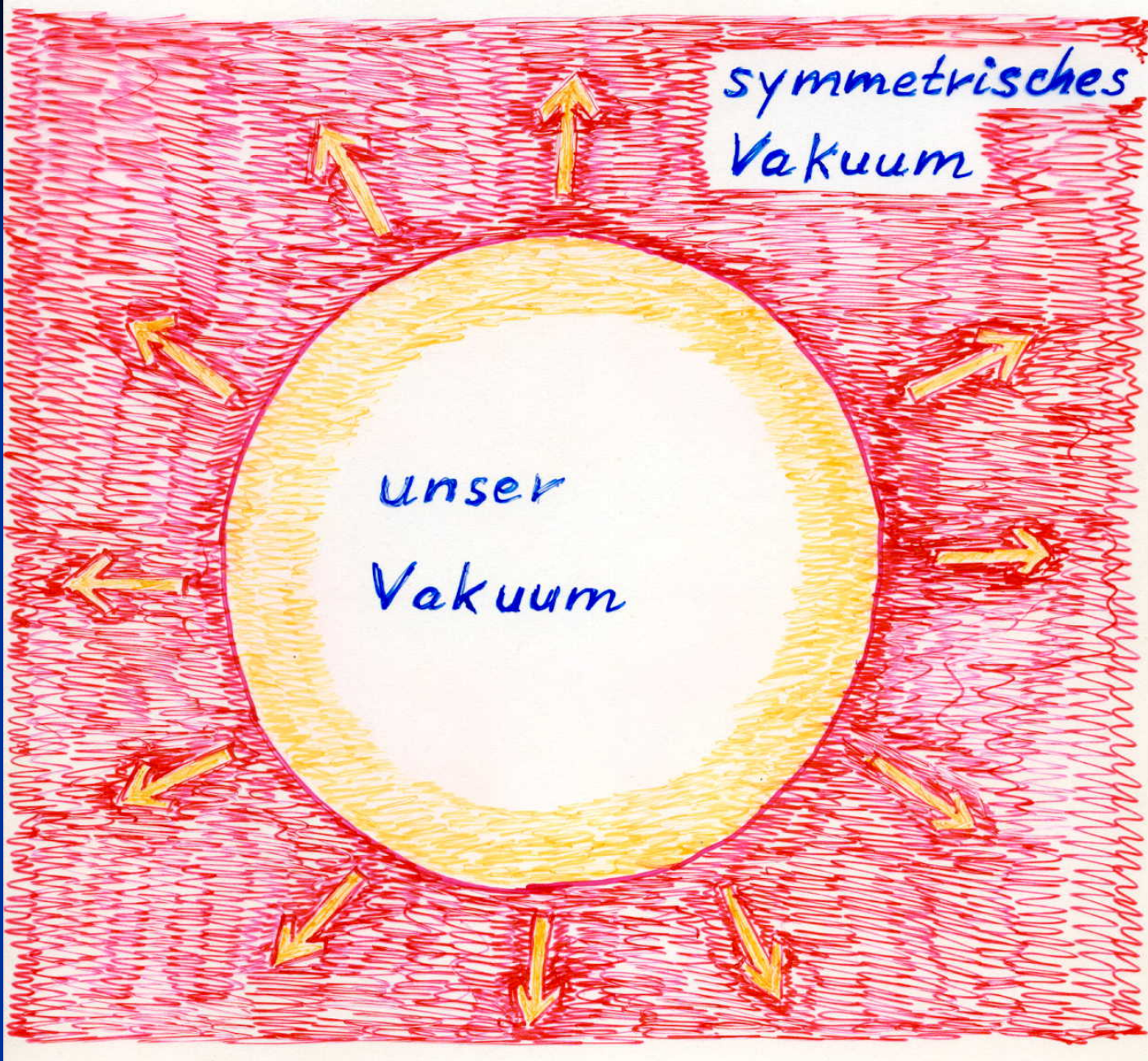
Im heissen Plasma
des frühen Universums :

**Keine unterschiedlichen Massen
für Elektron und Myon !**

**Ähnliche Stärke der
elektromagnetischen und
schwachen Wechselwirkung**

symmetrisches
Vakuum

unser
Vakuum



Zusammenfassung

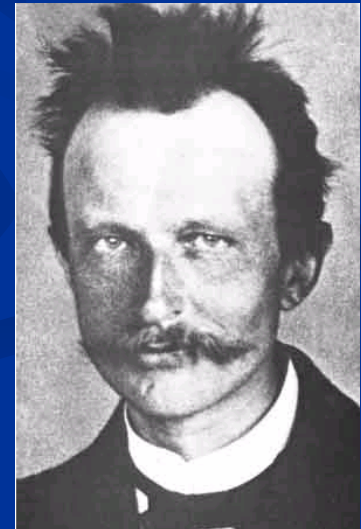
*Der Wert von Massenverhältnissen und
Kopplungskonstanten hängt vom Zustand ab !*

Nicht ein für alle mal gegeben !

Das Rätsel der winzigen Zahlen

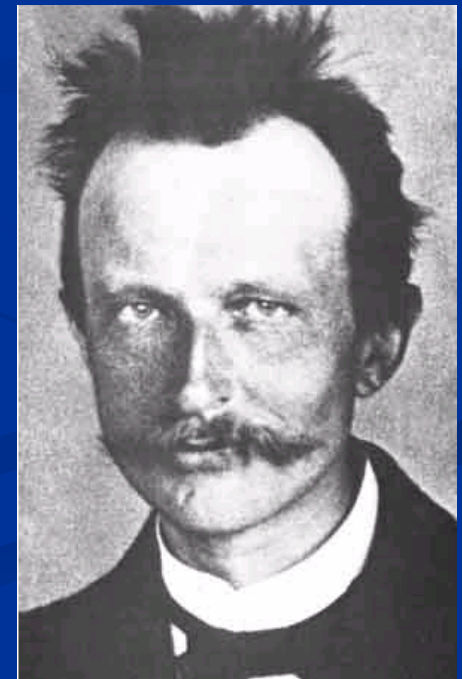
Massenskalen in der Elementarteilchenphysik

- Protonmasse
(Skala der starken Wechselwirkung)
- Fermi - Skala der schwachen Wechselwirkung
- Planck Masse
(Skala der Gravitationswechselwirkung)
(Newton)



Vereinheitlichung und Dimensionen

- Vereinheitlichung fixiert dimensionsbehaftete Parameter
- Spezielle Relativitätstheorie : \mathbf{c} ($= 1$)
- Quantenmechanik : \mathbf{h} ($= 2\pi$)
- Vereinheitlichung mit Gravitation
(Quantengravitation)
fundamentale Massenskala
(Planck Masse , string tension , ...)



Gravitationseinheiten

- Newton's Konstante

$$G_N = 1 / (8\pi M^2)$$

- Reduzierte Planck Masse

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

- $M=1$: $\text{GeV} = 4.1 \times 10^{-19}$

Gravitationseinheiten

(reduzierte Planck – Masse = 1)

- $m_{\text{Proton}} = 3.9 \times 10^{-19}$
- $m_{\text{Elektron}} = 2.1 \times 10^{-22}$ ←
- Gramm = 2.3×10^5
- Meter = 1.2×10^{34}
- Sekunde = 3.7×10^{42}
- Alter des Universums ($13.7 \times 10^9 \text{ yr}$) = 1.6×10^{60}
- Energiedichte des Universums : $\rho = 10^{-120}$ ←

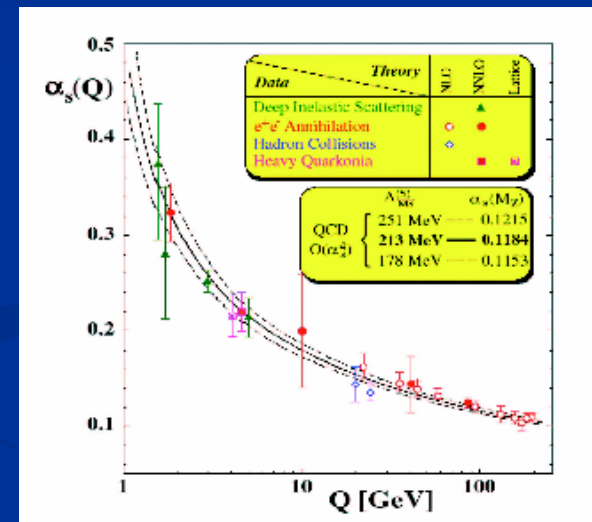
**Kleine
Parameter –
grosse Rätsel**

Laufende Kopplung : QCD

Effektive Eichkopplung hängt von Impulsskala μ ab

$$\beta_{\text{QCD}} \equiv \mu \frac{d\alpha_s}{d\mu} = -\frac{1}{3\pi} \left[\frac{33}{2} - N_f \right] \alpha_s^2; \quad \alpha_s \equiv \frac{g^2}{4\pi}$$

$$\alpha_s(\mu) = \frac{\alpha_{s0}}{1 + \frac{\alpha_{s0}}{3\pi} \left[\frac{33}{2} - N_f \right] \ln(\mu/\mu_0)}$$



David J. Gross



H. David Politzer



Frank Wilczek

QCD : Dimensionale Transmutation

- Ohne Quark – Massen : nur dimensionslose Kopplung !
- Charakteristisches μ , bei dem Kopplung groß wird
- Massenskala Λ_{QCD}
- Proton - Masse $\sim \Lambda_{\text{QCD}}$
- Für gegebene Kopplung $\alpha_s(\mu=M) = \alpha_0$:

$$M_{\text{Proton}} = b \exp(-c / \alpha_0) M , c \approx 0.9$$

Kleines α_0 , winziges M_{Proton} !

Trick der Natur

Quanten - Fluktuationen erzeugen
Massen-Skalen durch
laufende dimensionslose Kopplungen

Dilatations - Anomalie

**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 χ
(GUTs, Superstrings,...)

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

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

Trick für Theorie ohne fundamentale Massenskala:

Ersetze alle Massen durch
dimensionslose Konstante mal χ

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**

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

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

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

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

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 χ !!

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 + Cosmon

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

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

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

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

Keine zusätzliche Konstante !

Ohne Dilatations – Anomalie :

$$V = \text{const.}$$

Masseloses Goldstone Boson = Dilaton

Dilatations – Anomalie :

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

Winzige zeitabhängige Masse : Cosmon

Kosmologie mit Dunkler Energie

Homogenes und isotropes Universum

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

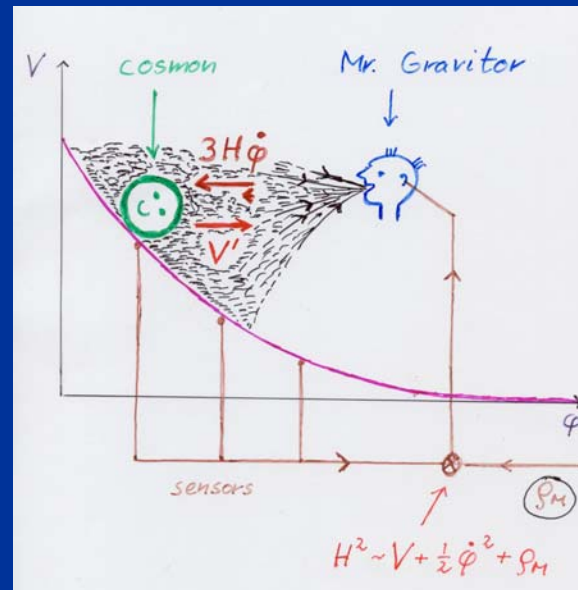
$$\rho = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2$$

- Dynamische Dunkle Energie !

Kosmologische Gleichungen

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

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



$$(k(\varphi) = 1)$$

Kosmische Attraktorlösung

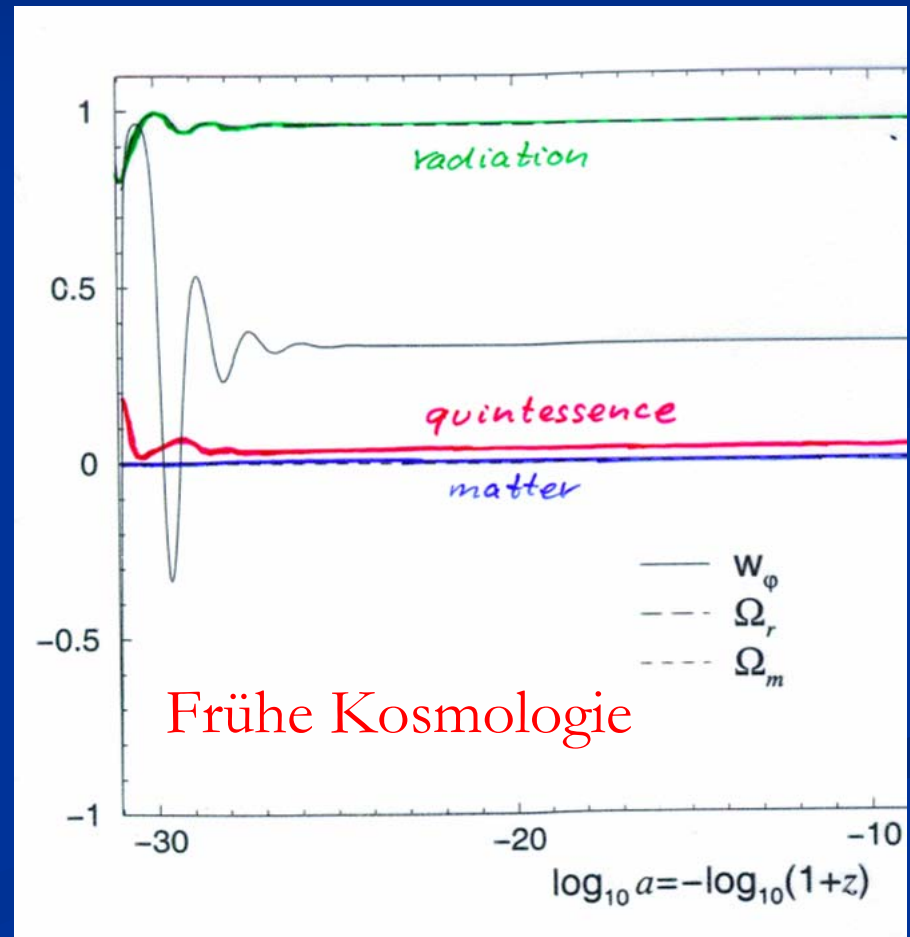
Lösung unabhängig von
Anfangsbedingungen

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

$\varphi \sim \ln(t)$

$\Omega_h \sim V/\rho_m \sim \text{const.}$

Details hängen von $V(\varphi)$
ab



Quintessenz

Dynamische dunkle Energie ,
vermittelt durch Skalar**feld**
(Cosmon)

