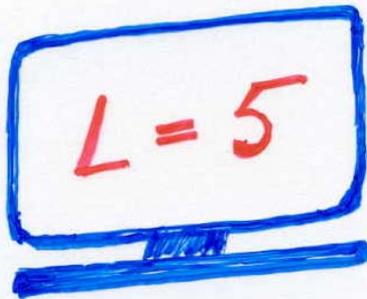


# Woher kommen Längen und Massen ?

C. Wetterich



$m$  ?  
 $L_{\text{yr}}$  ?  
 $in$  ?

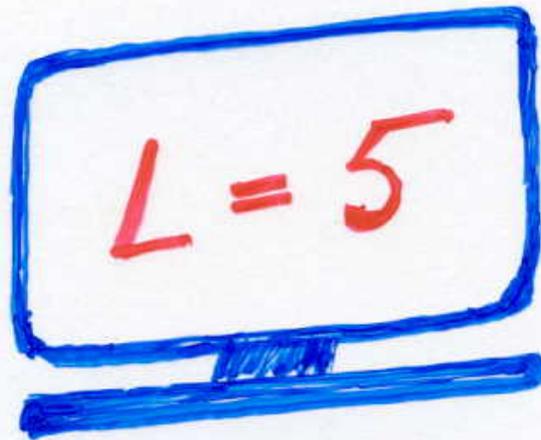
$$L = \sqrt{g} \left( -\frac{1}{2} \chi^2 R + \frac{1}{2} (\delta - 6) \partial^\mu \chi \partial_\mu \chi + V(\chi) + h \chi \bar{\psi} \psi \right)$$

# Woher kommen Längen und Massen ?

Spontane Symmetriebrechung ,

( Quantengravitation , )

Dunkle Energie

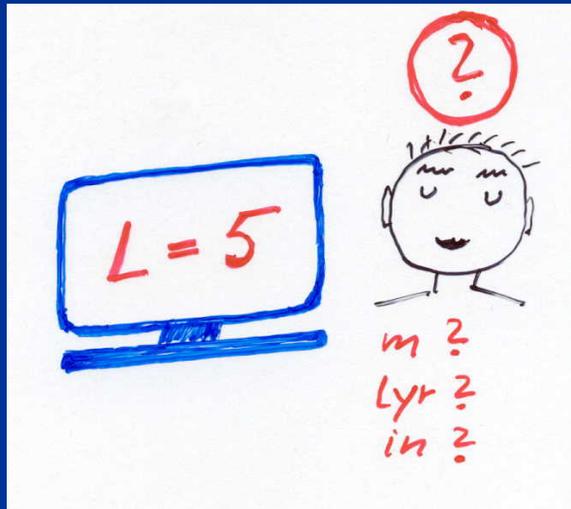
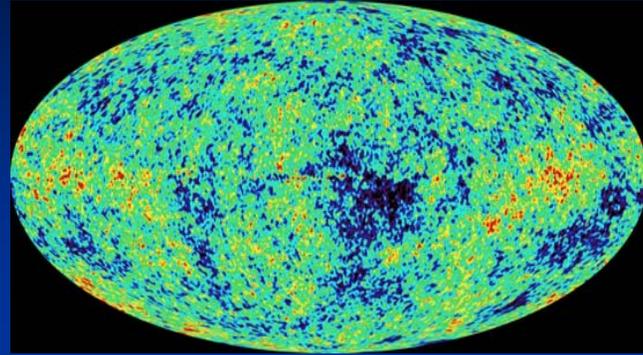


m ?

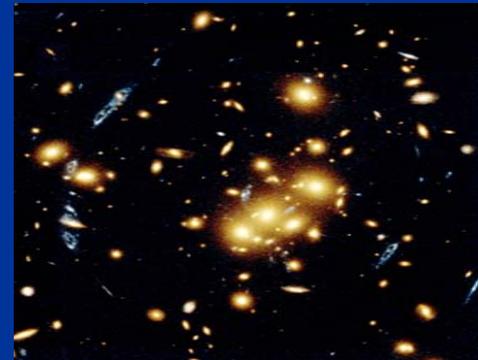
Lyr ?

in ?

$$\Omega_m + X = 1$$



$$\Omega_m : 30\%$$



$$\Omega_h : 70\%$$

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

# QED

$$\mathcal{L} = \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + i\bar{\psi}\gamma^\mu(\partial_\mu - ieA_\mu)\psi + m_e\bar{\psi}\psi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$m_e = 1$  : einziger dimensionsloser Parameter  $e$   
dann auch Proton- Masse etc.

# 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

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

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

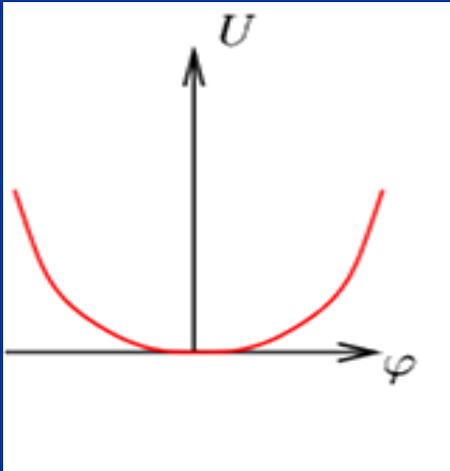
ähnlich elektrischem Feld

aber : Skalarfeld hat keine Richtung  
Skalar , nicht Vektor

# Spontane Symmetrie - Brechung

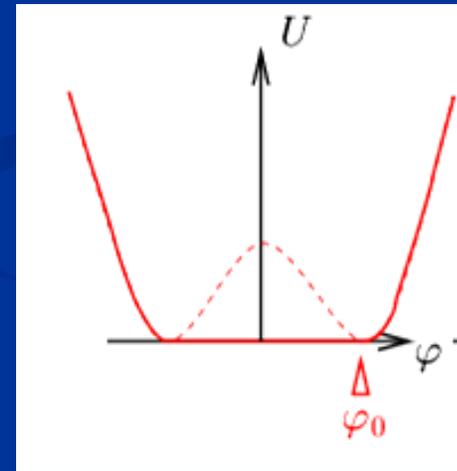
SYM

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



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

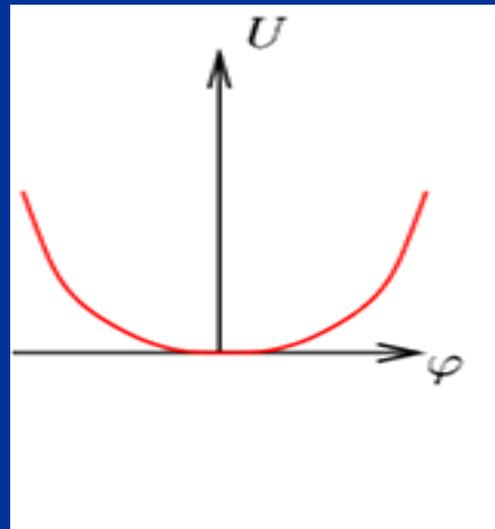
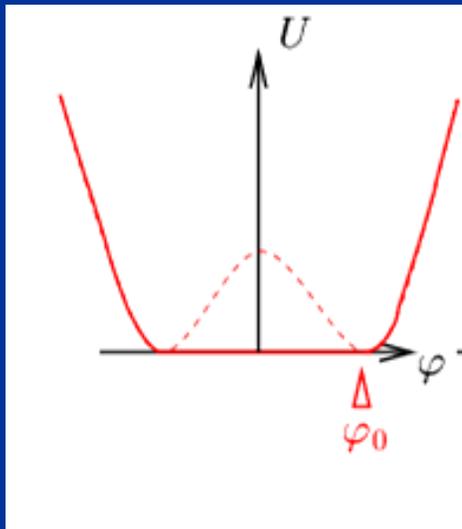
Niedrige T  
SSB

