

Woher kommen Längen und Massen ?

C. Wetterich



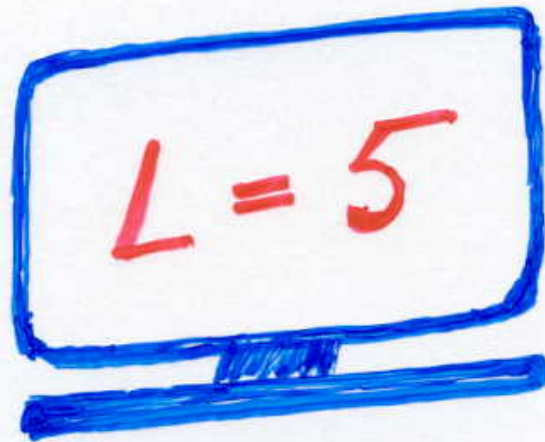
$$L = \sqrt{g} \left(-\frac{1}{2} \chi^2 R + \frac{1}{2} (\delta - 6) \partial^\mu \chi \partial_\mu \chi + V(\chi) + h \chi \bar{\psi} \psi \right)$$

Woher kommen Längen und Massen ?

Spontane Symmetriebrechung ,

(Quantengravitation ,)

Dunkle Energie

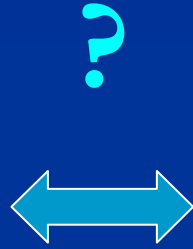
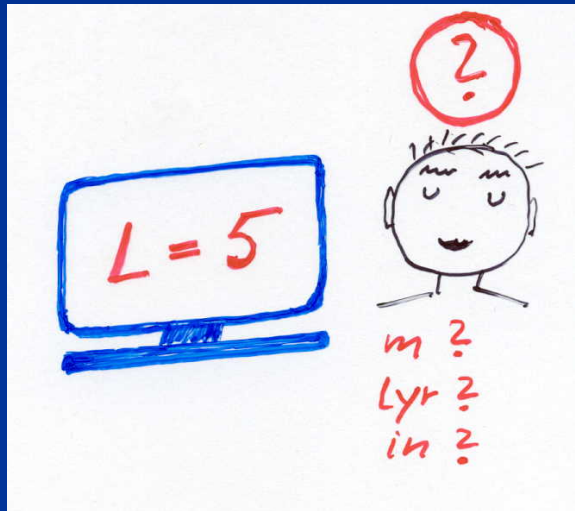
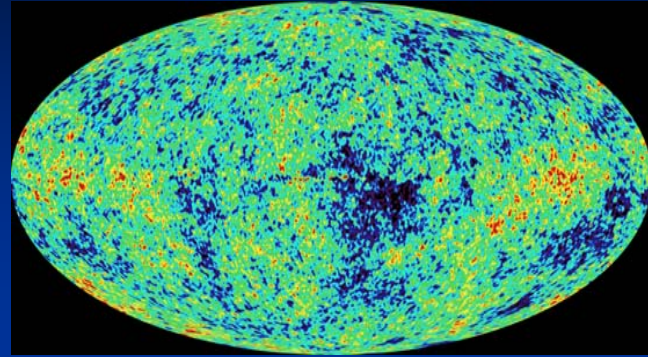


m ?

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 φ (Higgs Skalar)
- Für Elektron , Quarks , W- und Z- Bosonen gilt

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

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

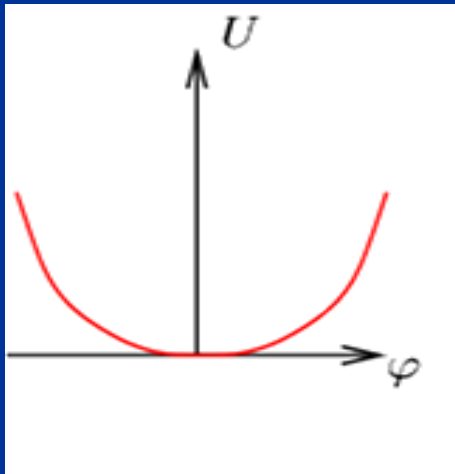
ähnlich elektrischem Feld

aber : Skalarfeld hat keine Richtung
Skalar , nicht Vektor

Spontane Symmetrie - Brechung

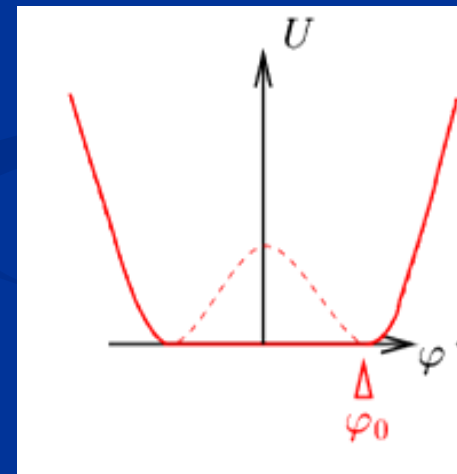
SYM

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



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

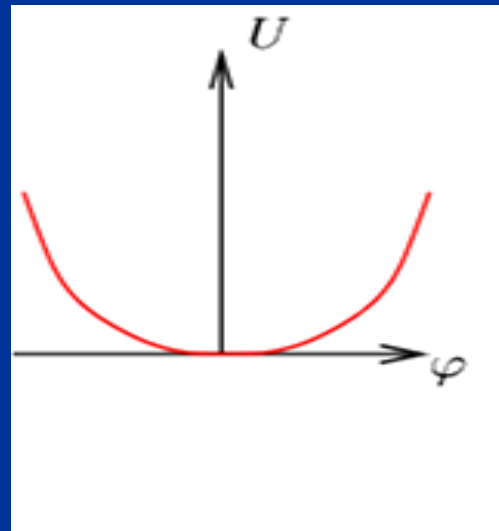
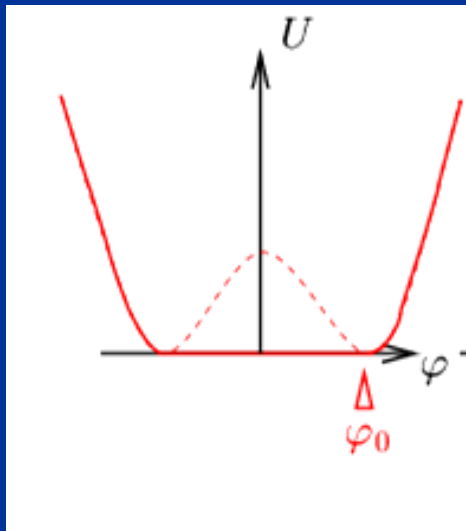
Niedrige T
SSB