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

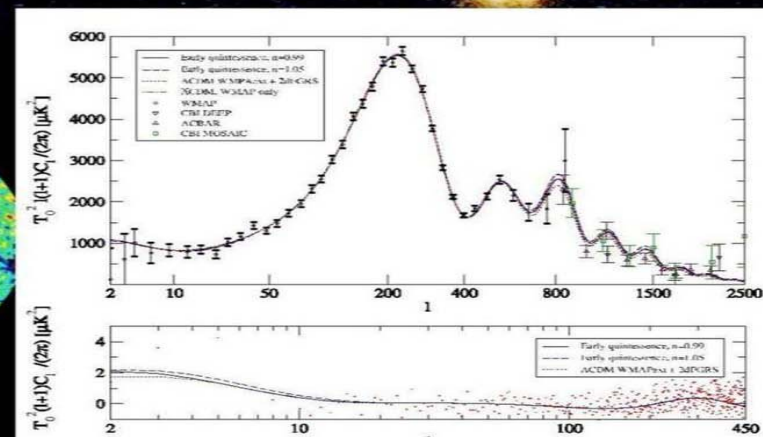
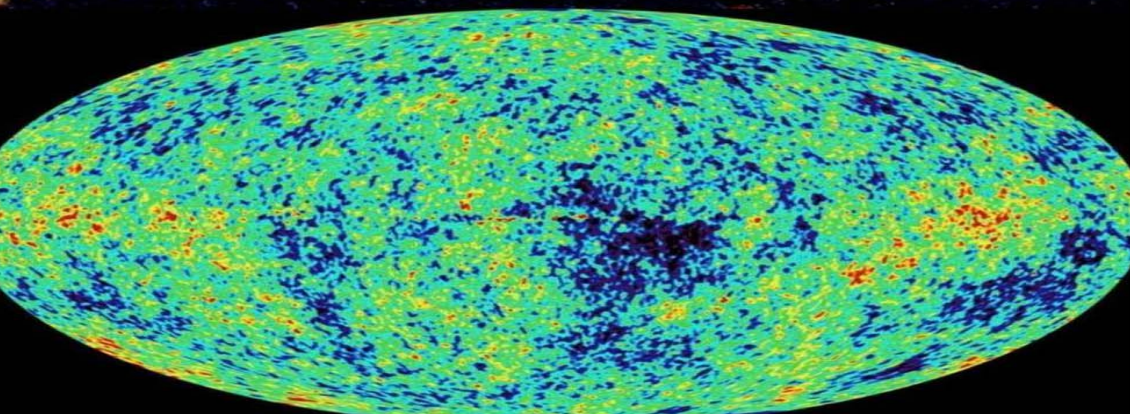
C.Wetterich,Nucl.Phys.B302(1988)668

24.9.87

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

20.10.87

Welch Dunkle Energie dominiert das Universum ?



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 , $M^{-2} = 8 \pi G$;

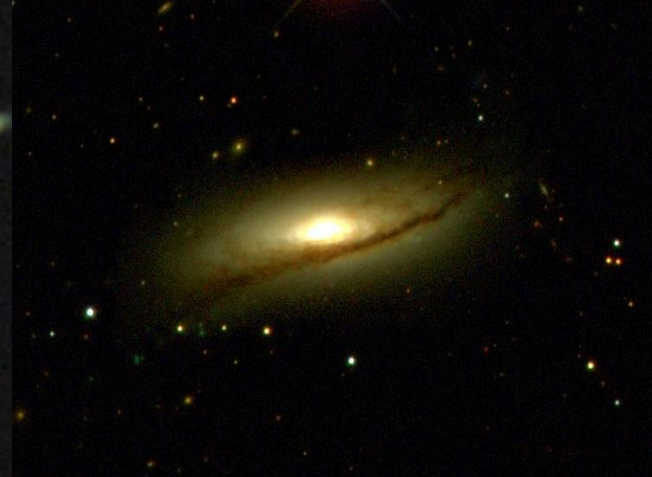
H : Hubble Parameter $H = \dot{a}/a$)

- $\Omega_b = \rho_b / \rho_c$


Anteil der Baryonen an der (kritischen)
Energiedichte

Materie :

Alles , was klumpt



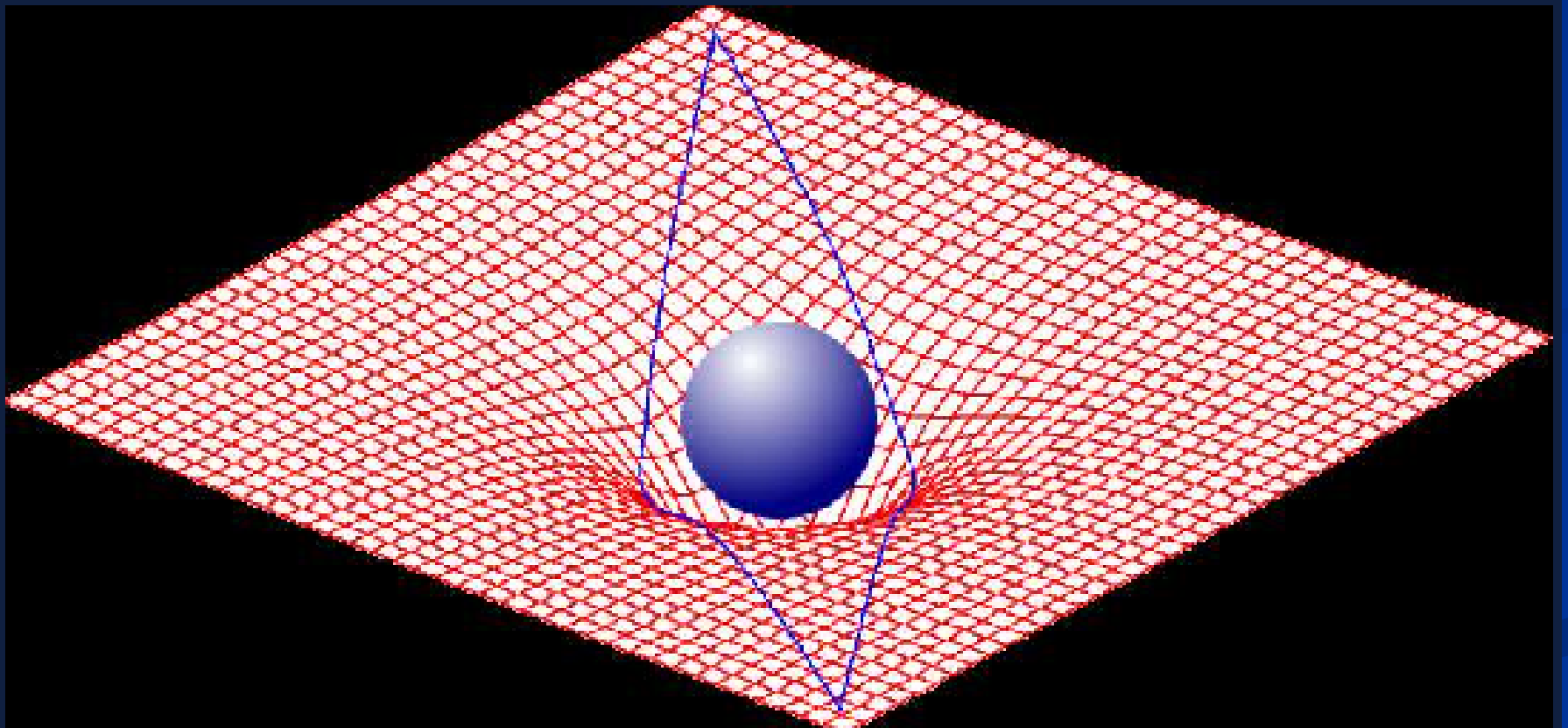
Dunkle Materie

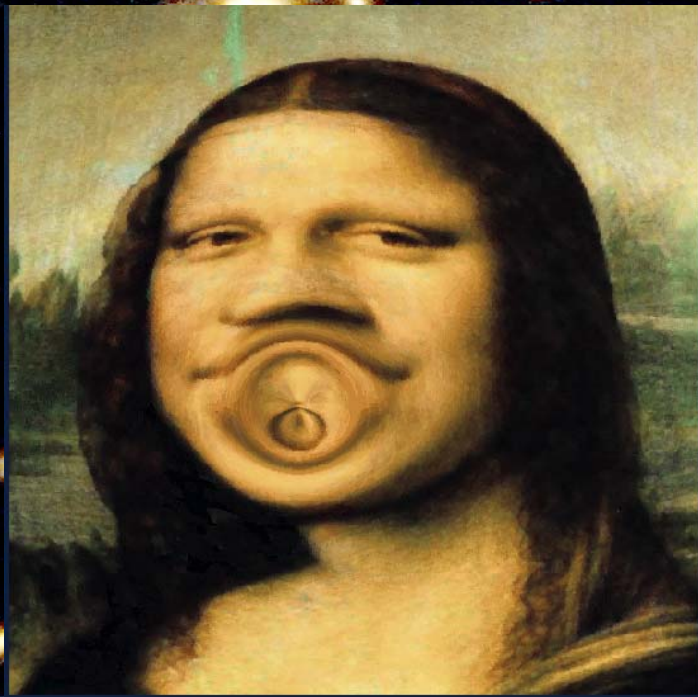
- $\Omega_m = 0.25$ “Materie” insgesamt
- Die meiste Materie ist dunkel !
- Bisher nur durch Gravitation spürbar
- Alles was klumpt!  Gravitationspotential



Gravitationslinse, HST

Lichtstrahlen werden durch Massen abgelenkt





Gravitationslinse, HST

Dunkle +
baryonische Materie :

Alles was klumpt !

$$\Omega_m = 0.25$$

Räumlich flaches Universum

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

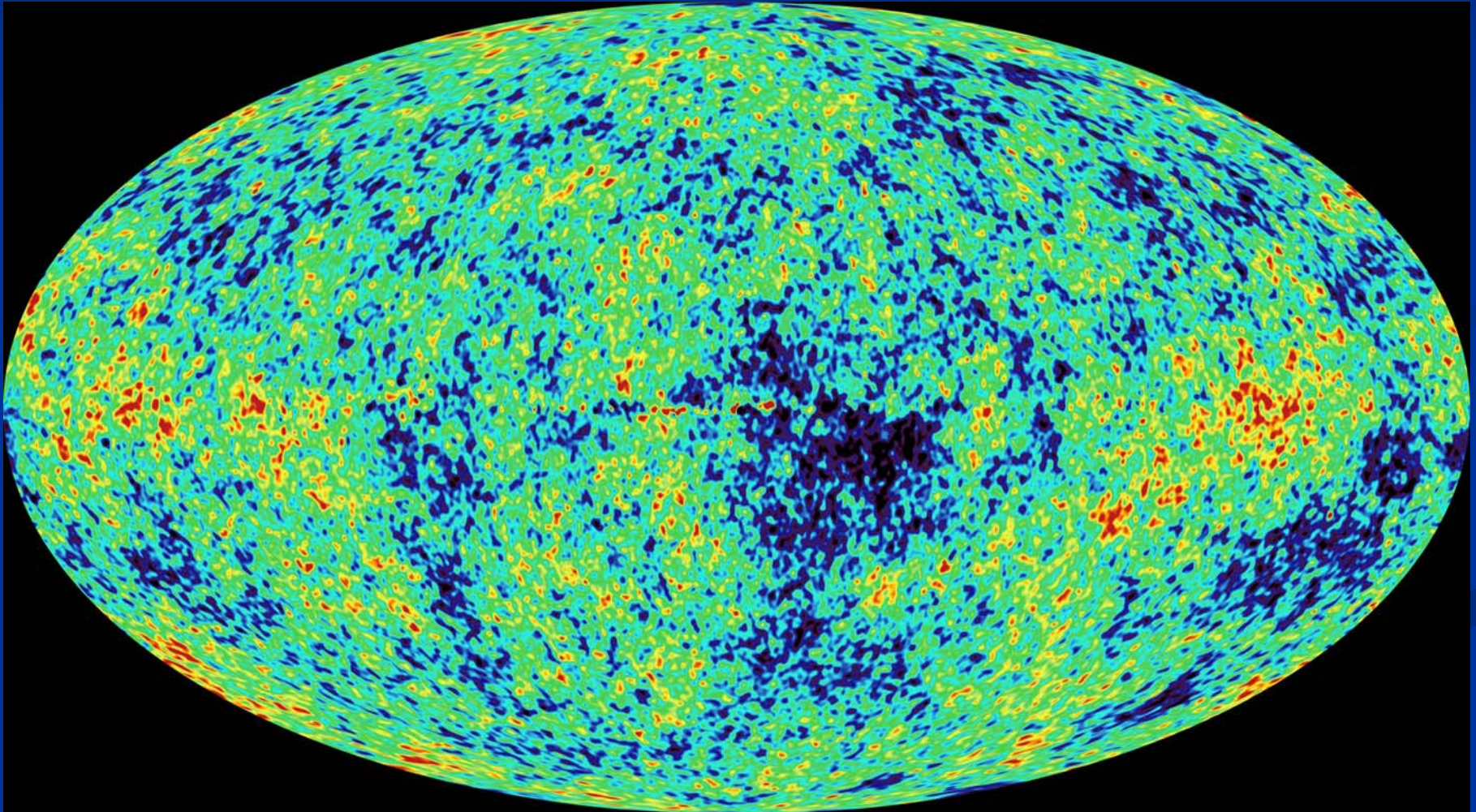
- Theorie (Inflationäres Universum)