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

Hohe T  
SYM

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

hohe T :  
weniger Ordnung  
mehr Symmetrie



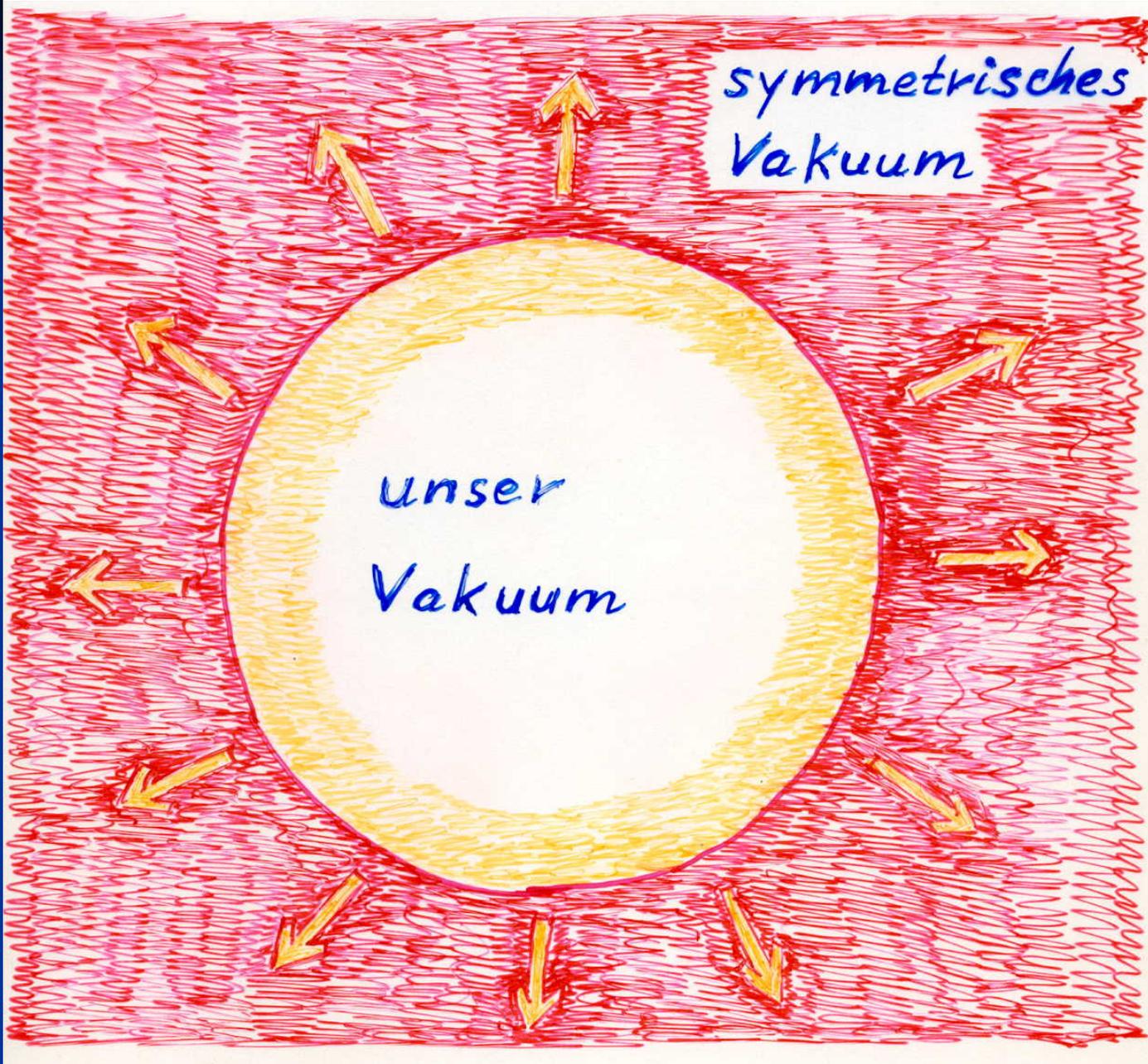
Beispiel:  
Magnete

Im heissen Plasma  
des frühen Universums :

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

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**

# 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 =  $2.3 \times 10^5$
- Meter =  $1.2 \times 10^{34}$
- Sekunde =  $3.7 \times 10^{42}$
- Alter des Universums (  $13.7 \times 10^9 \text{ yr}$  ) =  $1.6 \times 10^{60}$
- Energiedichte des Universums :  $\rho = 10^{-120}$

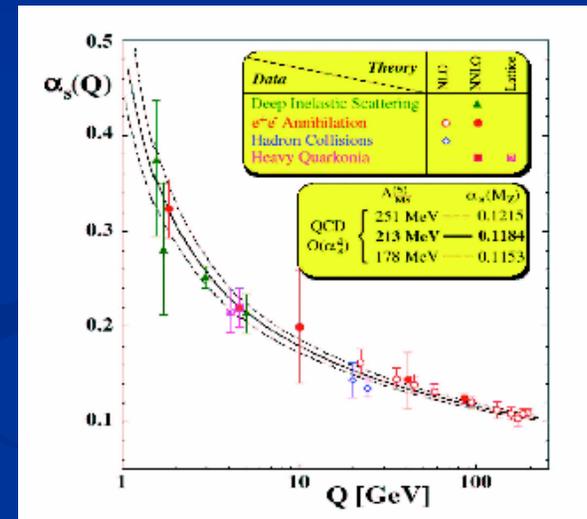
# Kleine Parameter – grosse Rätsel

# Laufende Kopplung : QCD

Effektive Eichkopplung hängt von Impulsskala  $\mu$  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  $\mu$  , bei dem Kopplung groß wird
- Massenskala  $\Lambda_{\text{QCD}}$
- 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  $\alpha_0$  , winziges  $M_{\text{Proton}}$  !**

# Trick der Natur

Quanten - Fluktuationen erzeugen  
Massen-Skalen durch  
laufende dimensionslose Kopplungen

Dilatations - Anomalie

**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

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

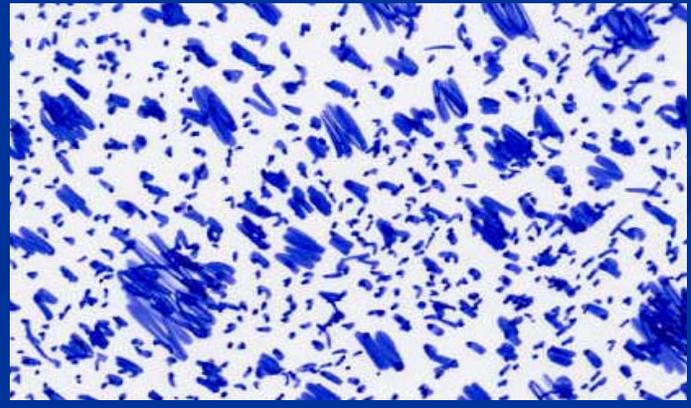
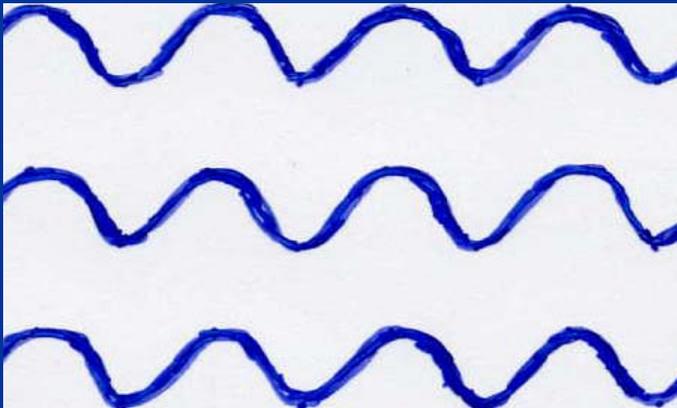
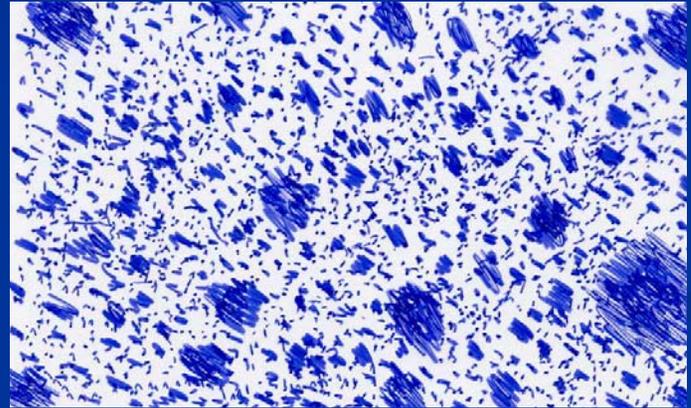
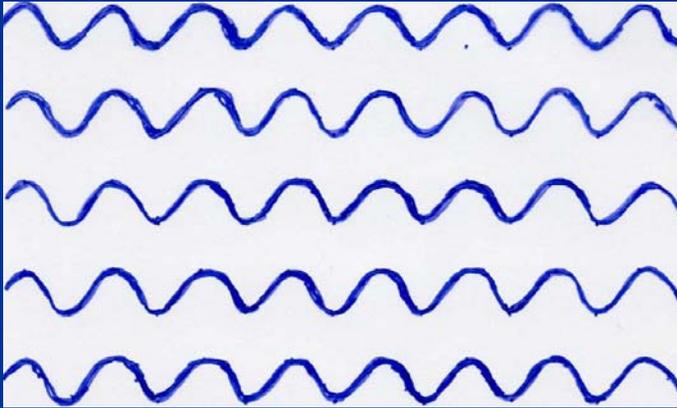
Sieht die Physik noch genauso aus ?