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

Hohe T
SYM

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

hohe T :
weniger Ordnung
mehr Symmetrie



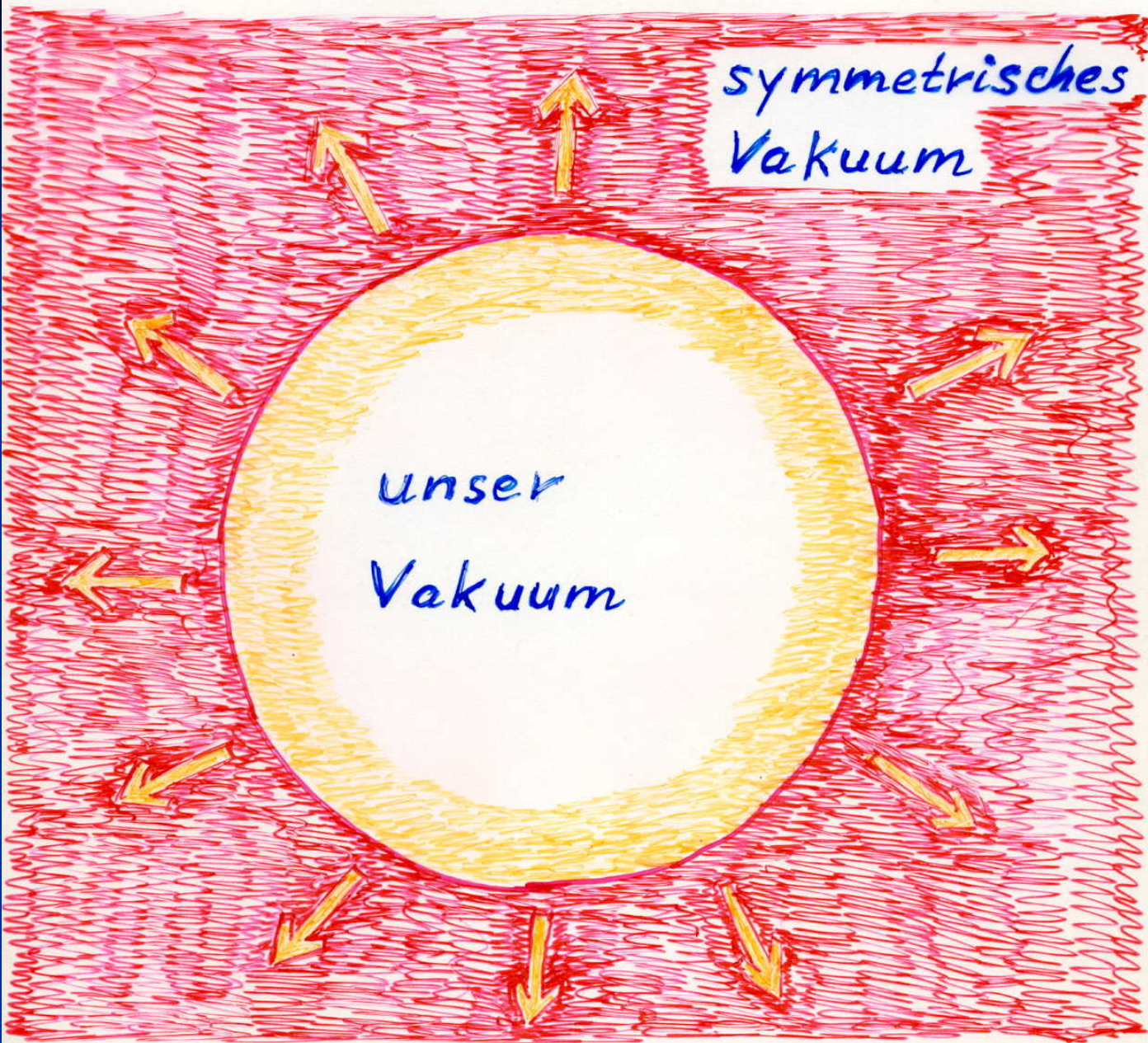
Beispiel:
Magnete

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 = 2.3×10^5
- 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 : $\rho = 10^{-120}$