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

- 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

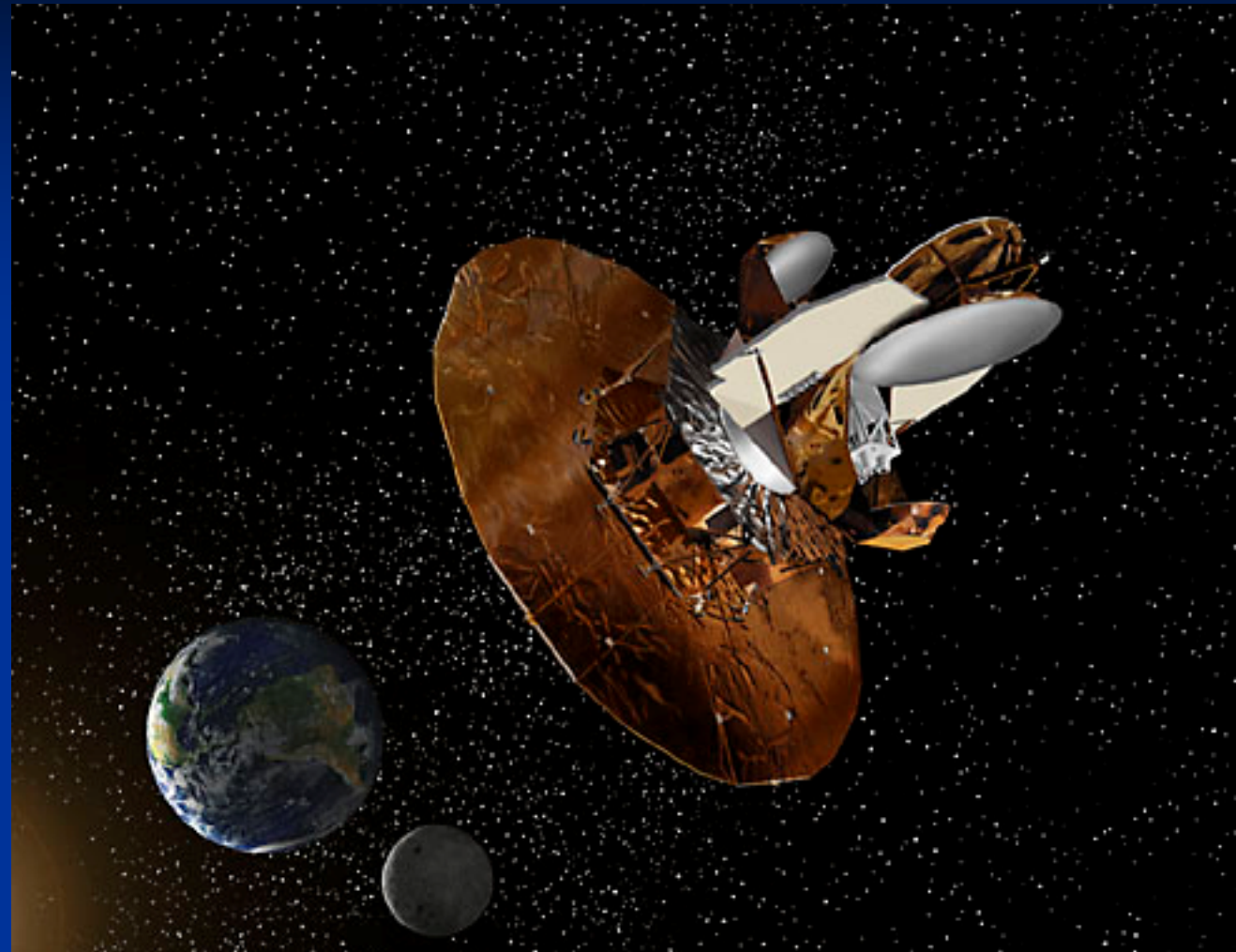
Ed Wollack

Brown

Greg Tucker

UCLA

Ned Wright



UBC

Mark Halpern

Chicago

Stephan Meyer

Princeton

Chris Barnes

Norm Jarosik

Eiichiro Komatsu

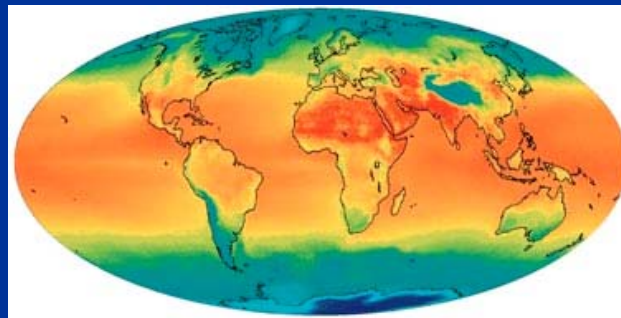
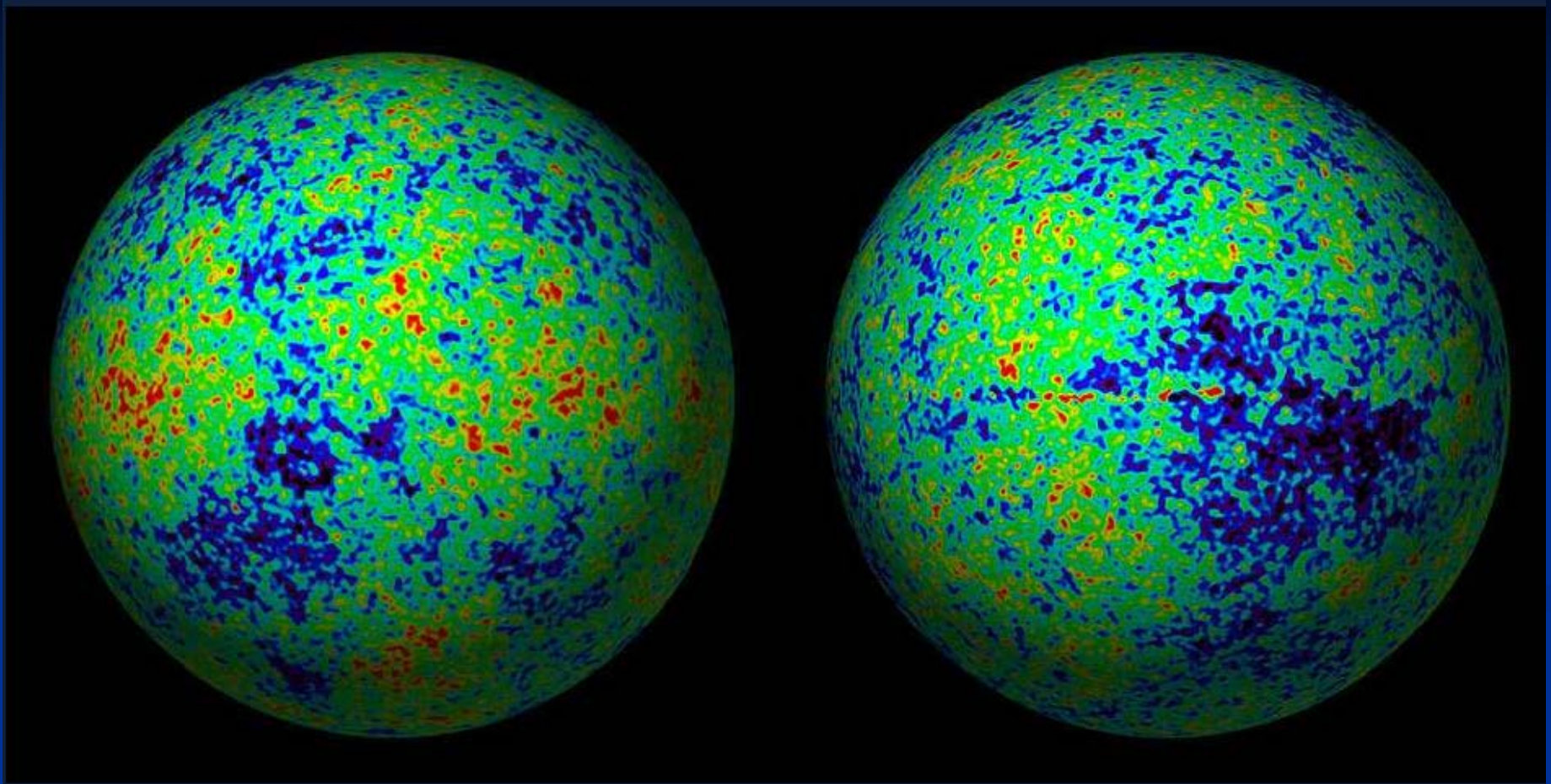
Michael Nolte

Lyman Page

Hiranya Peiris

David Spergel

Licia Verde



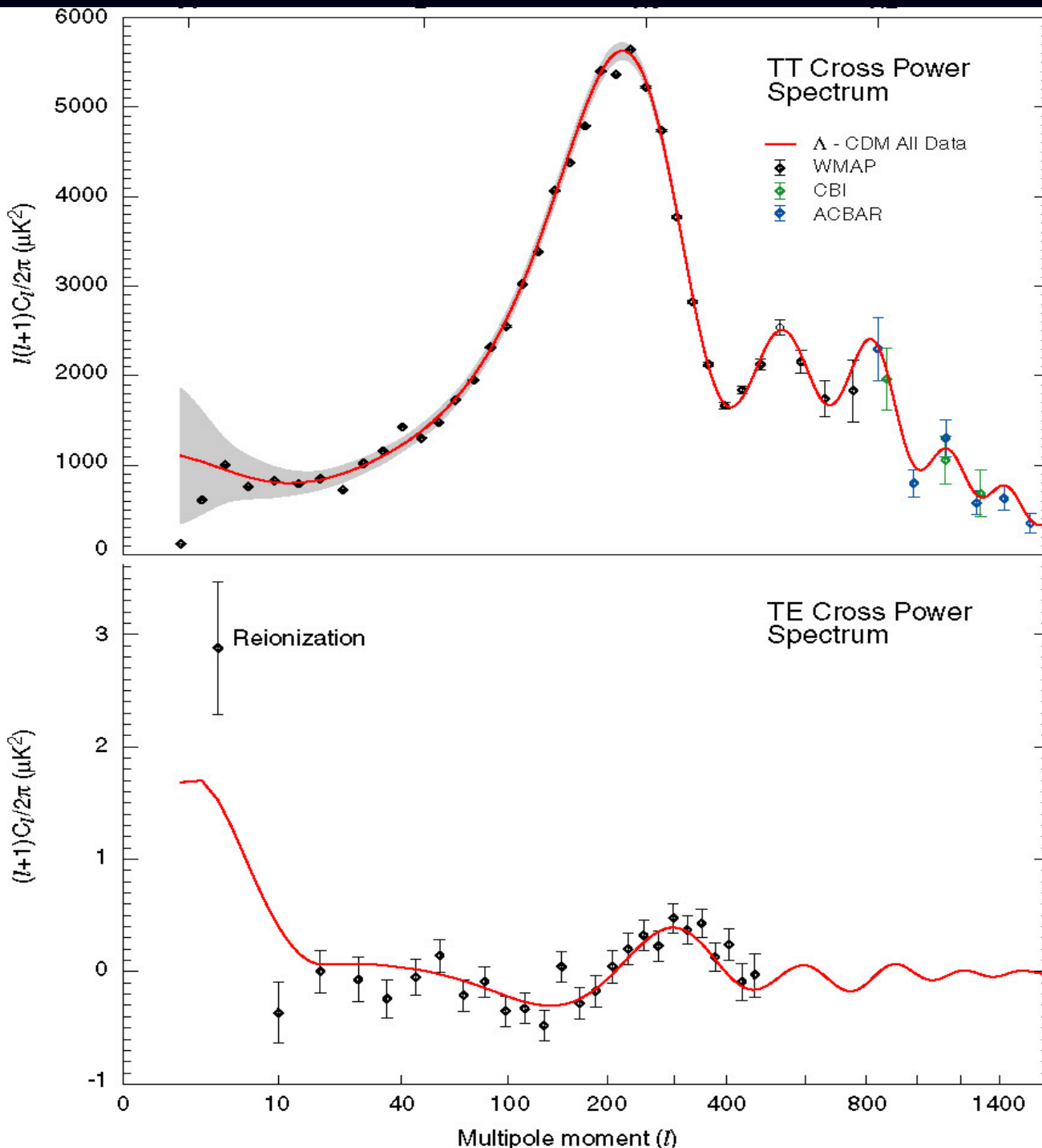
Mittelwerte WMAP 2003

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

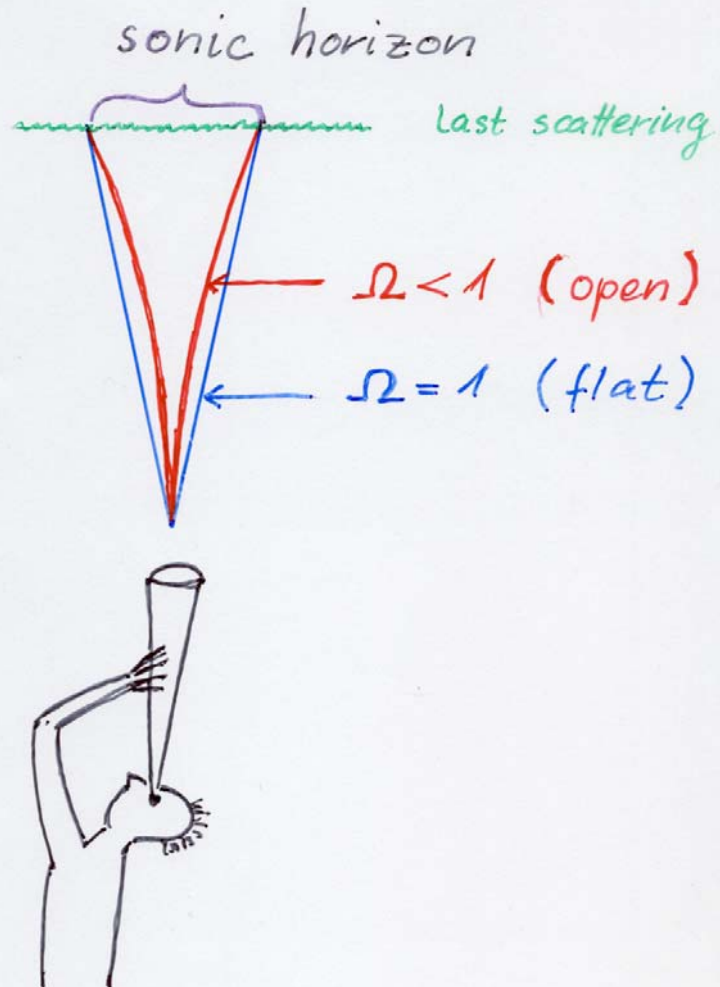
$$\Omega_{\text{m}} = 0.27$$

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

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



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



Dunkle Energie

$$\Omega_m + X = 1$$

$$\Omega_m : 25\%$$

$$\Omega_h : 75\%$$

Dunkle Energie

h : homogen , oft auch Ω_Λ statt Ω_h

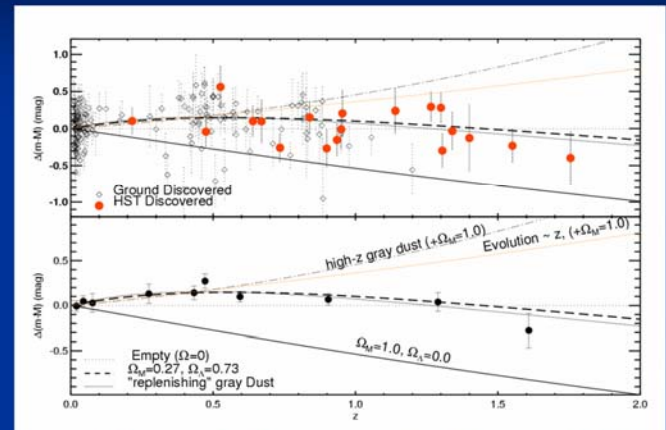
Dunkle Energie :