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

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

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

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

■  $V/M_{\text{planck}}^4 \sim \chi^{-A}$  :  
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

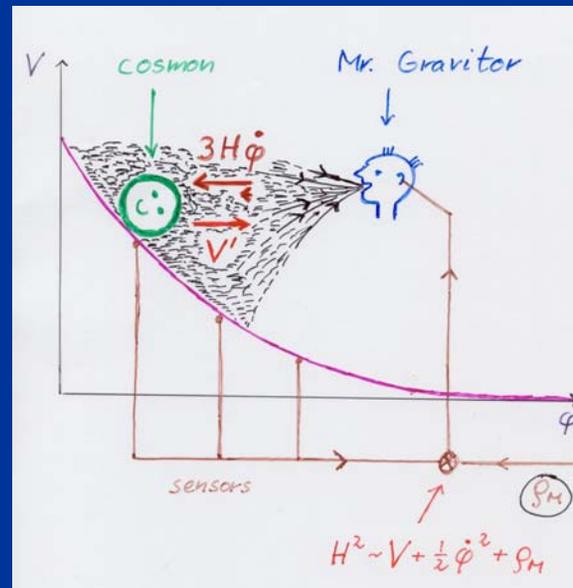
$$\rho = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2$$

- Dynamische Dunkle Energie !

# 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

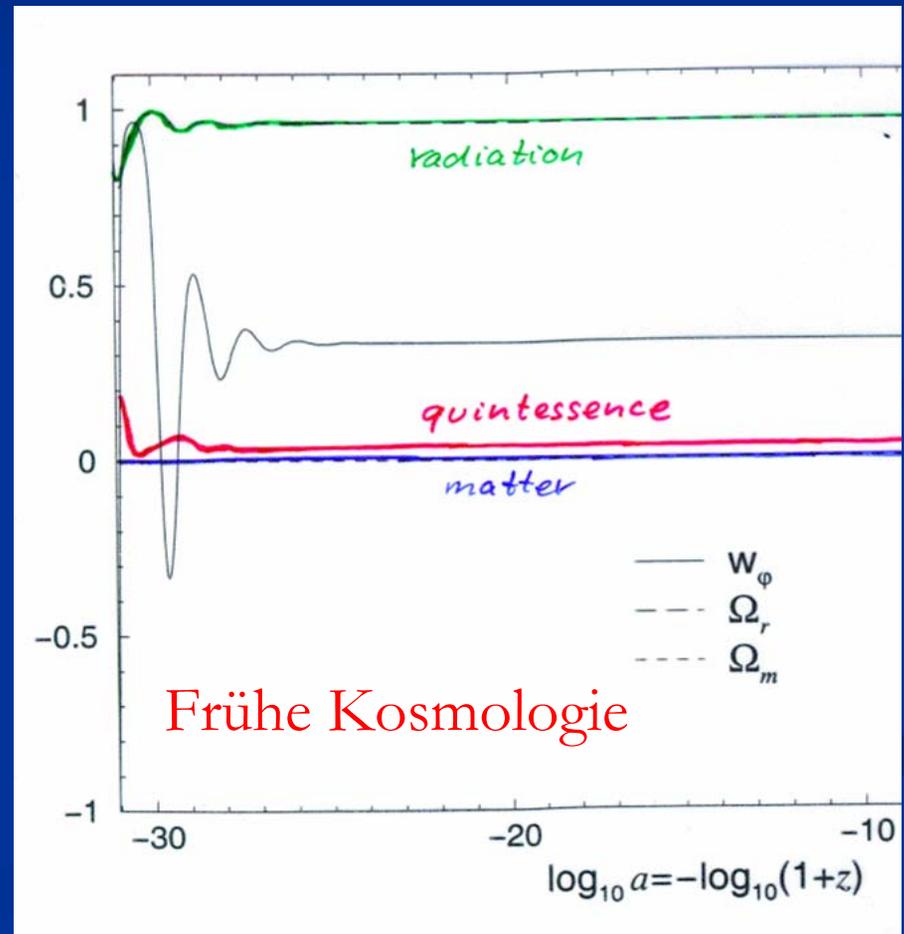
Lösung unabhängig von  
Anfangsbedingungen

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

$\varphi \sim \ln(t)$

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

Details hängen von  $V(\varphi)$   
ab



**Vorhersage (1987):**

**homogenene Dunkle Energie  
beeinflusst heutige Kosmologie**

**zeitlich veränderlich und  
von der gleichen Größenordnung wie  
Dunkle Materie**

Ursprüngliche Modelle stimmen nicht mit  
heutigen Beobachtungen überein  
.... Modifizierungen

# Woraus besteht unser Universum ?



Quintessenz !

Feuer , Luft,  
Wasser,  
Erde !