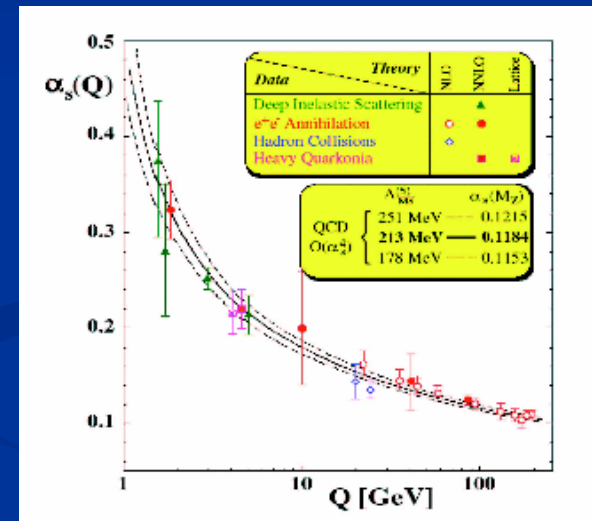
Kleine Parameter – grosse Rätsel

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

**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

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

- Konforme Symmetrie für $\delta=0$

Dilatations - Symmetrie

Reskalieren der Längenskalen

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

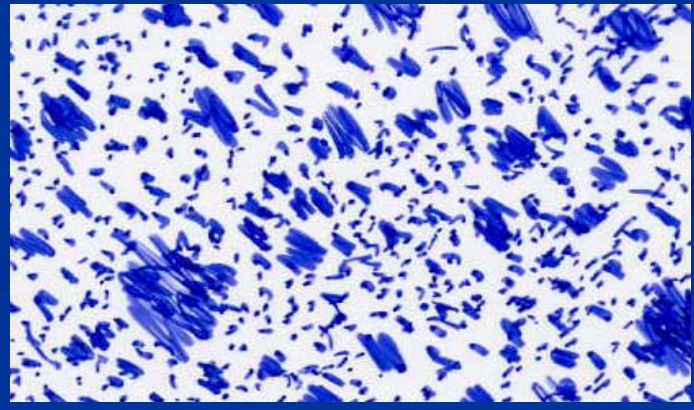
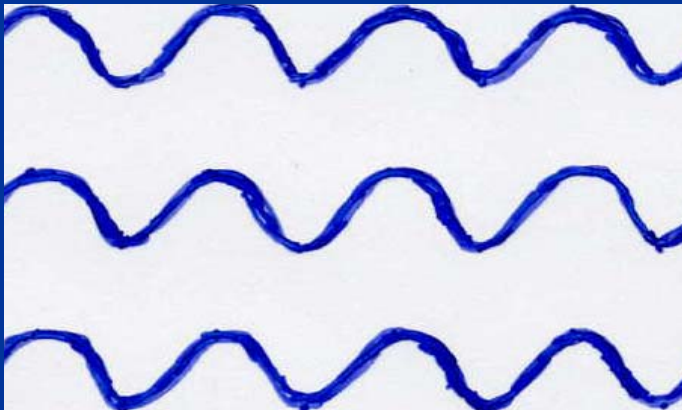
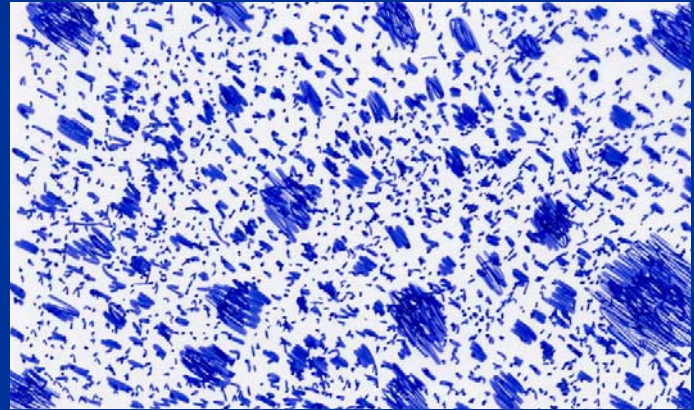
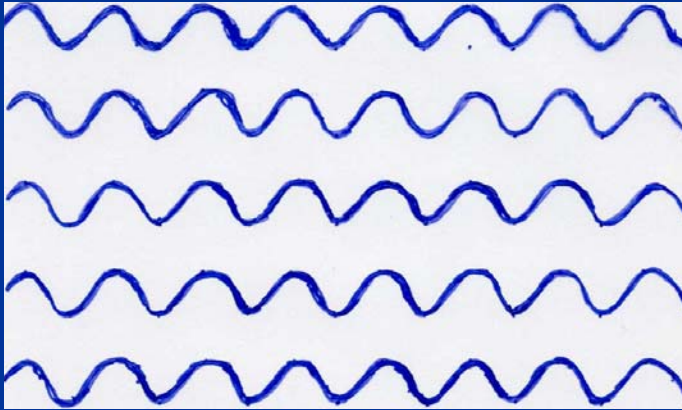
Sieht die Physik noch genauso aus ?

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 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

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

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

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

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

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 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 + Kosmon

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 !