homogen verteilt

Vorhersagen für Kosmologie mit Dunkler Energie

*Die Expansion des Universums
beschleunigt sich heute !*

Supernova Ia Hubble-Diagramm

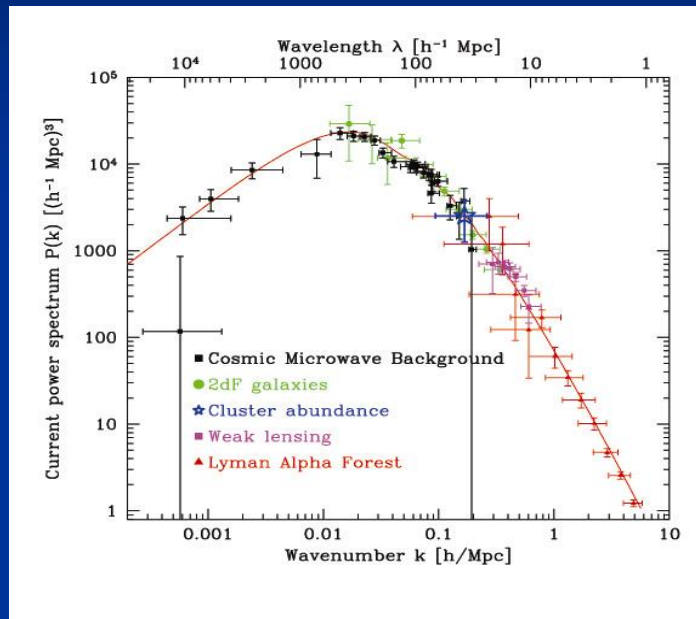


Rotverschiebung z

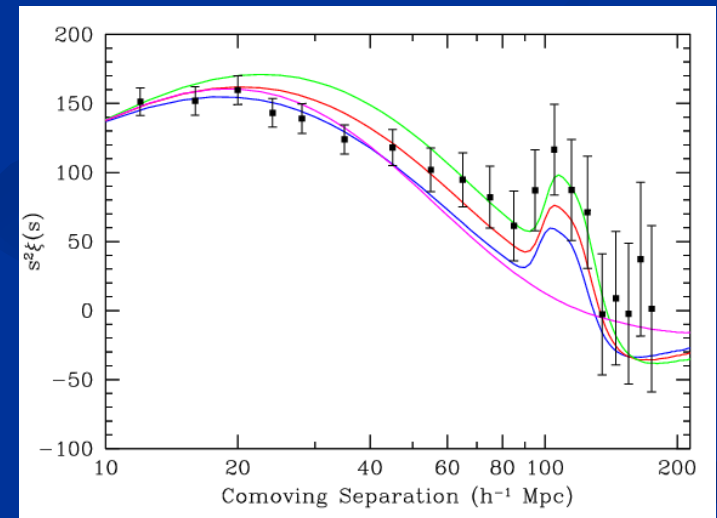
Riess et al. 2004

Fluktuations-Spektrum

Baryon - Peak



Galaxien – Korrelations – Funktion



*Strukturbildung :
Ein primordiales
Fluktuations-Spektrum*

SDSS

Was ist die dunkle Energie ?

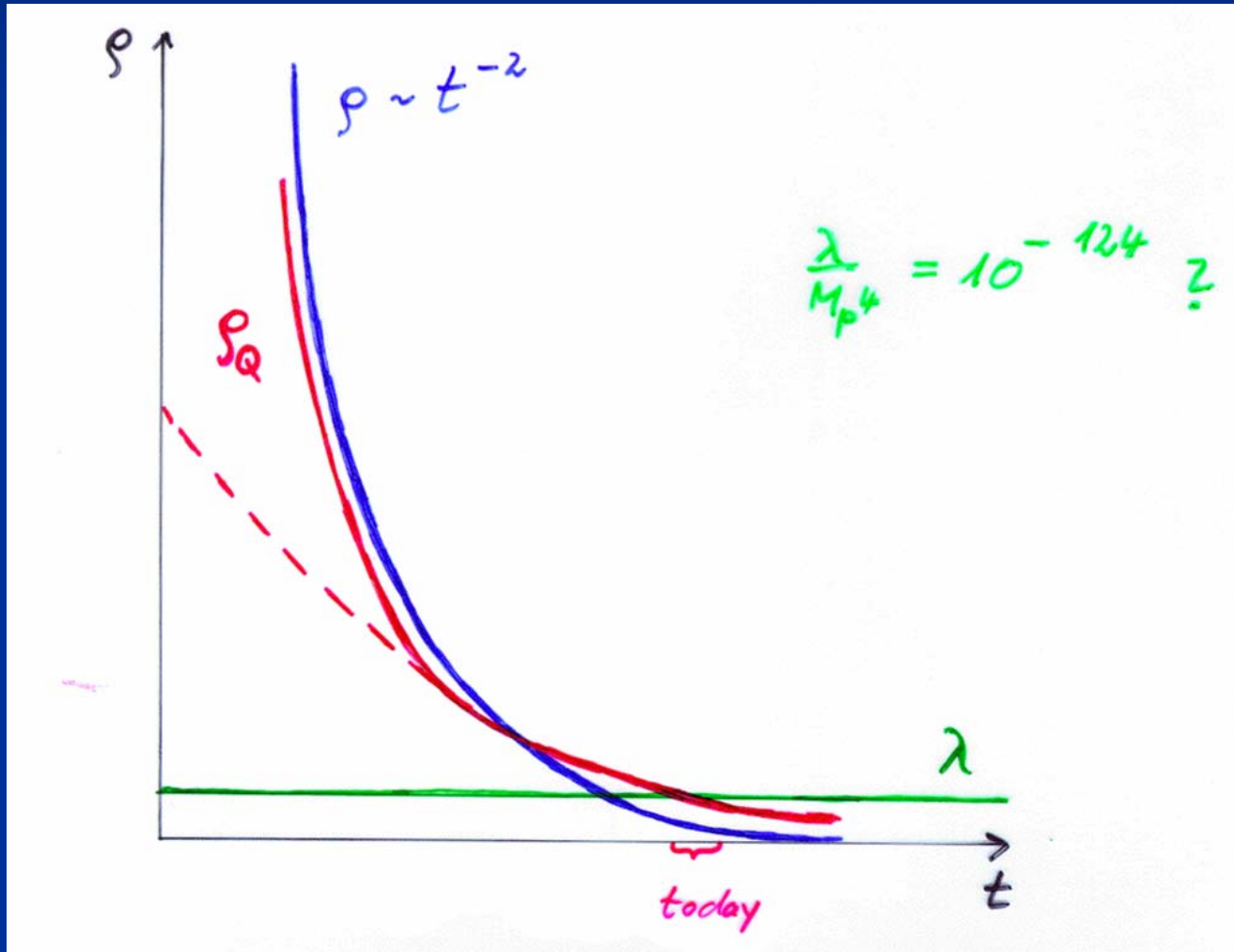
Kosmologische Konstante
oder
Quintessenz ?

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

Kosmische Attraktoren

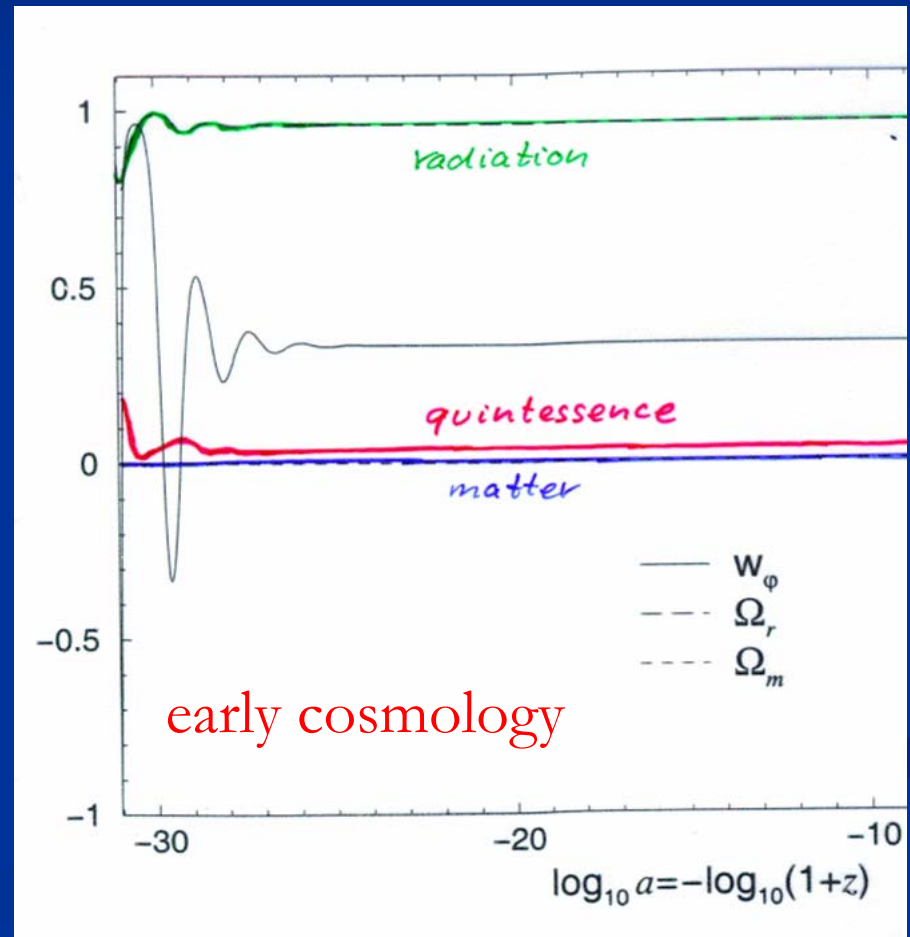
Loesungen werden
unabhaengig von
Anfangsbedingungen

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

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

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

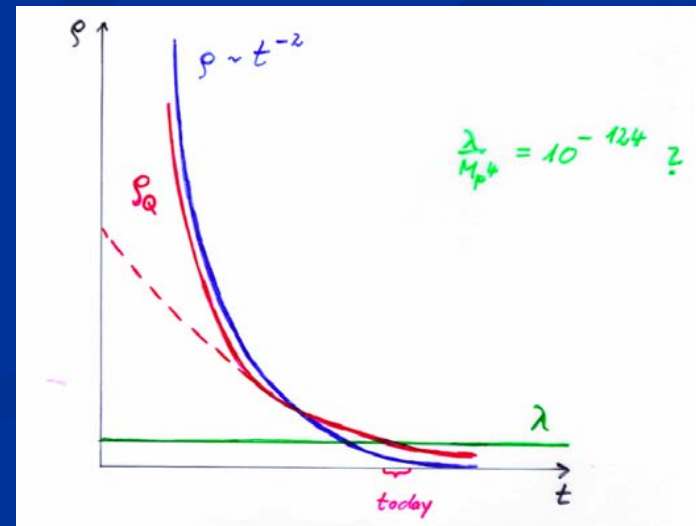
Details haengen von $V(\varphi)$
oder kinetischem Term ab



exponentielles Potential \longrightarrow konstanter Anteil an dunkler Energie

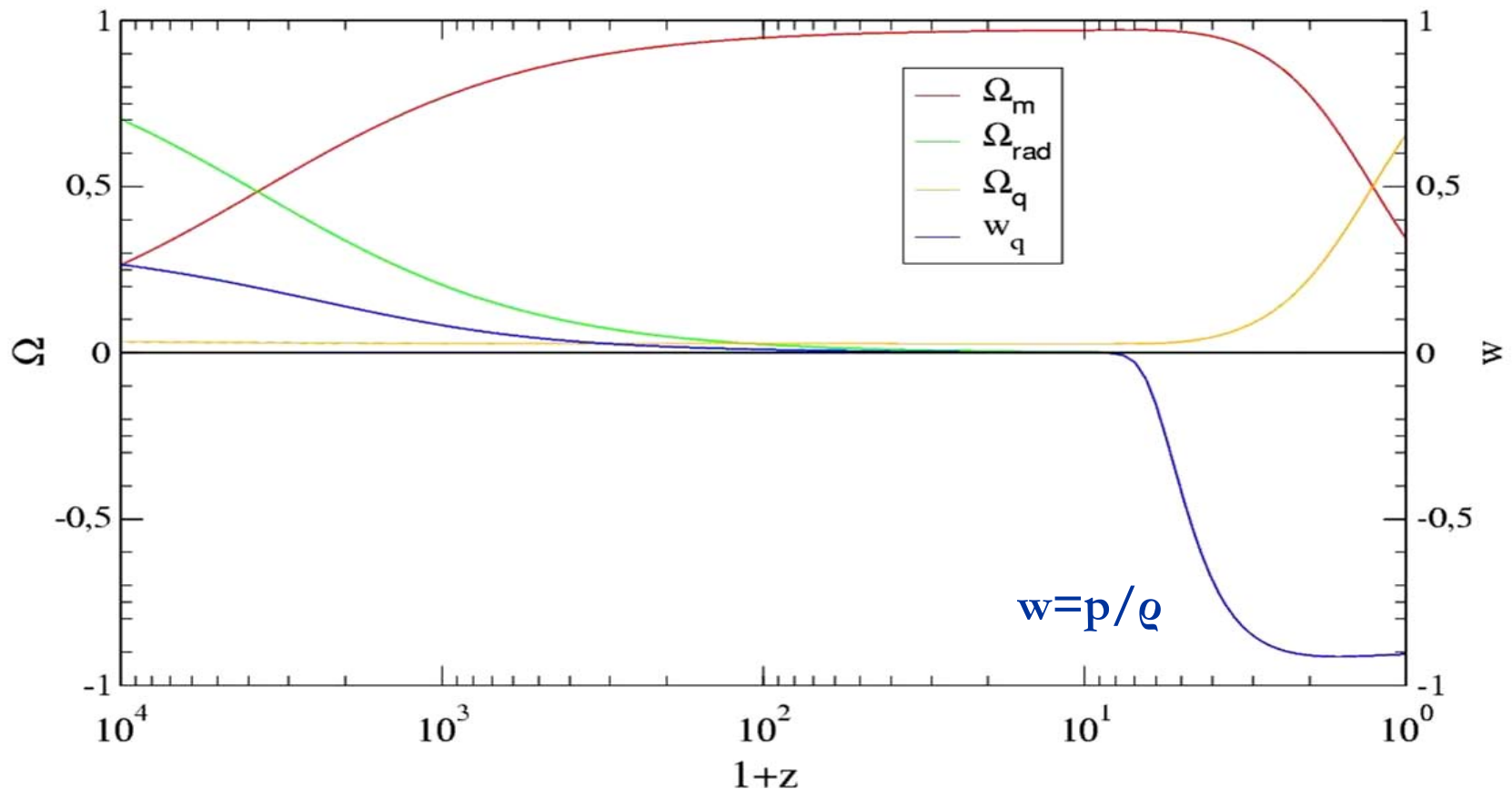
$$\Omega_h = 3/\alpha^2$$

kann die
Groessenordnung
der dunklen Energie
erklären !