# Kritische Dichte

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

Kritische Energiedichte des  
Universums

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

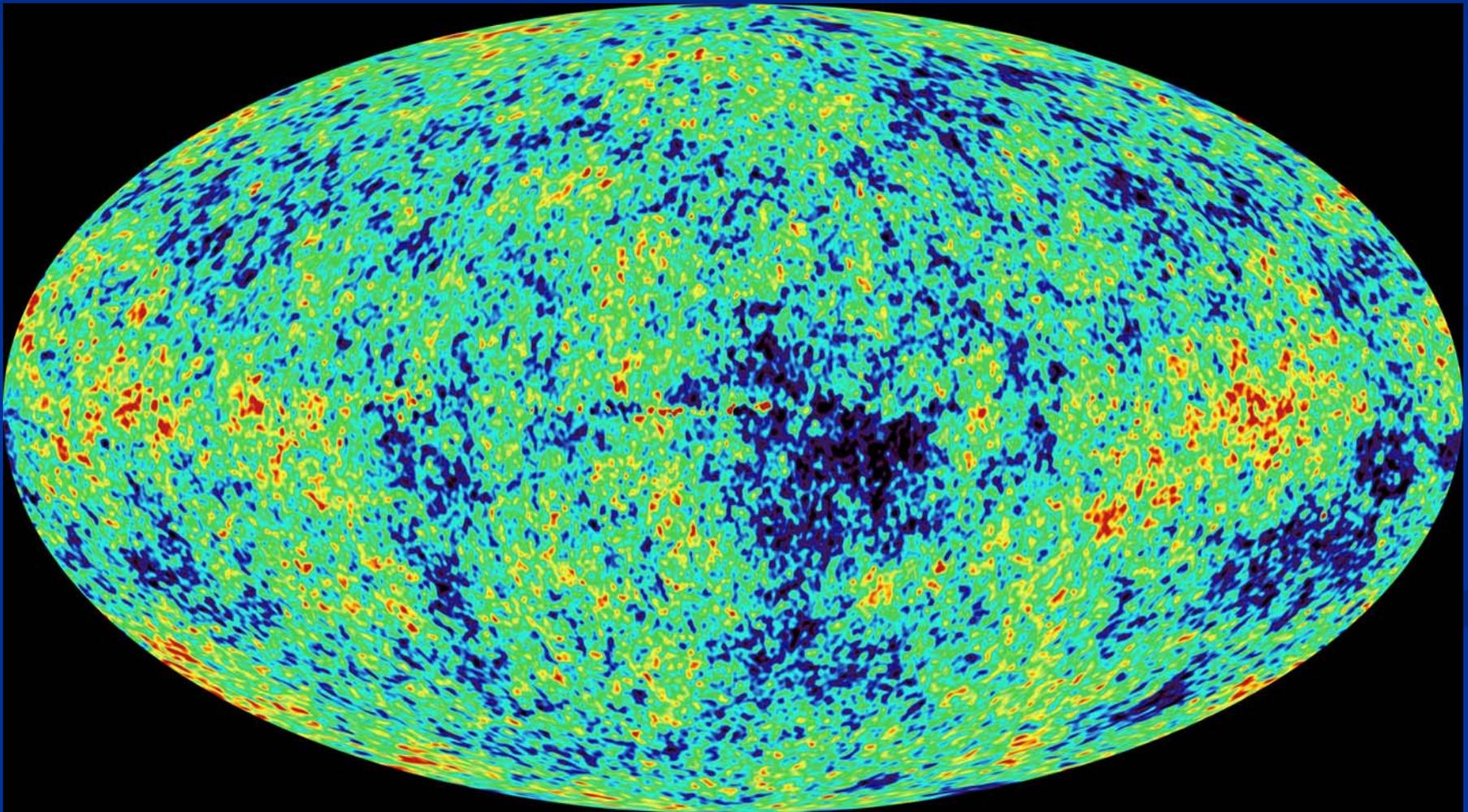
$H$  : Hubble Parameter  $H = \dot{a}/a$  )

- $\Omega_b = \rho_b / \rho_c$

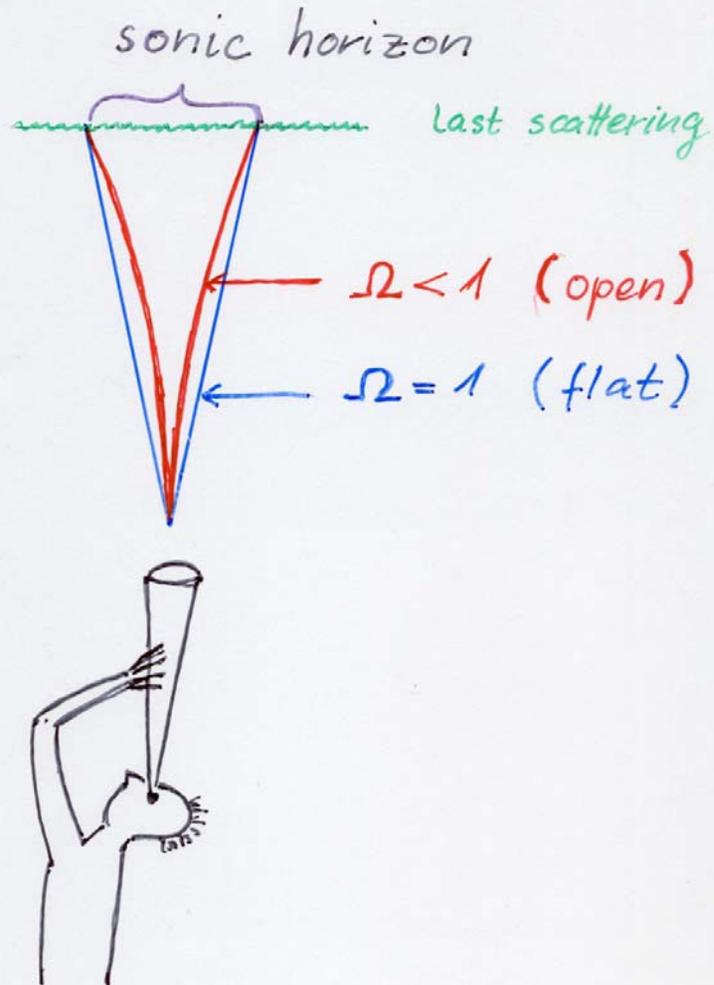
Anteil der Baryonen an der (kritischen)  
Energiedichte

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

Foto des  
Urknalls

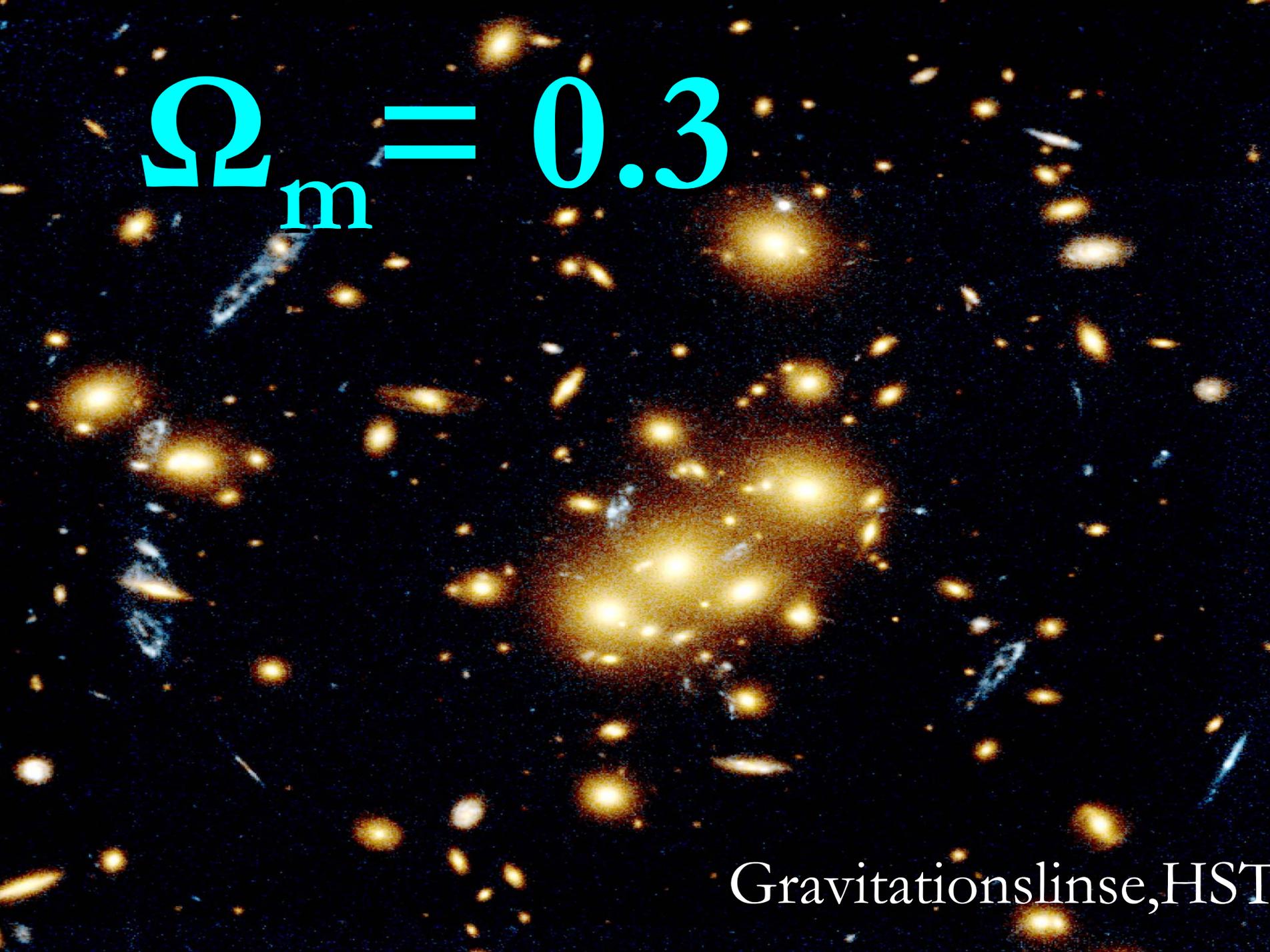


$$\Omega_{\text{tot}} = 1$$



# Dunkle Materie

- $\Omega_m = 0.27$  “Materie” insgesamt
- Die meiste Materie ist dunkel !
- Bisher nur durch Gravitation spürbar
- Alles was klumpt!  Gravitationspotential