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

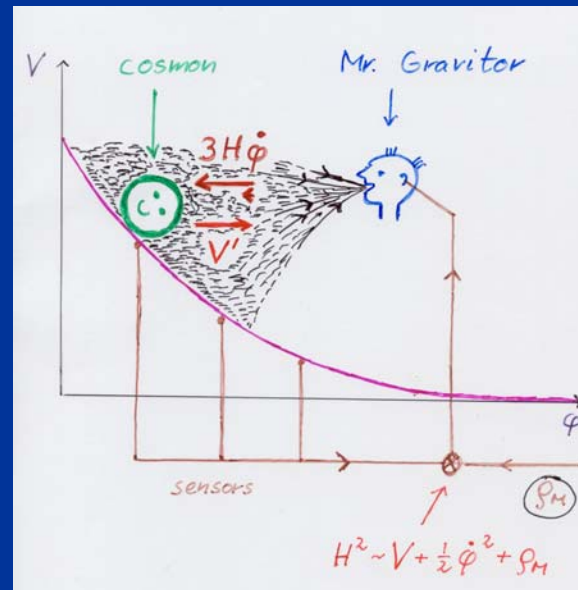
$$\rho = V + \frac{1}{2}\dot{\phi}^2$$

- 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

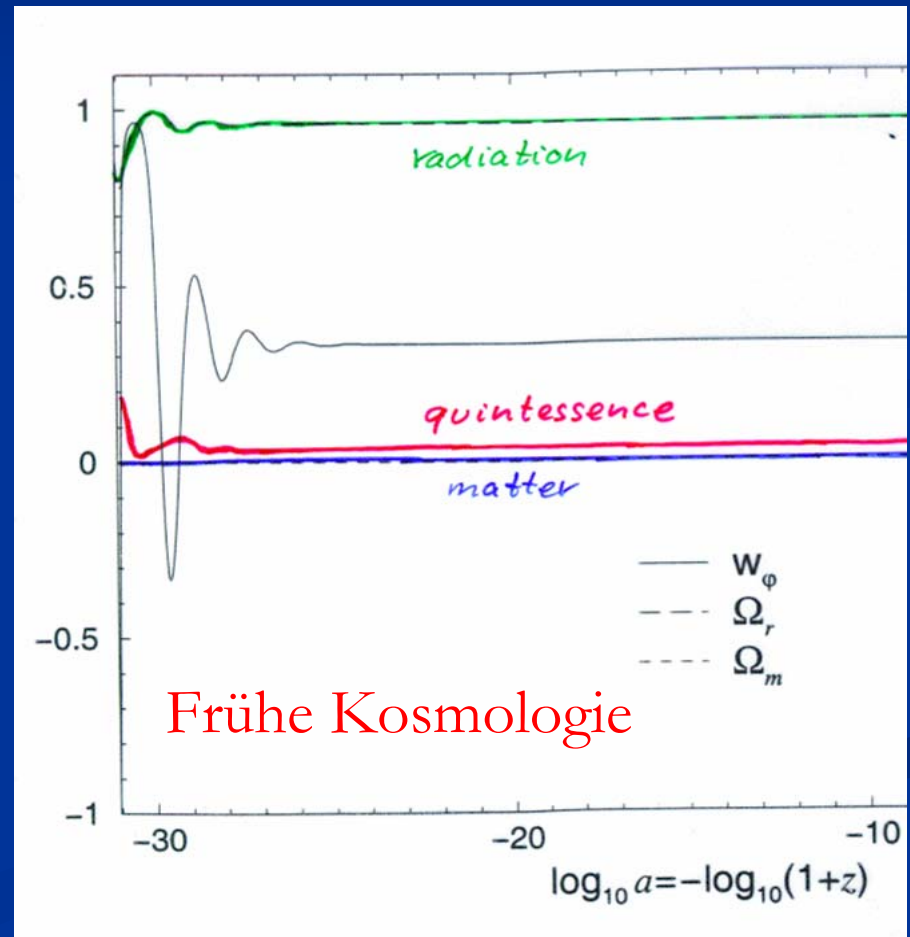
Lösung unabhängig von
Anfangsbedingungen

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

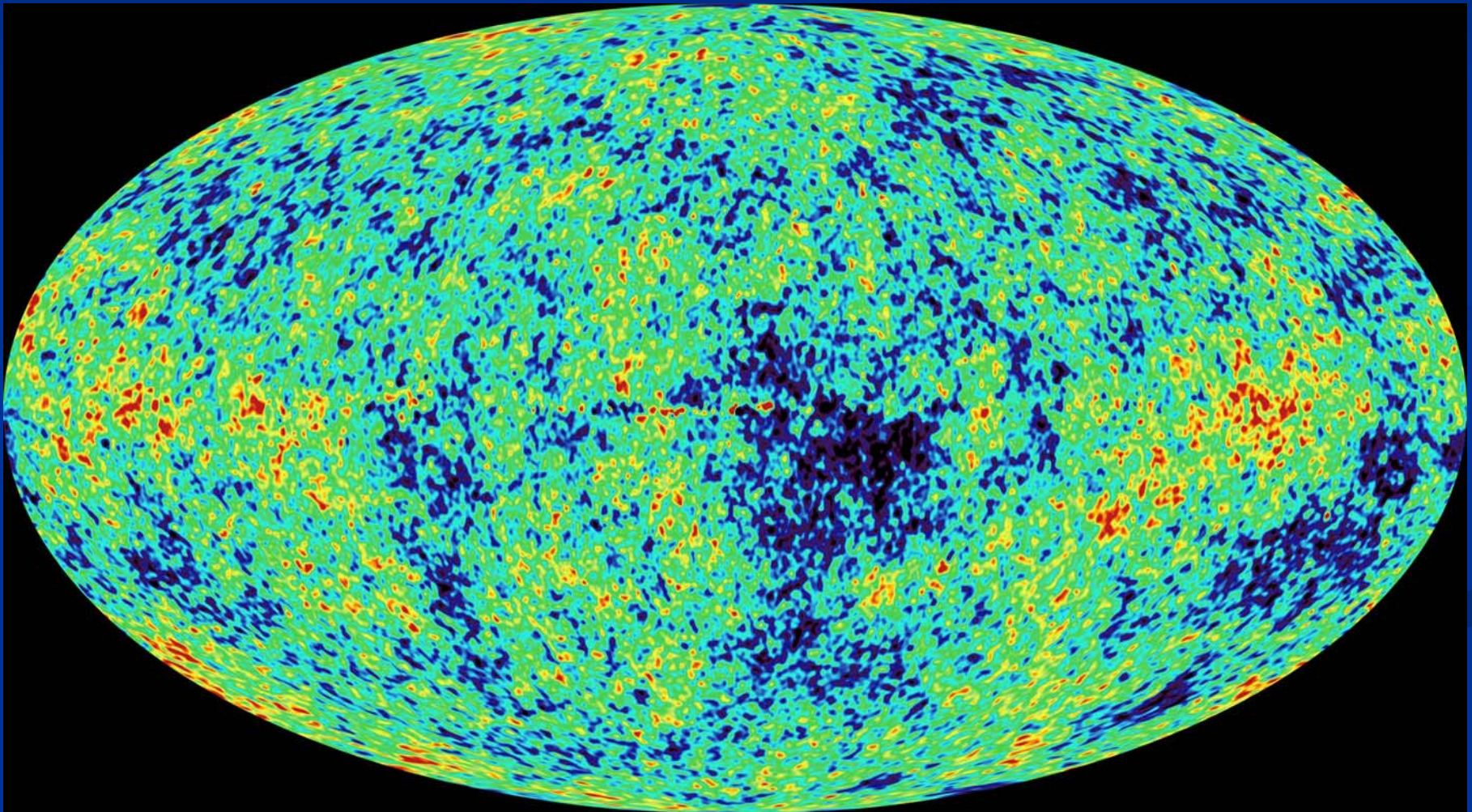
H : Hubble Parameter $H = \dot{a}/a$)