Realistische Modelle der Dunklen Energie: Quintessenz wird heute wichtig

Crossover Quintessence Evolution



Zusammenfassung

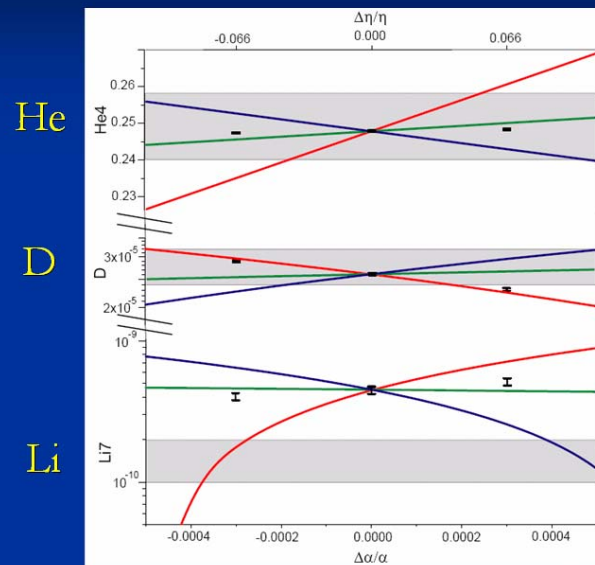
- $\Omega_h = 0.75$
- Q : mögliche Verknüpfung der Dunklen Energie mit zeitlich veränderlicher fundamentaler Massenskala
- Q : zeitlich veränderliche “fundamentale Kopplungen”, Verletzung des Äquivalenzprinzips
- Q/ Λ : dynamische und statische dunkle Energie unterscheidbar
- Q : mögliche Erklärung, warum Dunkle Energie heute wichtig wird (wachsende Neutrino – Masse)

Zeitabhängige Kopplungen

Kopplungen hängen von Wert des Cosmon –
Felds φ ab ; φ variiert mit Zeit .

$\Delta\alpha/\alpha \approx 4 \cdot 10^{-4}$
erlaubt,
für $z \approx 10^{10}$

Variation der Li- Häufigkeit



gegenwärtige

Beobachtungen:

1σ

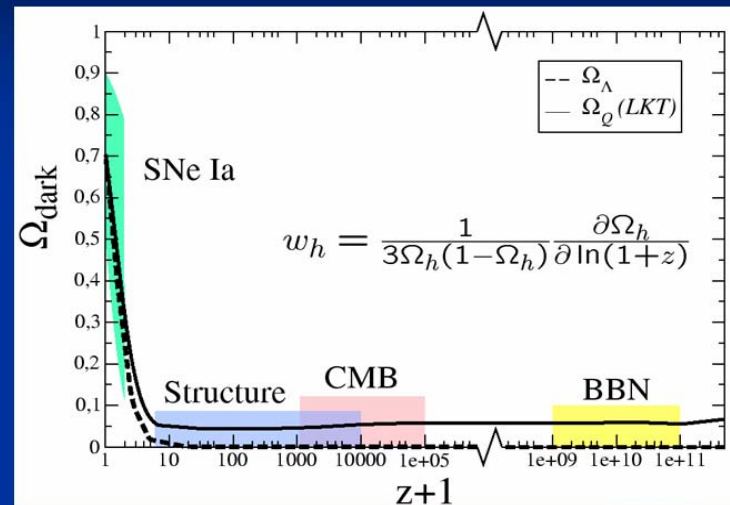
T.Dent,
S.Stern,...

Wie kann man Quintessenz von kosmologischer Konstanten unterscheiden ?

Frühe Dunkle Energie:

charakteristisch für Skalenlösung – widerspricht kosmologischer Konstante

Zeitabhängigkeit der dunklen Energie



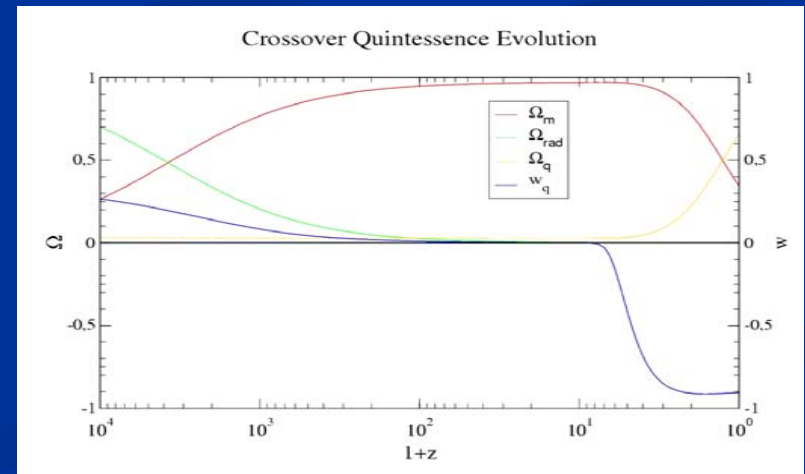
$w=p/e$

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

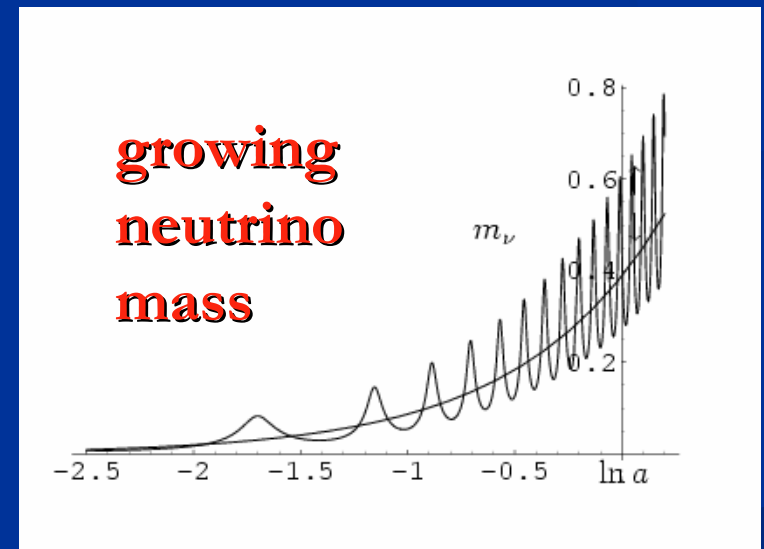
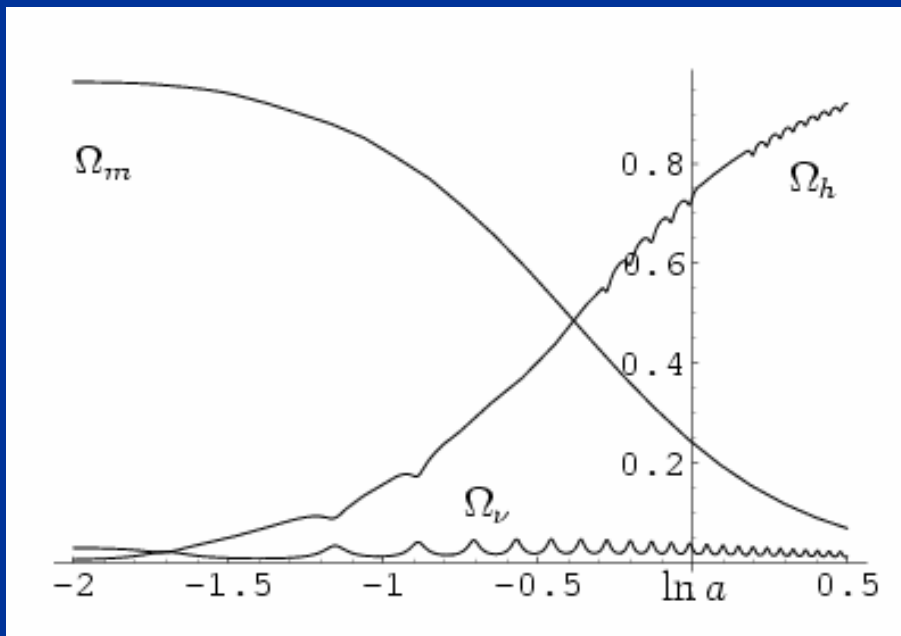
Koinzidenz - Problem

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

Warum jetzt ?



Neutrinos mit wachsender Masse als Trigger für Übergang 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 !

Zusammenhang zwischen jetziger Dunkler Energie - Dichte und Neutrino - Masse

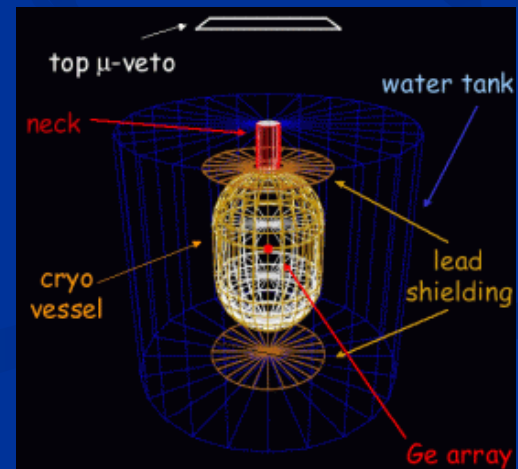
$$[\rho_h(t_0)]^{\frac{1}{4}} = 1.07 \left(\frac{\gamma m_\nu(t_0)}{eV} \right)^{\frac{1}{4}} 10^{-3} eV$$

jetzige Zustandsgleichung ist
gegeben durch Neutrino - Masse !

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

Ist Zeitentwicklung der Neutrino - Masse beobachtbar ?

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



GERDA

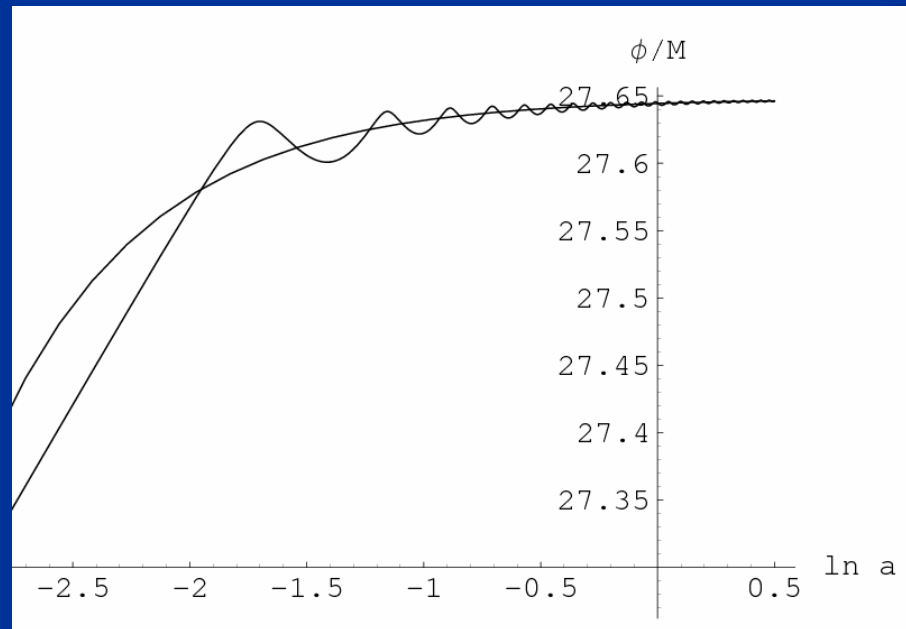
Cosmon - Neutrino Kopplung β

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

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

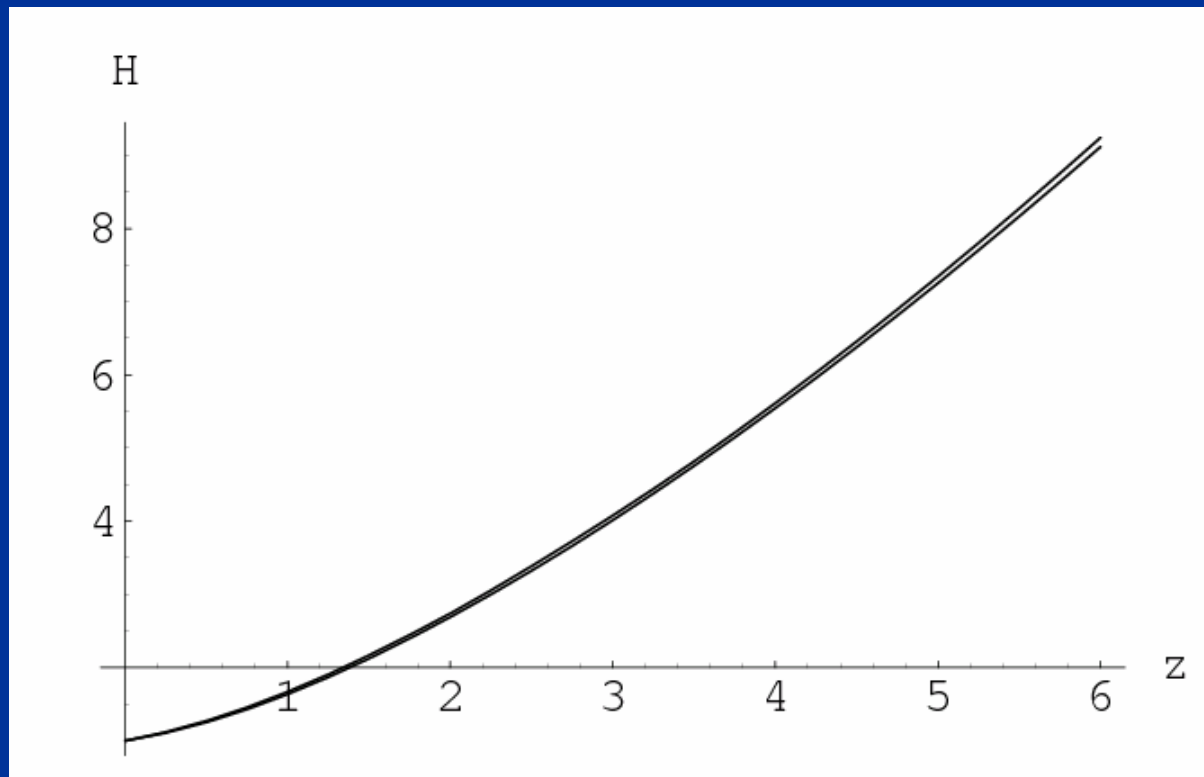
Wachsende Neutrino - Masse stoppt Kosmon - Evolution

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



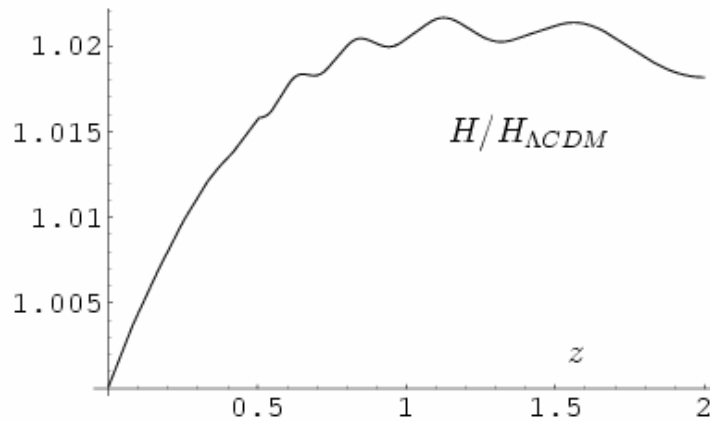
Hubble Parameter

im Vergleich zu Λ CDM



Hubble Parameter ($z < z_c$)

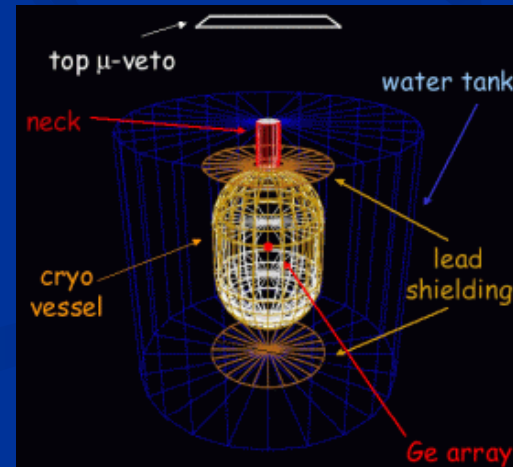
$$H^2 = \frac{1}{3M^2} \left\{ V_t + \rho_{m,0} a^{-3} + 2\tilde{\rho}_\nu,0 a^{-\frac{3}{2}} \right\}$$



nur kleiner
Unterschied
zu
 Λ CDM!