$$\Omega_m = 0.3$$

Gravitationslinse, HST

# Dunkle Energie

$$\Omega_m + X = 1$$

$$\Omega_m : 30\%$$

$$\Omega_h : 70\%$$

Dunkle Energie

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

Dunkle Energie :

homogen verteilt

# Zusammensetzung des Universums

$$\Omega_b = 0.045$$

sichtbar

klumpt

$$\Omega_{dm} = 0.225$$

unsichtbar

klumpt

$$\Omega_h = 0.73$$

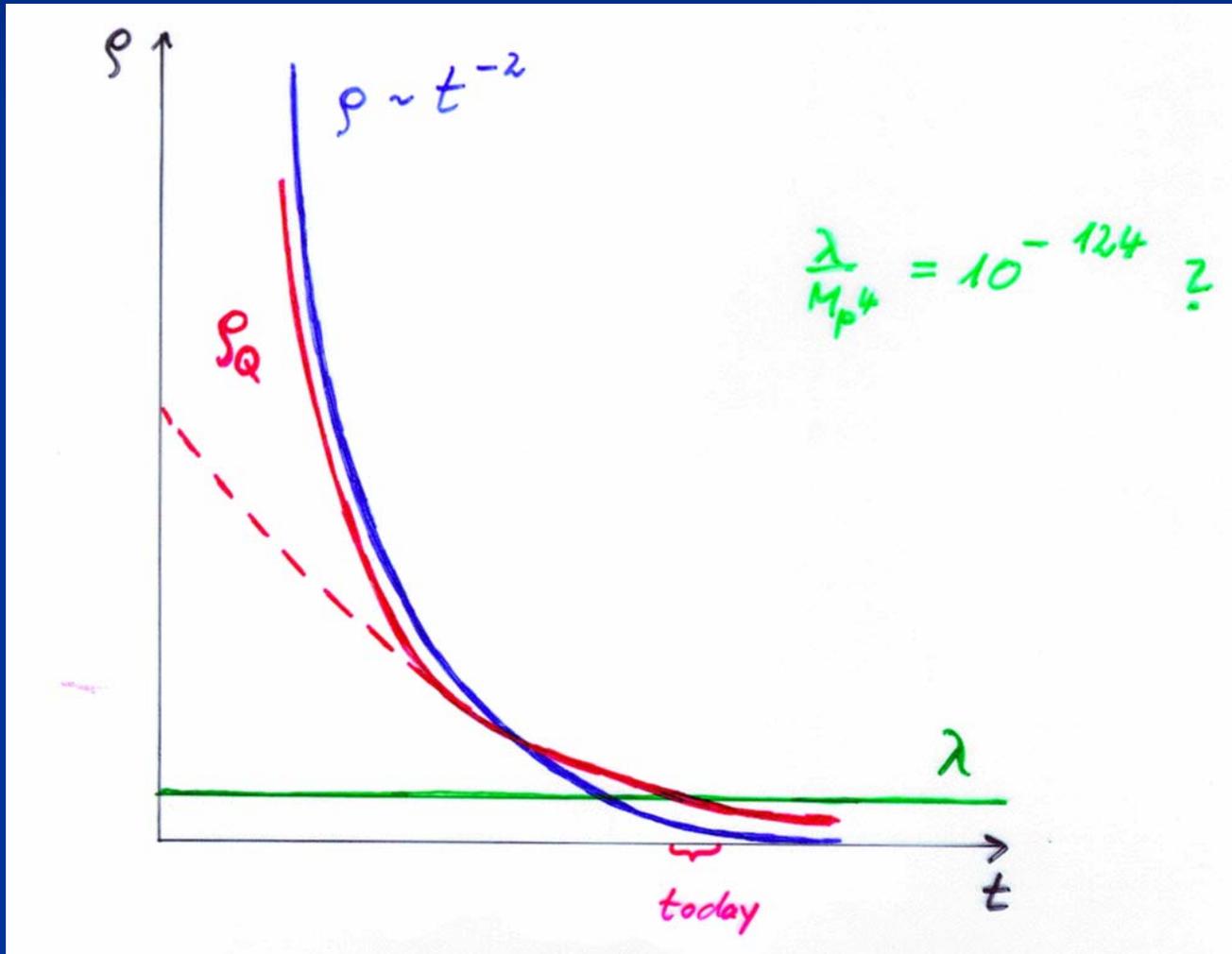
unsichtbar

homogen

**Ist Dunkle Energie  
statisch oder dynamisch ?**

Kosm. Konst.  
statisch

Quintessenz  
dynamisch



# Quintessenz

Dynamische dunkle Energie ,  
vermittelt durch Skalarfeld

(Kosmon)

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

24.9.87

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

20.10.87

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

Alter des Universums in Gravitationseinheiten :  $1.6 \cdot 10^{60}$

# 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

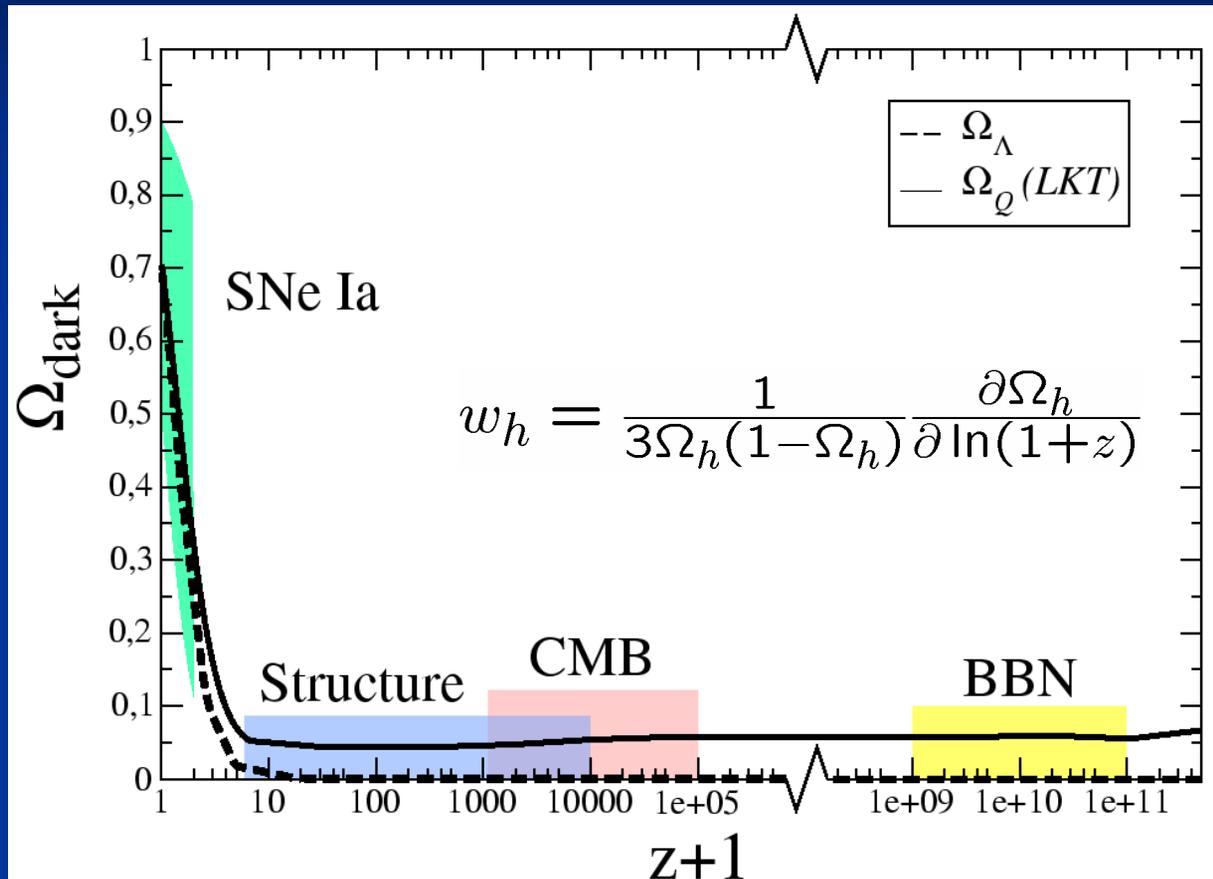
Gleiche Erklärung für dunkle Energie ?