- $\Omega_b = \rho_b / \rho_c$

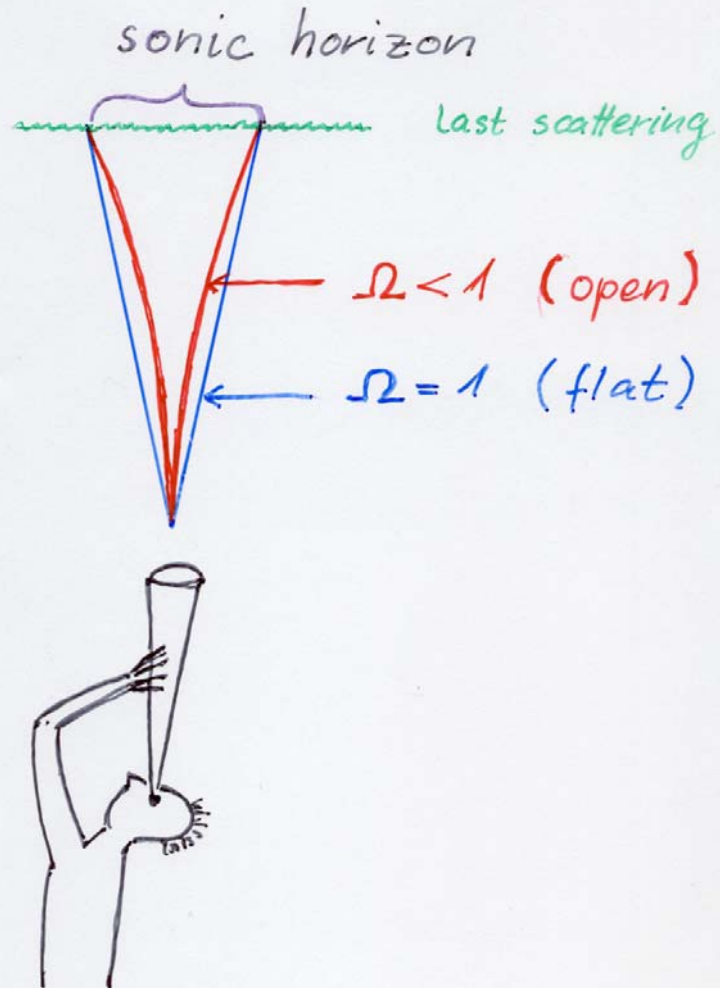
Anteil der Baryonen an der (kritischen)
Energiedichte

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


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 Ω_Λ statt Ω_h

Dunkle Energie :