Ist Zeitentwicklung der Neutrino - Masse beobachtbar ?

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



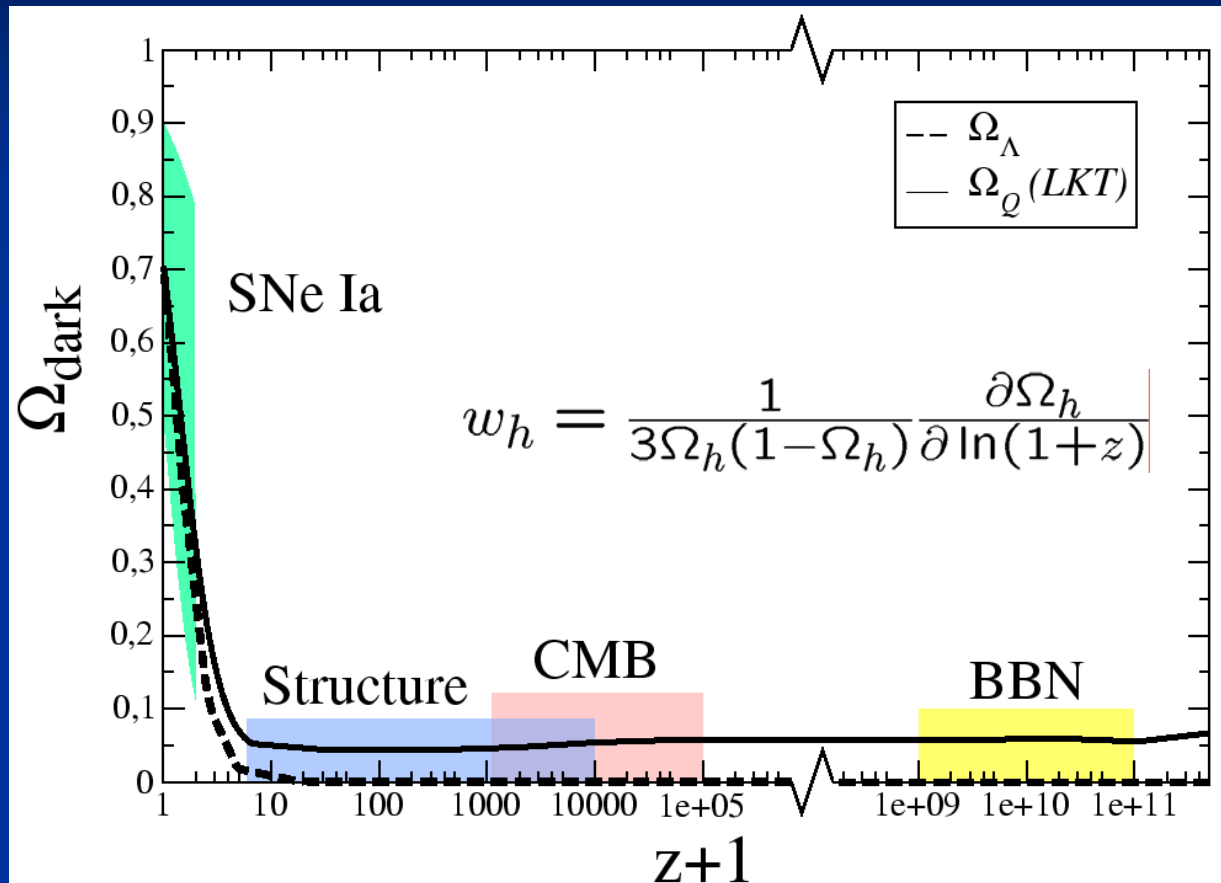
GERDA

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

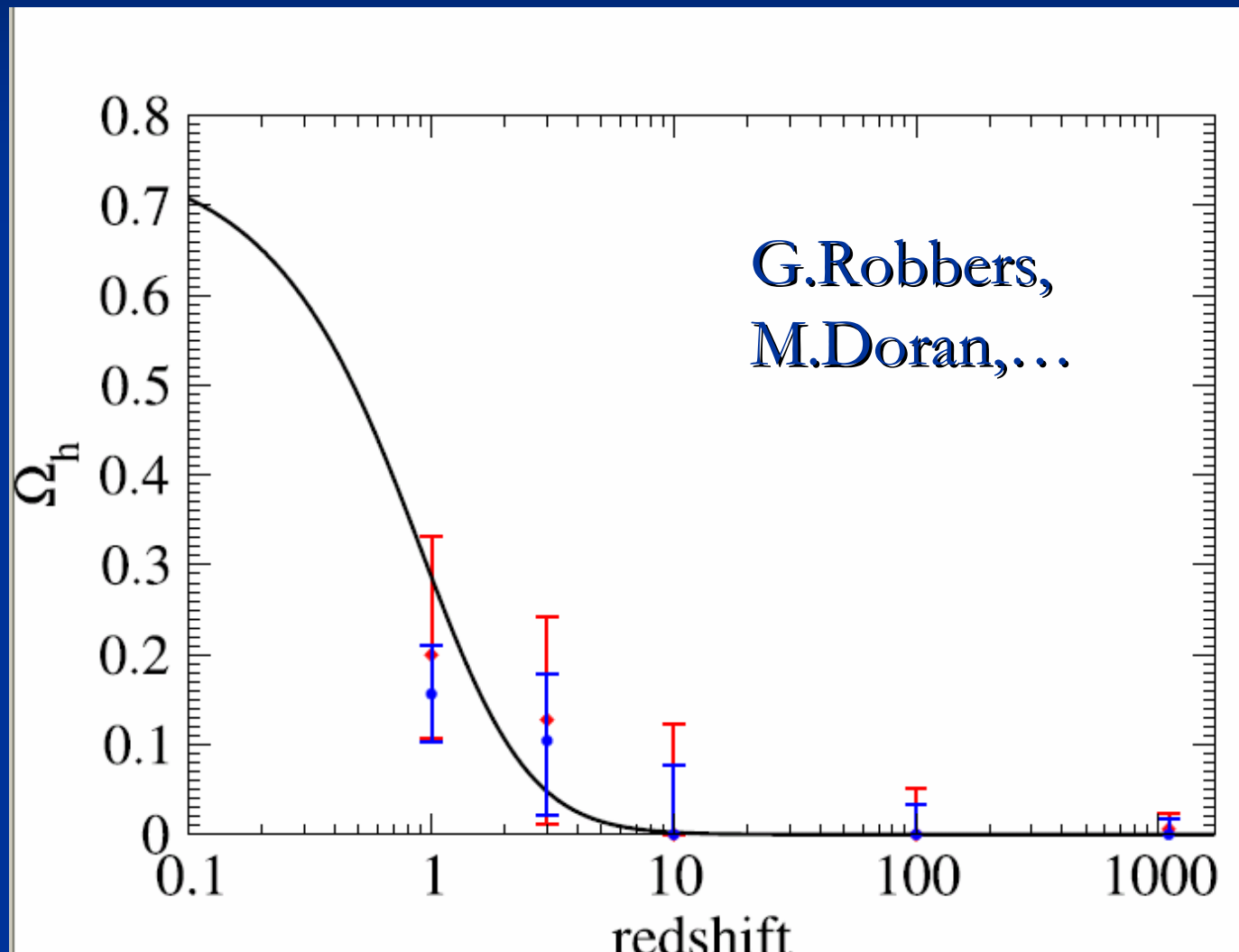


$w=p/q$

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

M.Doran,...

Beobachtung: Grenzen für Ω_h



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”

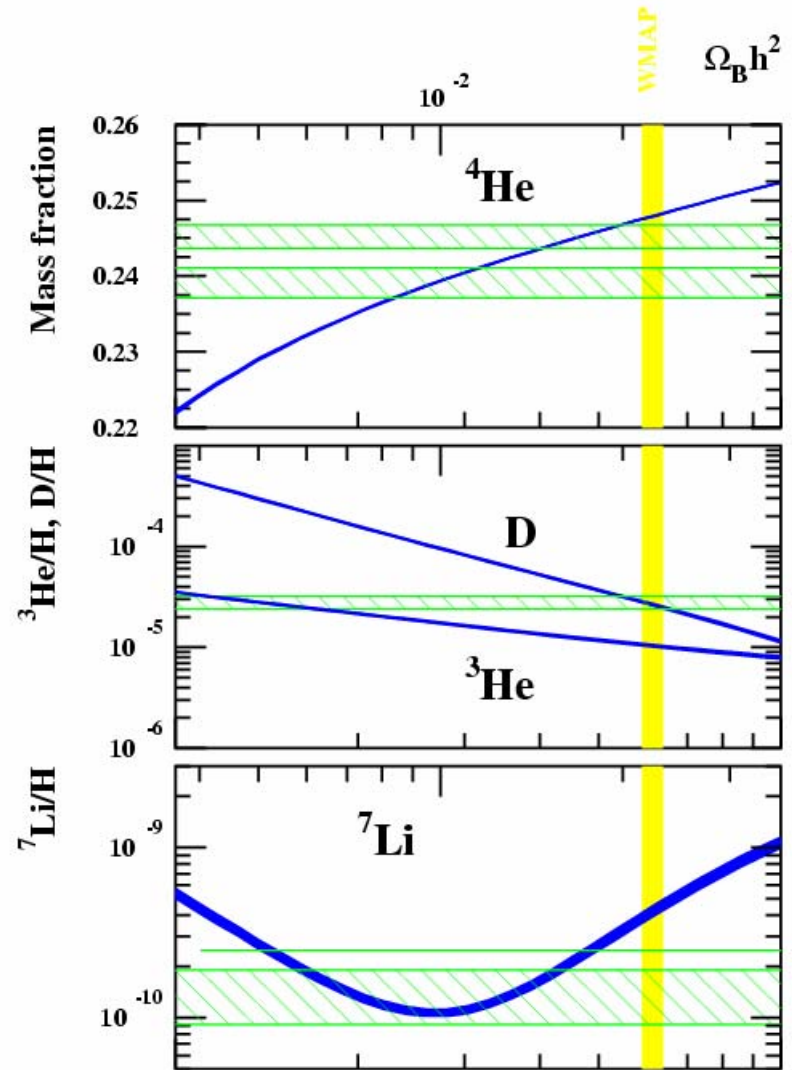
- Feinstrukturkonstante hängt vom Wert des Kosmon Felds ab: $\alpha(\varphi)$

ähnlich Higgsfeld in schwacher Wechselwirkung

- Zeitentwicklung von φ \rightarrow
Zeitentwicklung von α

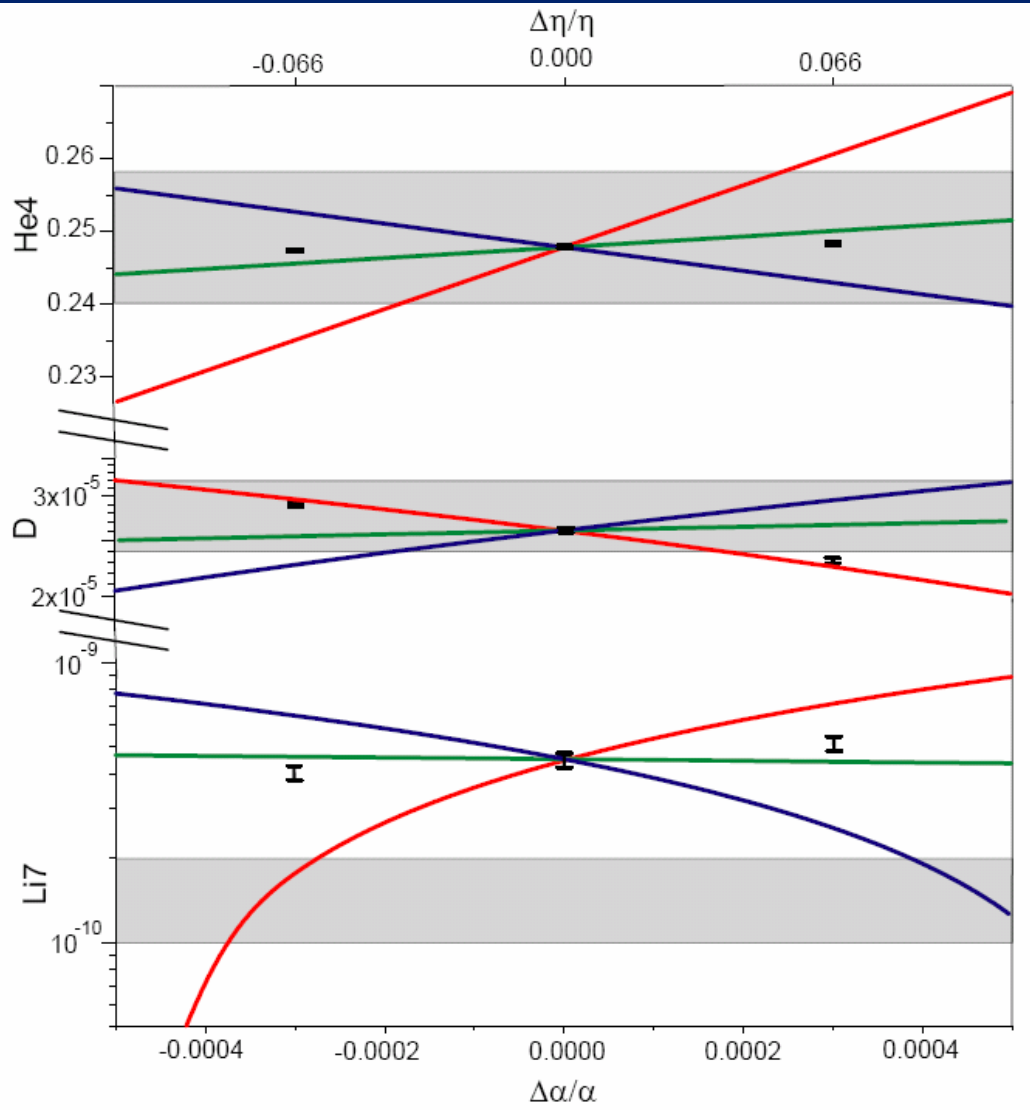
Jordan

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 : mögliche Erklärung , warum Dunkle Energie heute wichtig wird (wachsende Neutrino – Masse)
- Q : zeitlich veränderliche “fundamentale Kopplungen” , Verletzung des Äquivalenzprinzips
- Q : mögliche Verknüpfung der Dunklen Energie mit zeitlich veränderlicher fundamentaler Massenskala