# Frühe Dunkle Energie

mit

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

# Zeitabhängigkeit der dunklen Energie



$w=p/q$

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

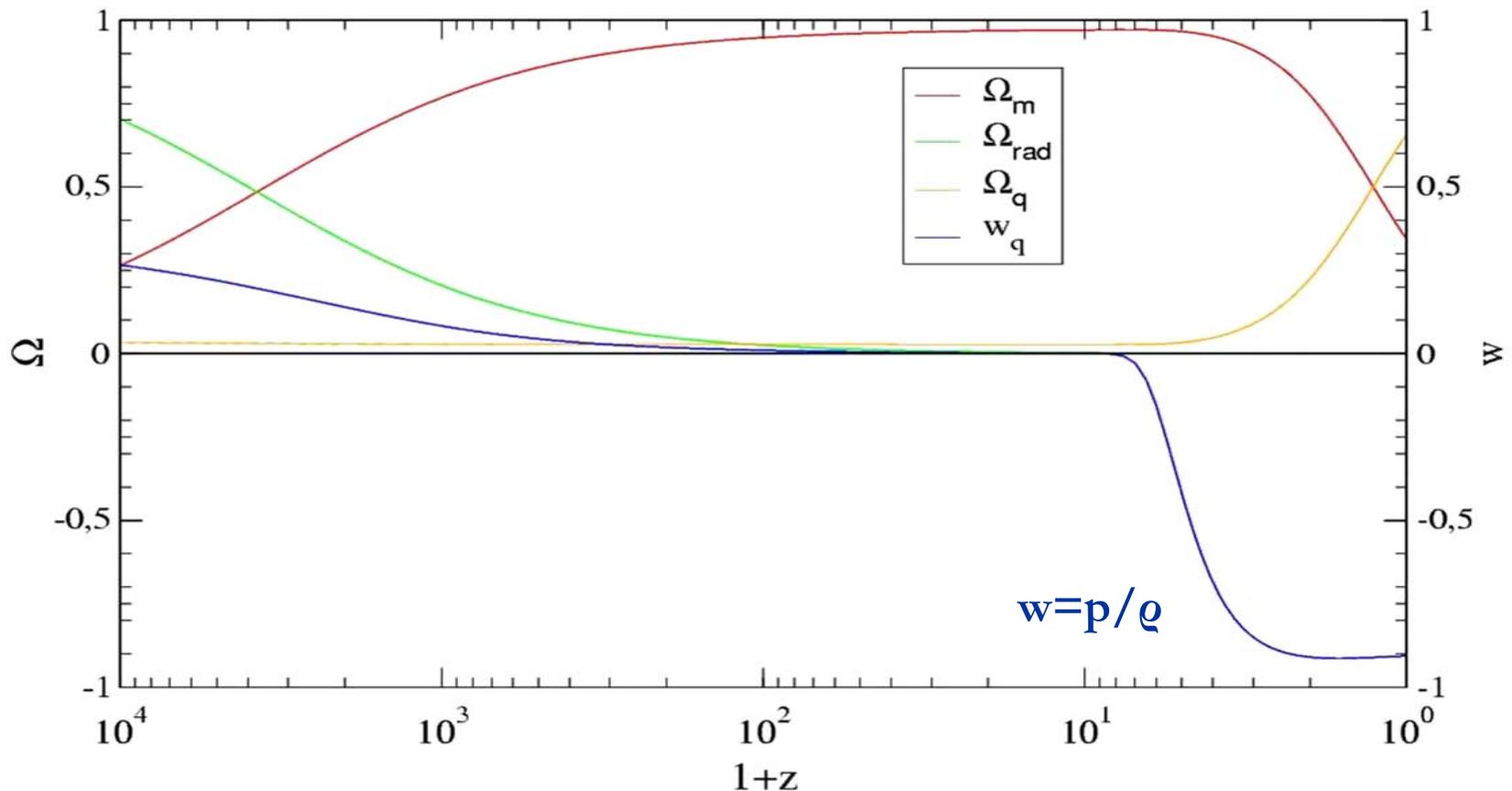
M.Doran,...

**Dunkle Energie**  
**im frühen Universum :**

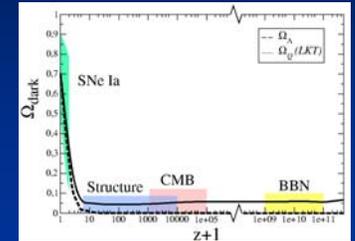
**unter 10 %**

# Realistische Modelle der Dunklen Energie: Quintessenz wird heute wichtig

Crossover Quintessence Evolution



# Zunehmende Wichtigkeit der Dunklen Energie



Vorhersage:

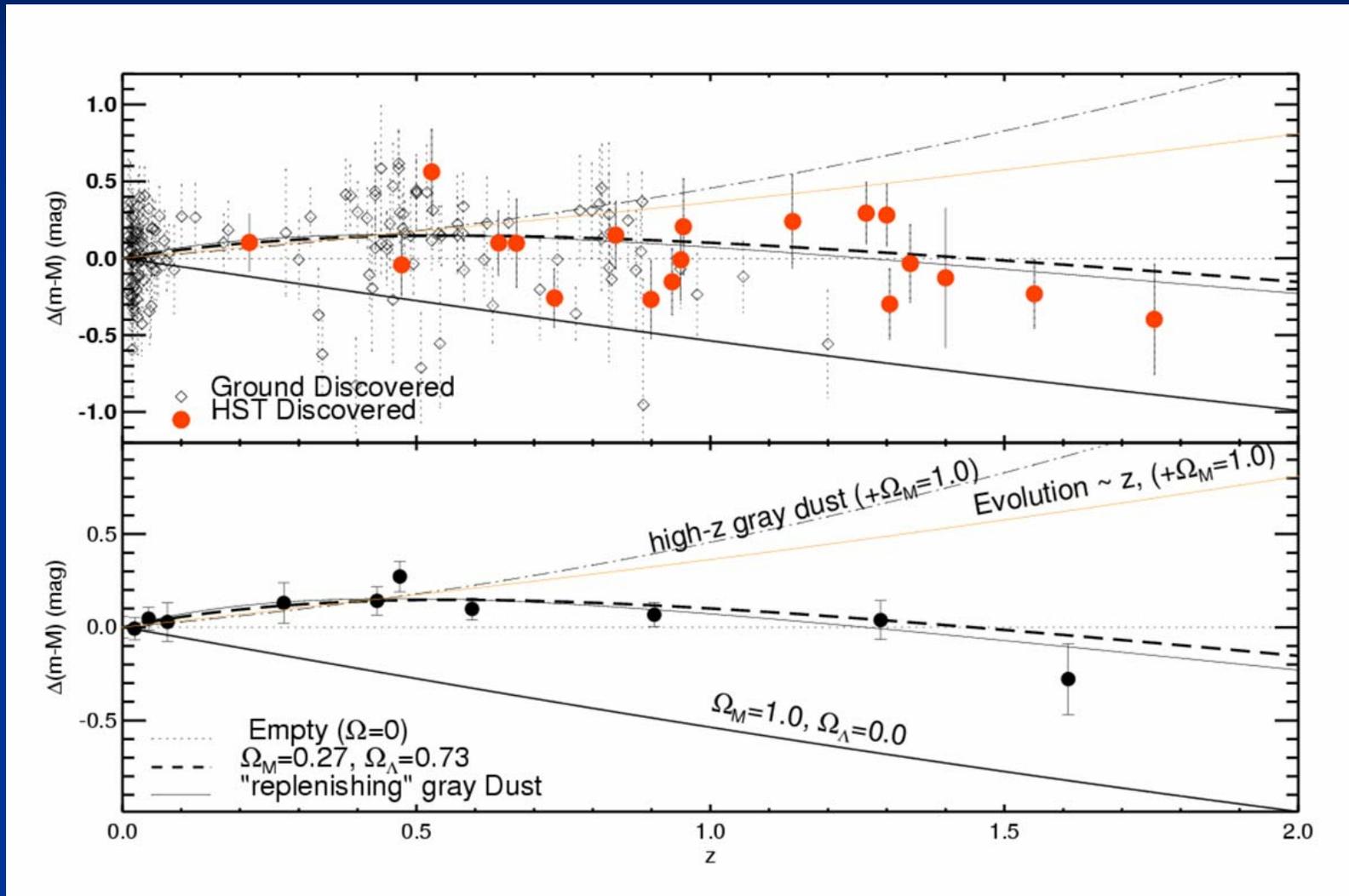
$$w_h = \frac{1}{3\Omega_h(1-\Omega_h)} \frac{\partial\Omega_h}{\partial\ln(1+z)}$$