homogen verteilt

Zusammensetzung des Universums

$$\Omega_b = 0.045$$

sichtbar

klumpt

$$\Omega_{dm} = 0.225$$

unsichtbar

klumpt

$$\Omega_h = 0.73$$

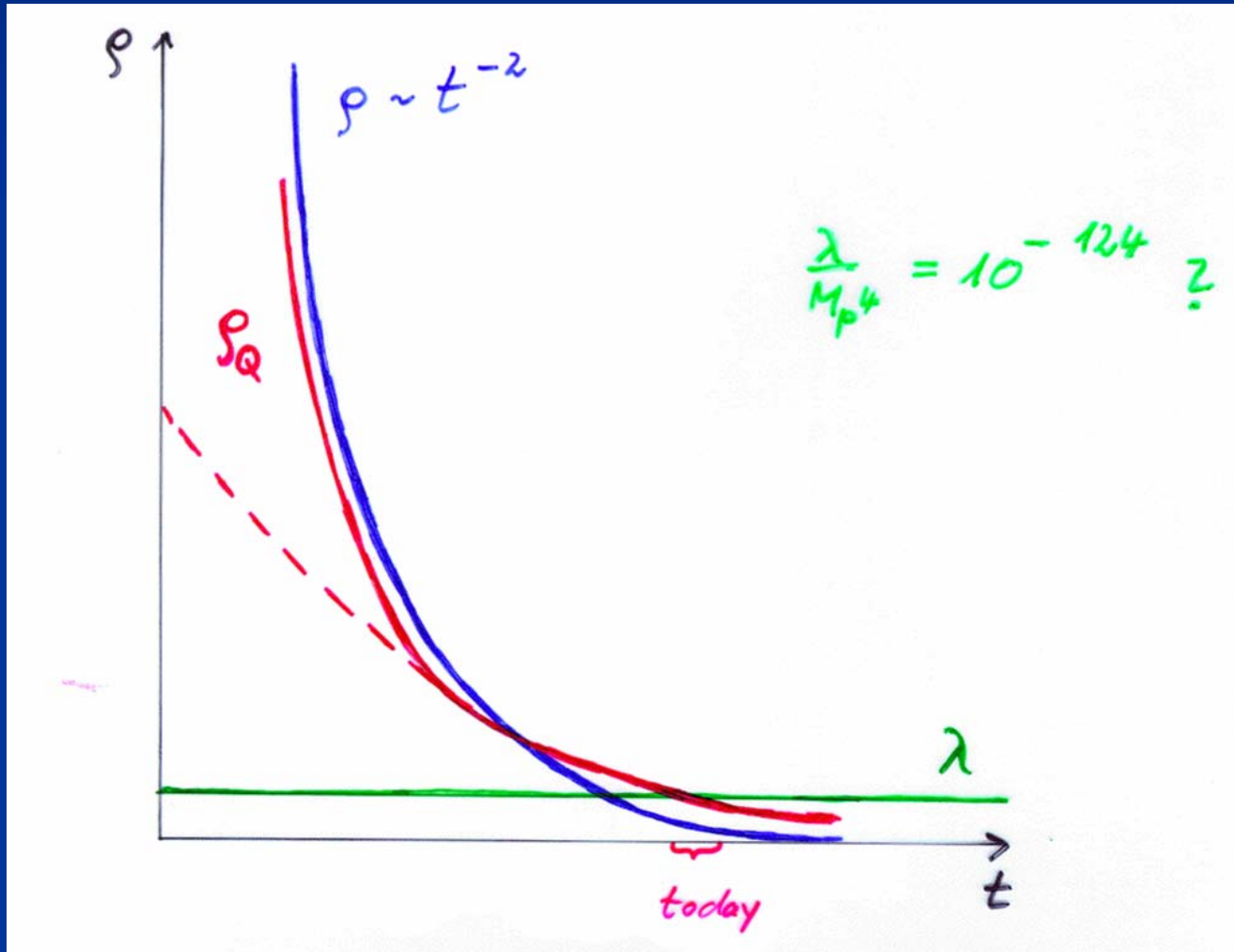
unsichtbar

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

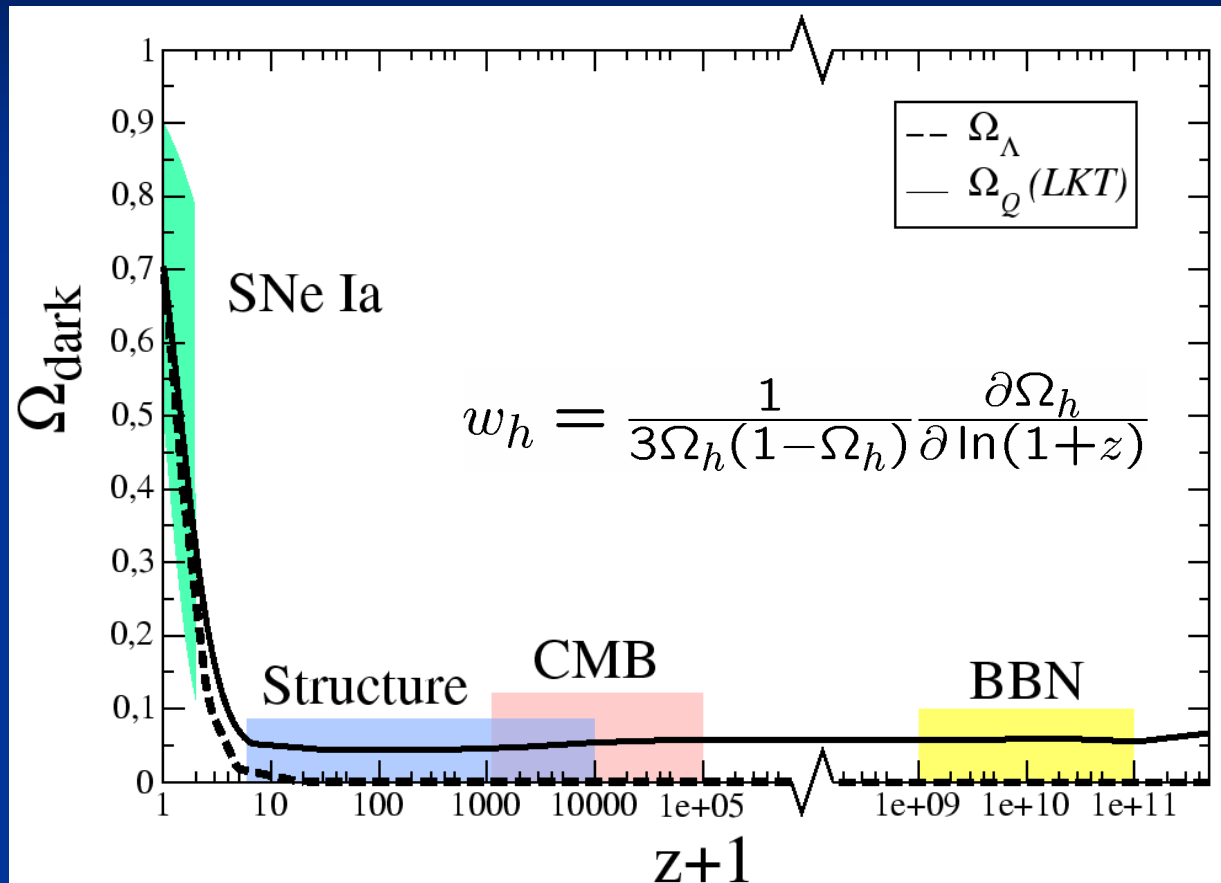
Gleiche Erklärung für dunkle Energie ?