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

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

Dilatations - Symmetrie

Reskalieren der Längenskalen

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

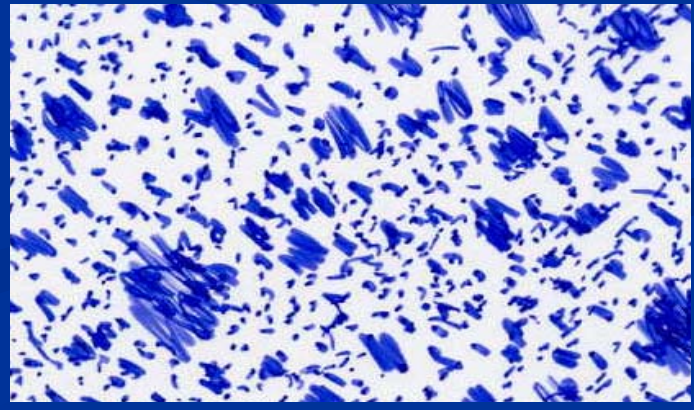
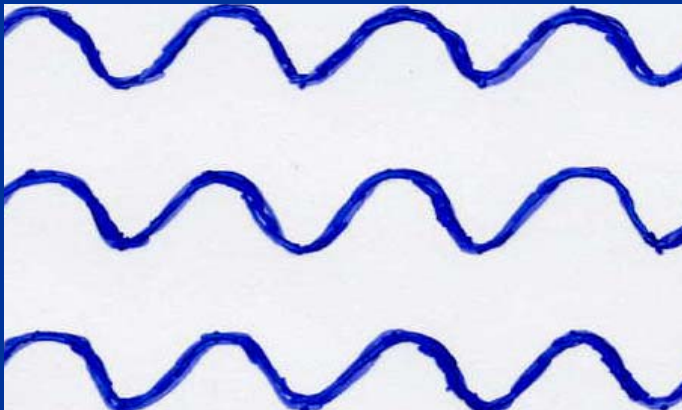
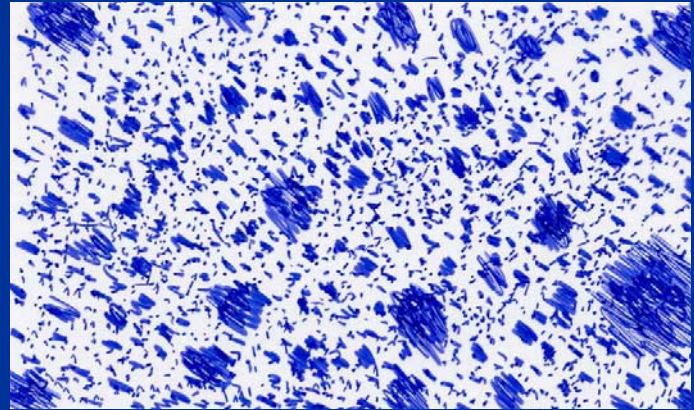
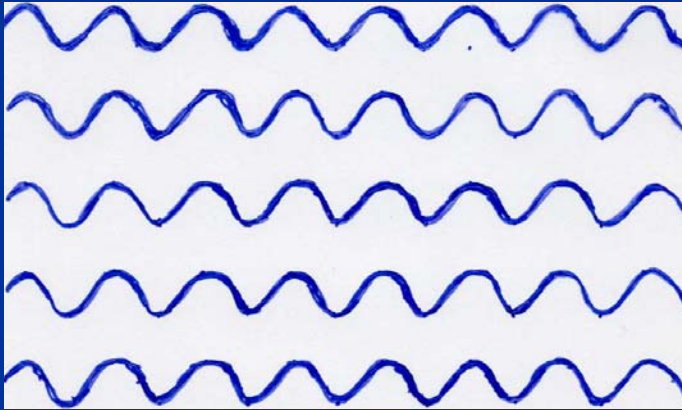
Sieht die Physik noch genauso aus ?

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 χ !

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

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

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

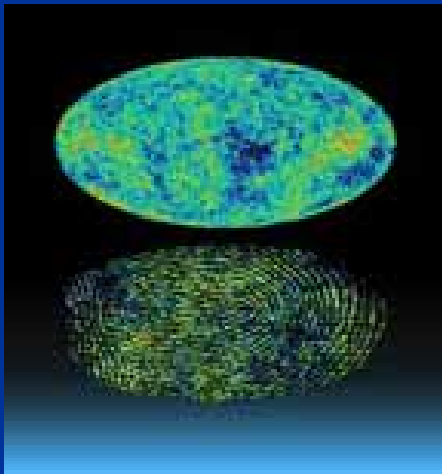
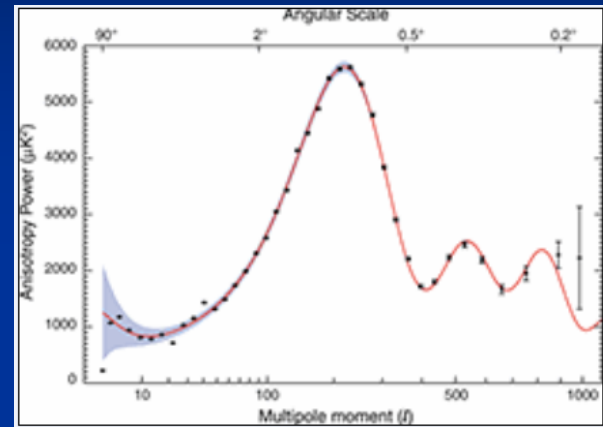
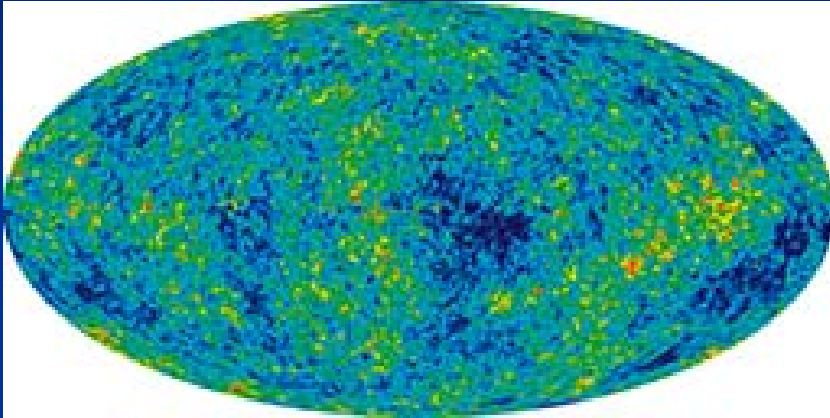
und Verletzung des Äquivalenzprinzips