*Die Expansion  
des Universums*

*beschleunigt sich heute !*

$$w_h < -1/3$$

# Supernova Ia Hubble-Diagramm



Rotverschiebung  $z$

Riess et al. 2004

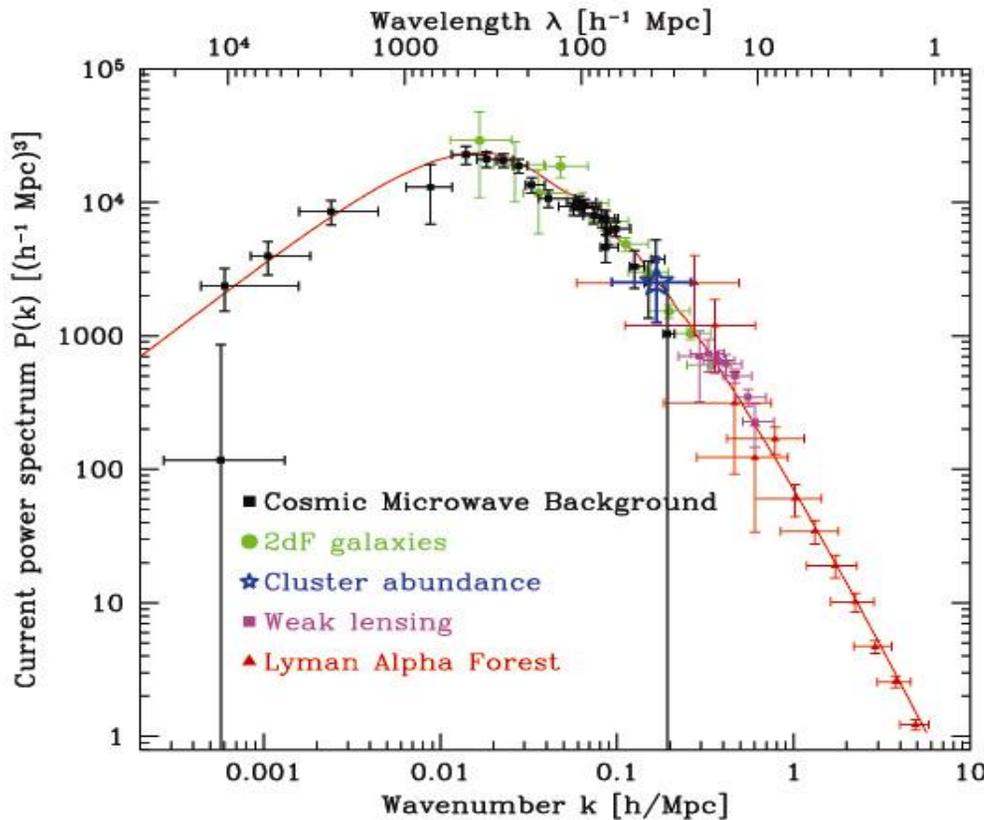
# Strukturbildung

Aus winzigen Anisotropien wachsen die  
Strukturen des Universums

Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen

Ein primordiales Fluktuationsspektrum beschreibt  
alle Korrelationsfunktionen !

# Strukturbildung : Fluktuationsspektrum



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

**Dunkle Energie :**

**Konsistentes Bild der Kosmologie**

**Eine neue  
“fundamentale”  
Wechselwirkung ?**

# Kosmon

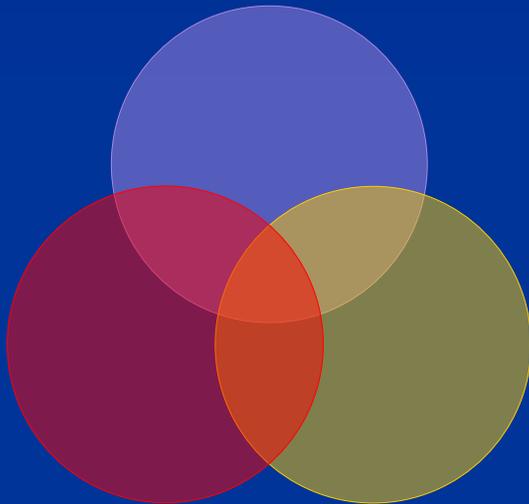
- *Skalarfeld ändert seinen Wert auch in der heutigen kosmologischen Entwicklung*
- *Potenzielle und kinetische Energie des Kosmons tragen zur Energiedichte des Universums bei*
- *Zeitabhängige dunkle Energie :*  
 *$\rho_b(t)$  fällt mit der Zeit !*

# Kosmon

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

# “Fundamentale” Wechselwirkungen

Starke, elektromagnetische, schwache  
Wechselwirkung



Gravitation

Kosmodynamik

Auf  
astronomischen  
Skalen:

Graviton

+

Kosmon

# 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

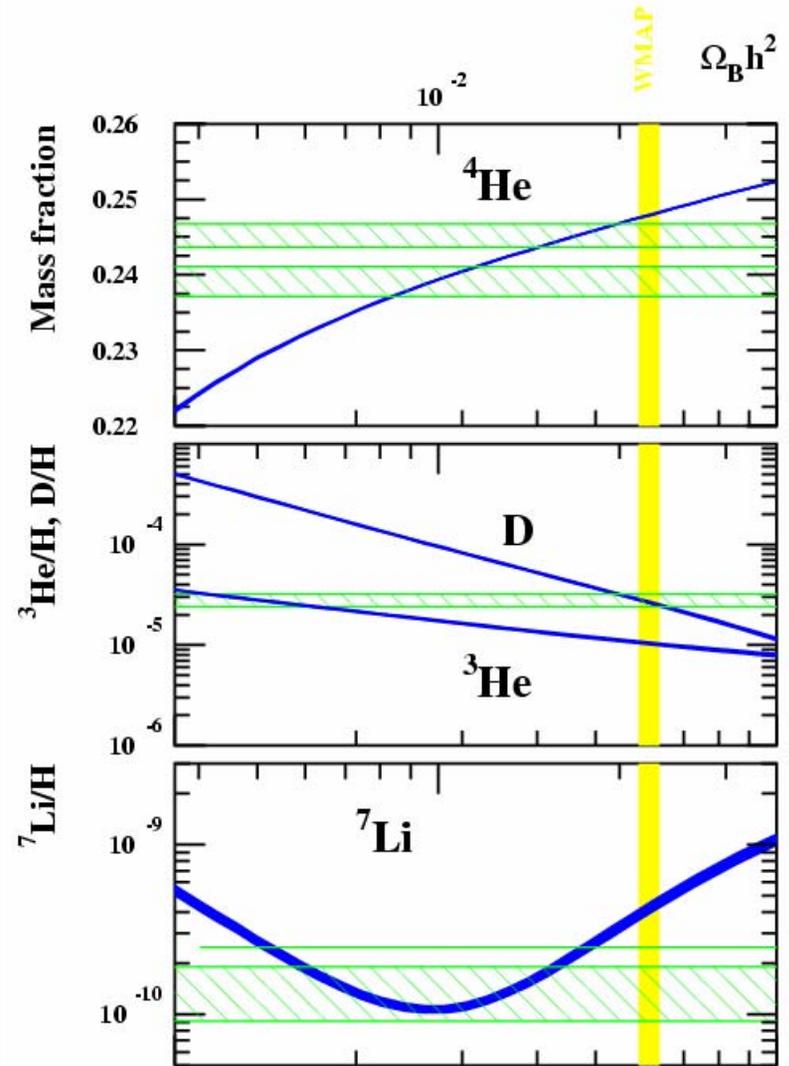
# Quintessenz und Zeitabhängigkeit der “fundamentalen Konstanten”

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

ähnlich Higgsfeld in schwacher Wechselwirkung

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

Primordiale  
Häufigkeiten der  
leichten Elemente  
aus der  
Nukleosynthese



**wenn** jetzige Messung von  ${}^4\text{He}$  bestätigt:

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

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

Zeitvariation der Kopplungskonstanten  
ist winzig –

wäre aber von grosser Bedeutung !

**Mögliches Signal für Quintessenz**

# Πάντα ρεῖ

*Alles fließt*

Kommt der Äther,  
in Form des Kosmonfelds, wieder zurück?

# 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

# “Fünfte Kraft”

- vermittelt durch skalares Feld

R.Peccei, J.Sola, C.Wetterich, Phys.Lett.B195,183(1987)

- Kopplungsstärke schwächer als Gravitation  
( nicht-renormierbare Wechselwirkung  $\sim M^{-2}$  )
- Abhängigkeit von der Zusammensetzung



scheinbare Verletzung des Äquivalenzprinzips

# Verletzung des Äquivalenzprinzips

Verschiedene Kopplung  
des Kosmons an  
Proton und Neutron

Differentielle  
Beschleunigung

Verletzung des  
Äquivalenzprinzips



*Verknüpfung zwischen Zeitabhängigkeit von  $\alpha$*

*und Verletzung des Äquivalenzprinzips*

differentielle Beschleunigung  $\eta$

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

**MICROSCOPE – Satteliten-Mission**

# Zusammenfassung

- $\Omega_h = 0.7$
- $Q/\Lambda$  : dynamische und statische dunkle Energie unterscheidbar
- $Q$  : zeitlich veränderliche “fundamentale Kopplungen”, Verletzung des Äquivalenzprinzips sind möglich

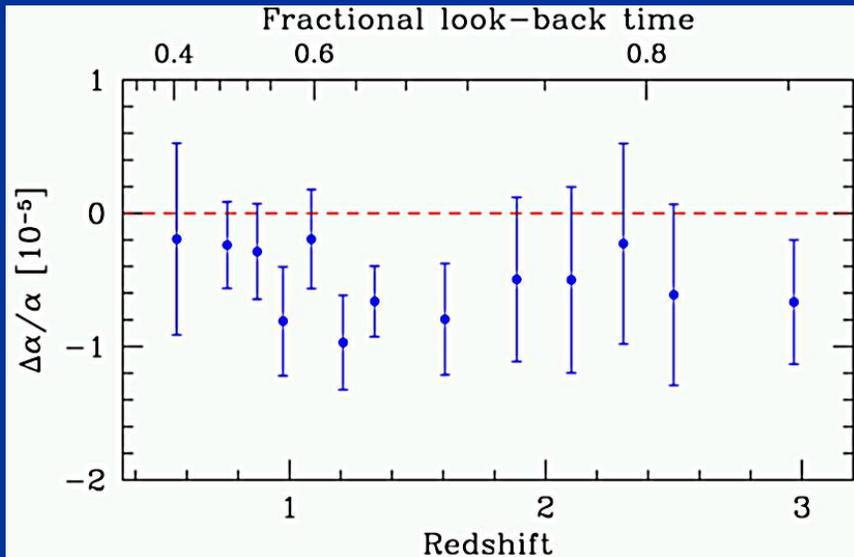
Noch viele offene Fragen ????



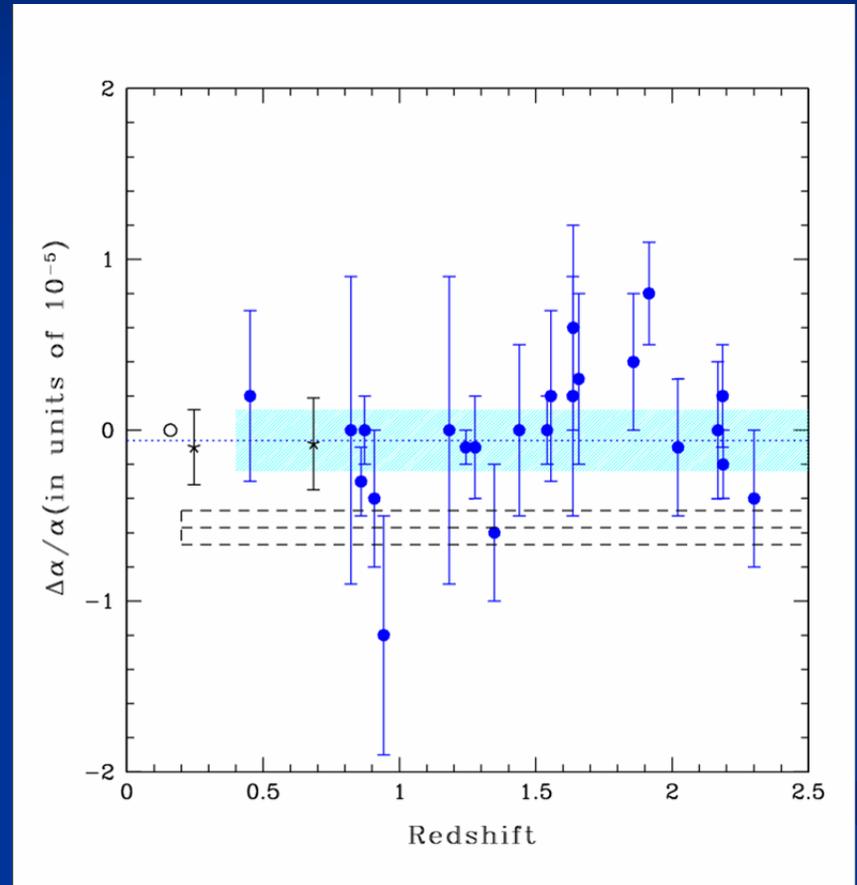


Ende ? nein ! Institutsfest !

# Variation der Feinstrukturkonstanten als Funktion der Rotverschiebung



Webb et al



Srianand et al

# Variation der Feinstrukturkonstanten

Drei unabhängige Datensätze von Keck/HIRES

$$\Delta\alpha/\alpha = -0.54 (12) 10^{-5}$$

Murphy, Webb, Flammbaum, june 2003

VLT

$$\Delta\alpha/\alpha = -0.06 (6) 10^{-5}$$

Srianand, Chand, Petitjean, Aracil, feb.2004

$z \approx 2$

# Crossover Quintessenz und Zeitvariation fundamentaler “Konstanten”

Obergrenzen für relative Variation der  
Feinstrukturkonstanten

- Oklo natürlicher Reaktor  $< 10^{-7}$   $z=0.13$
- Meteoriten ( Re-Zerfall )  $< 3 \cdot 10^{-7}$   $z=0.45$
- Crossover Quintessenz verträglich mit QSO  
und Obergrenzen !

# 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