differentielle Beschleunigung η

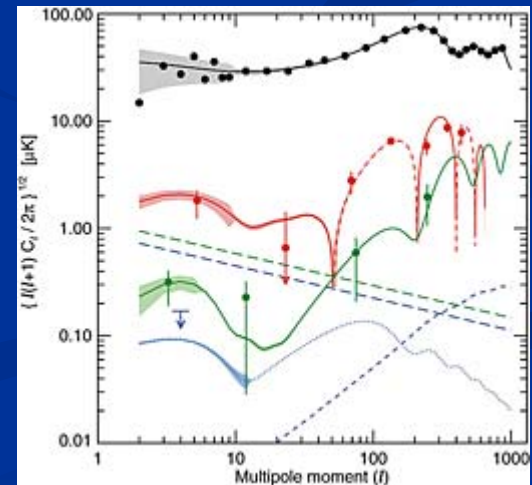
typisch : $\eta = 10^{-14}$

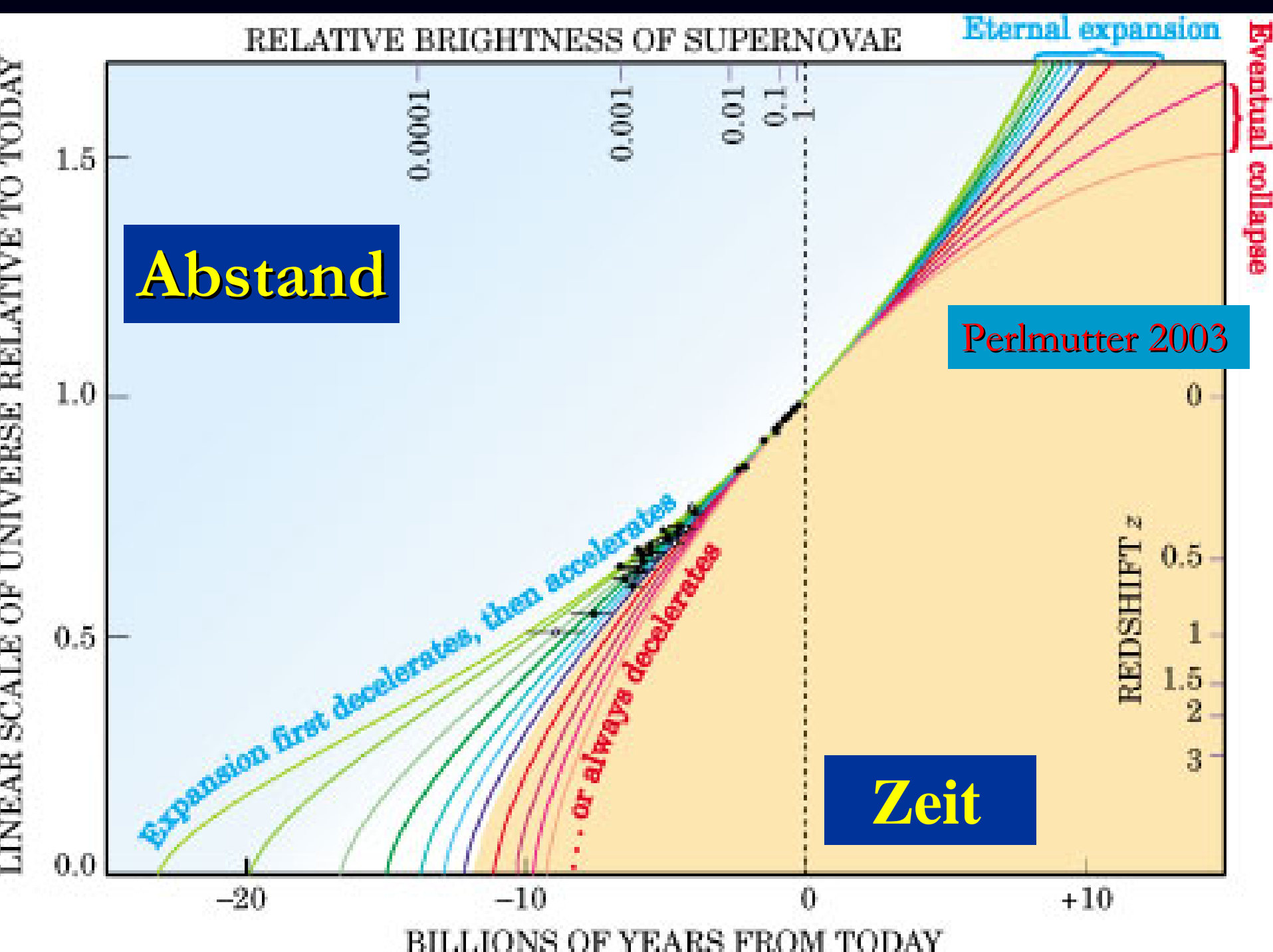
MICROSCOPE – Satteliten-Mission

WMAP 2006

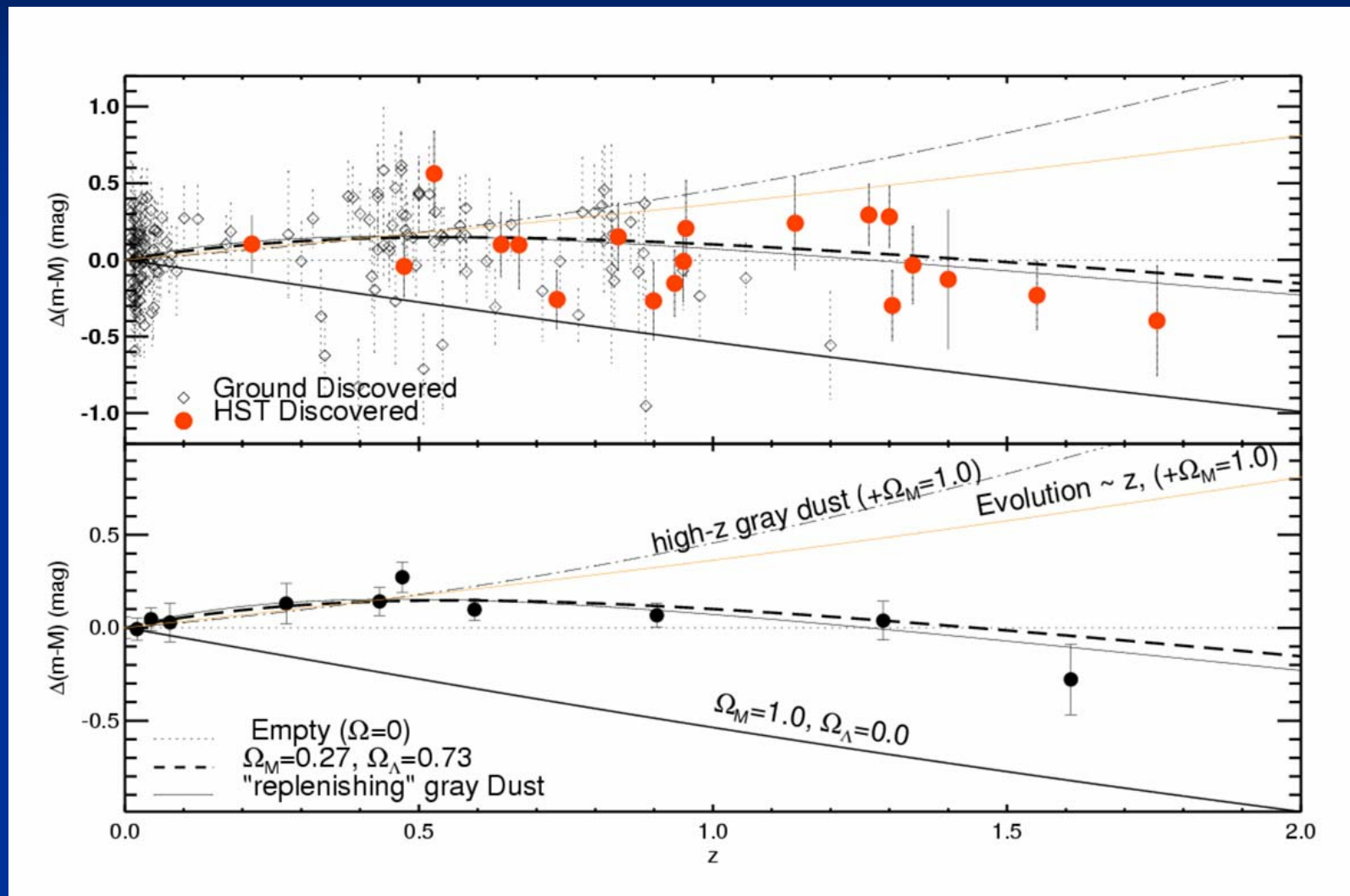


Polarisation





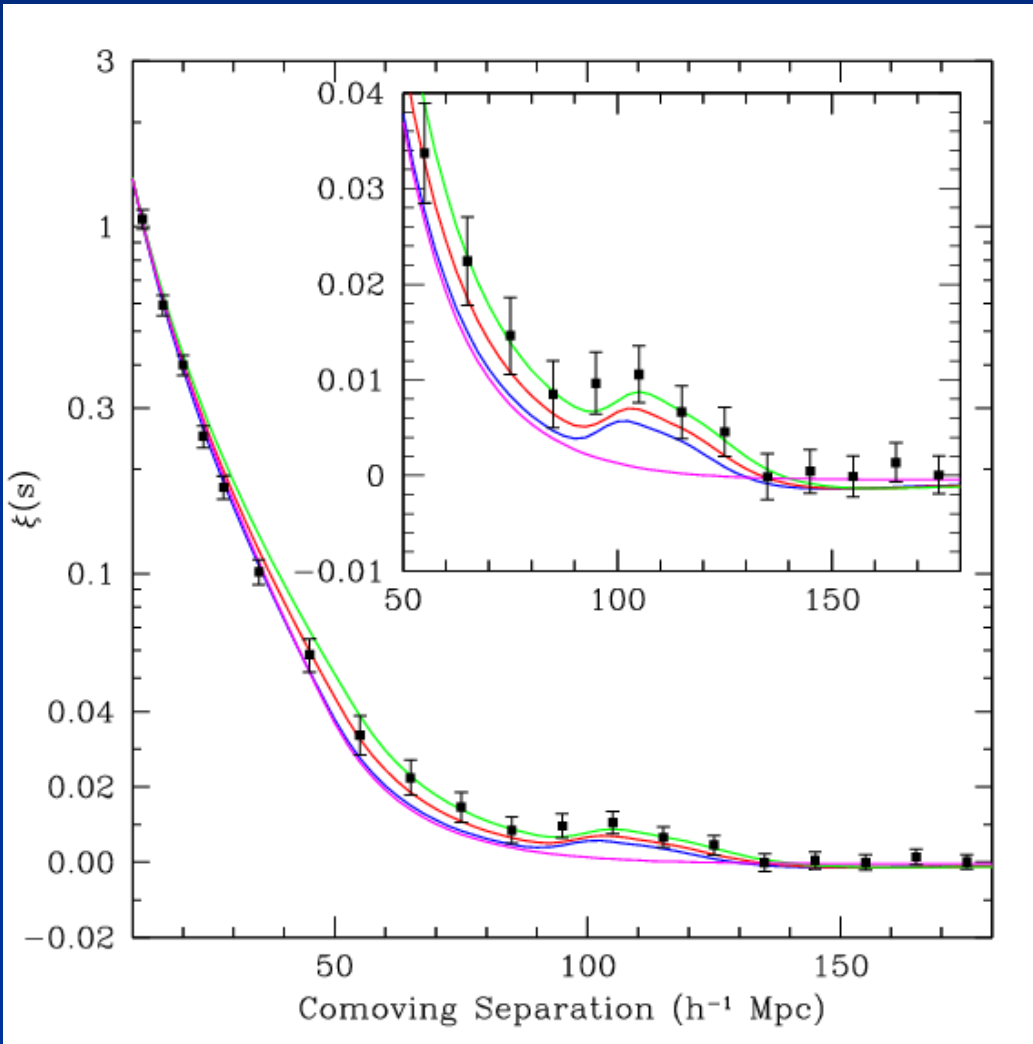
Supernova Ia Hubble-Diagramm



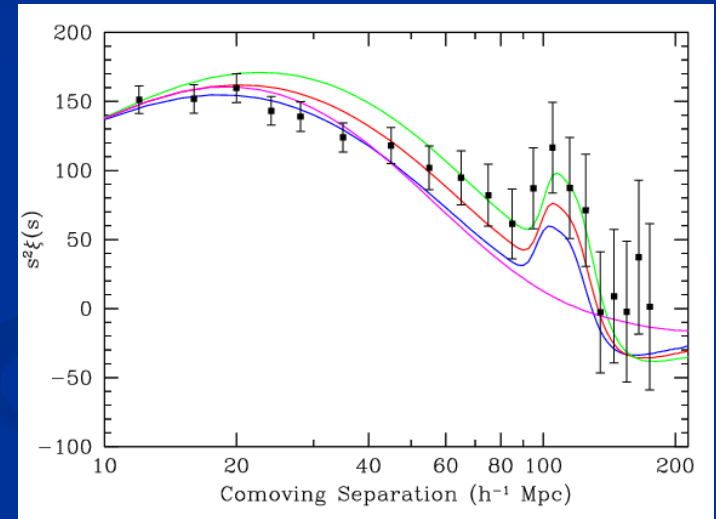
Rotverschiebung z

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

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

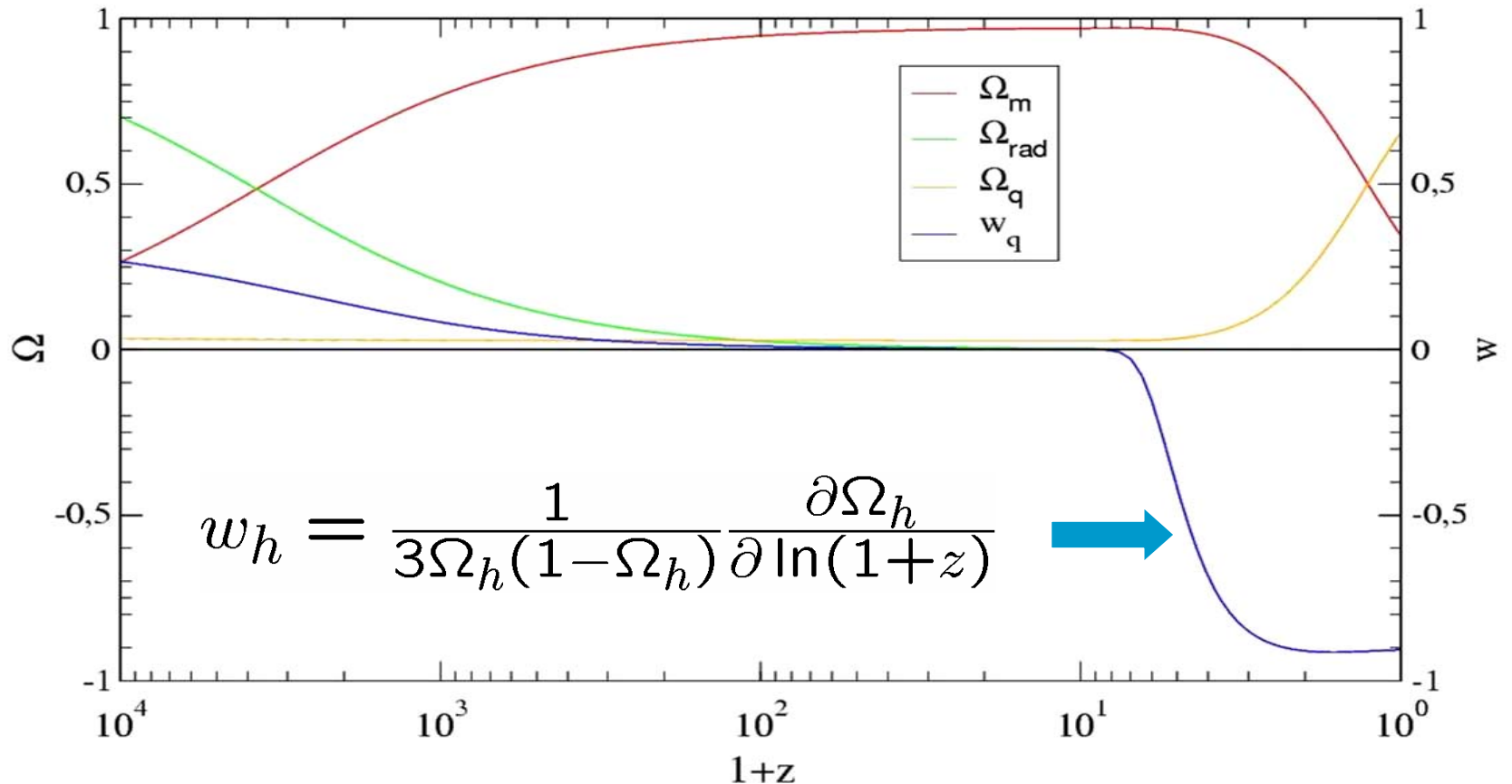
hängt von spezifischer Evolution des Skalarfelds ab

Negativer Druck

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

Negativer Druck

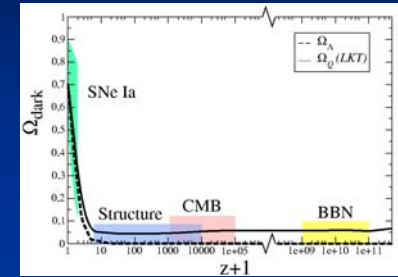
Crossover Quintessence Evolution



**Dunkle Energie
im frühen Universum :**

unter 10 %

Zunehmende Wichtigkeit der Dunklen Energie



Vorhersage:

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

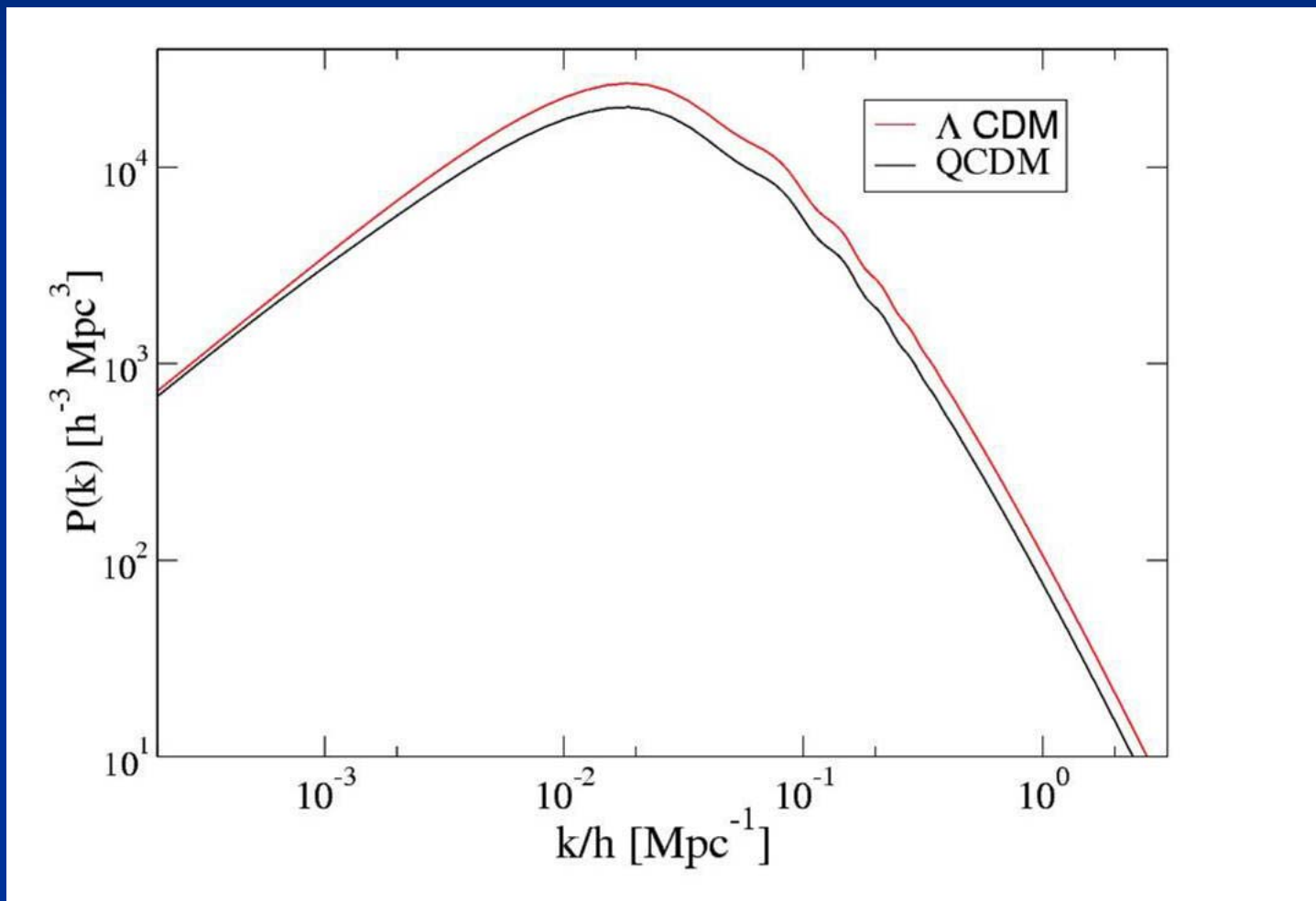
*Die Expansion
des Universums*

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, ...