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

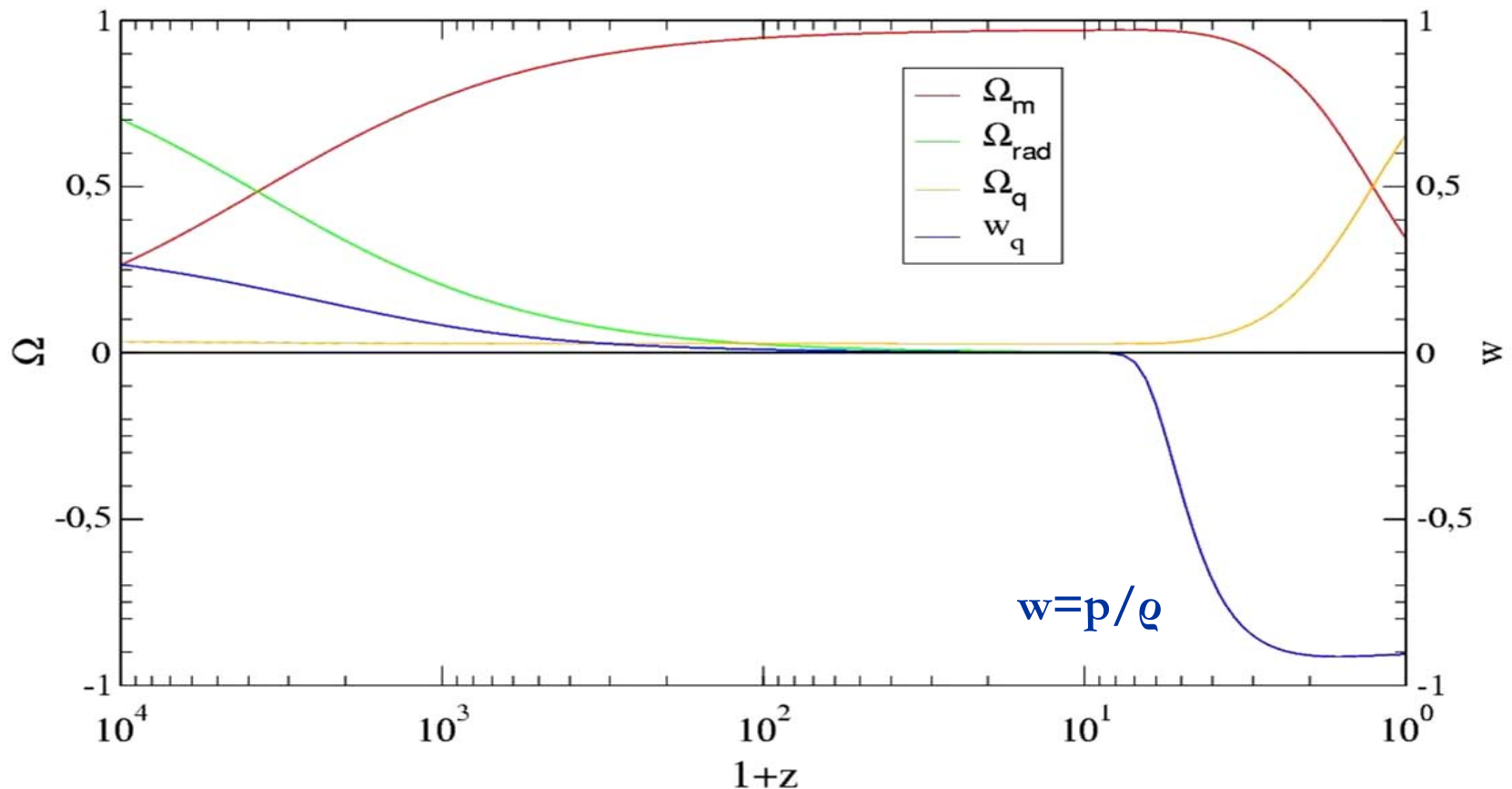
M.Doran,...

Dunkle Energie
im frühen Universum :

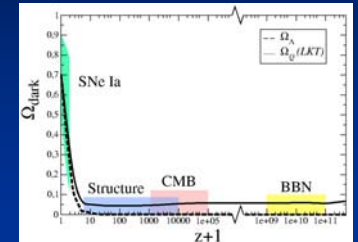
unter 10 %

Realistische Modelle der Dunklen Energie: Quintessenz wird heute wichtig

Crossover Quintessence Evolution



Zunehmende Wichtigkeit der Dunklen Energie



Vorhersage:

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

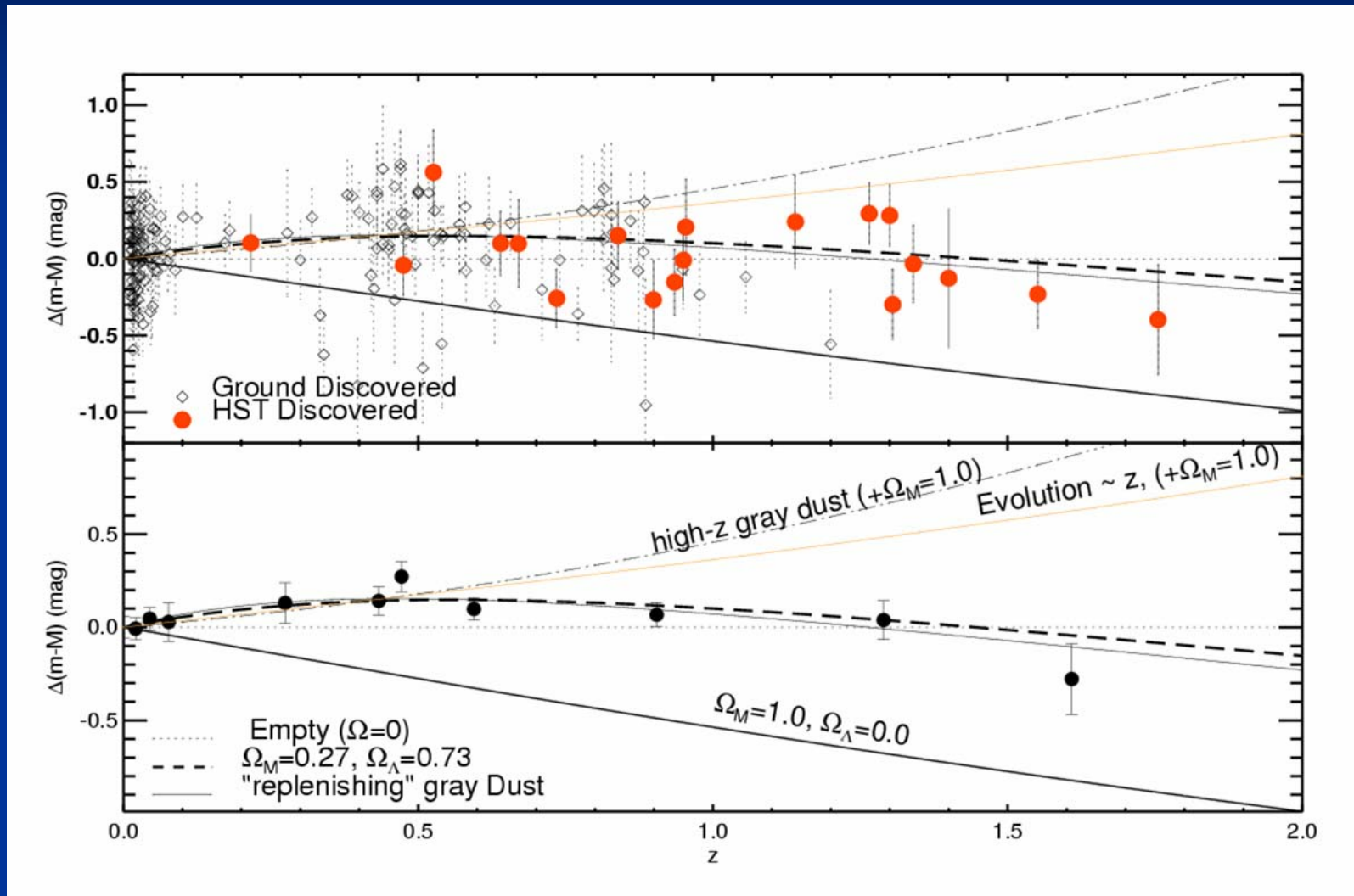
Die Expansion

des Universums

beschleunigt sich heute !

$$w_h < -1/3$$

Supernova Ia Hubble-Diagramm



Rotverschiebung z

Riess et al. 2004

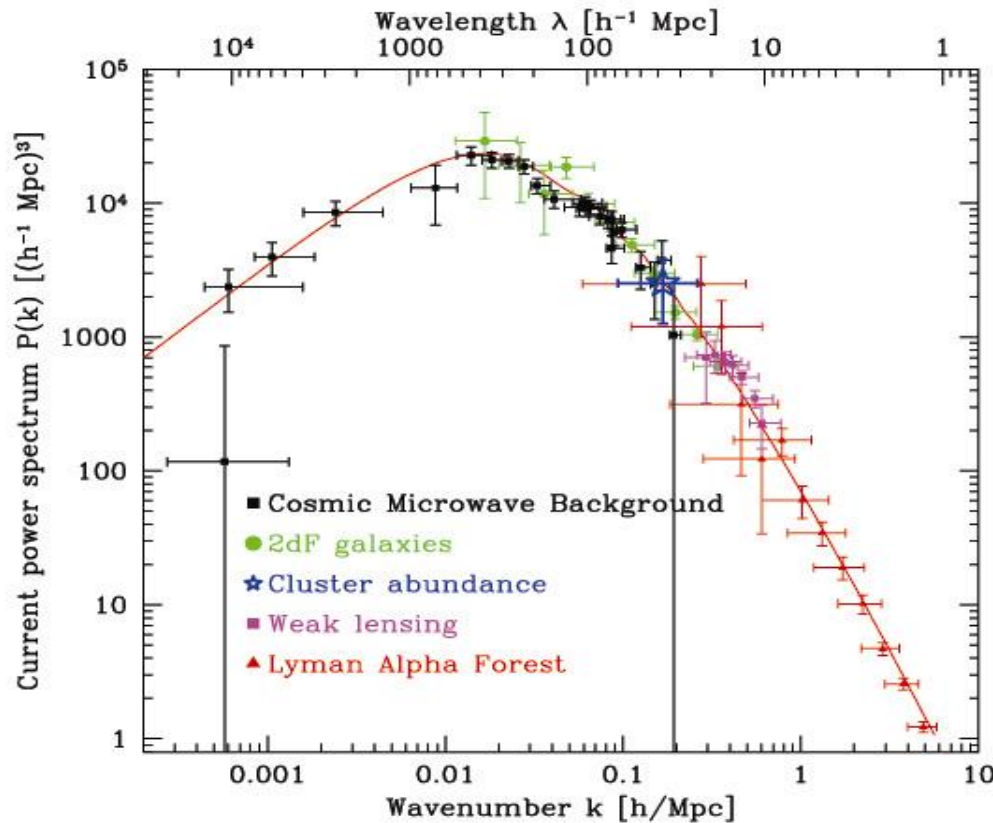
Strukturbildung

Aus winzigen Anisotropien wachsen die
Strukturen des Universums

Sterne , Galaxien, Galaxienhaufen

Ein primordiales Fluktuationsspektrum beschreibt
alle Korrelationsfunktionen !

Strukturbildung : Fluktuationsspektrum



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

Dunkle Energie :

Konsistentes Bild der Kosmologie

**Eine neue
“fundamentale”
Wechselwirkung ?**

Kosmon

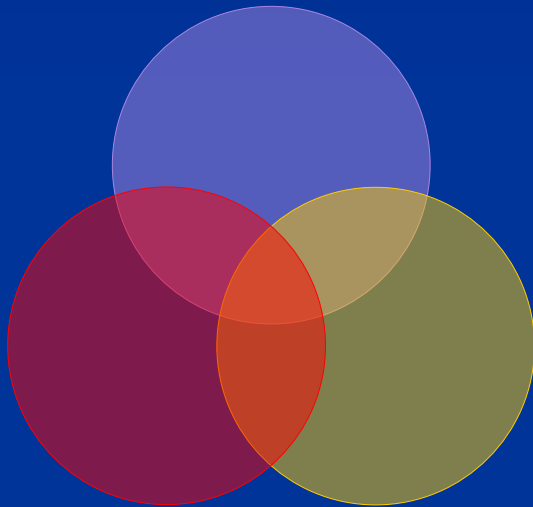
- *Skalarfeld ändert seinen Wert auch in der heutigen kosmologischen Entwicklung*
- *Potenzielle und kinetische Energie des Kosmons tragen zur Energiedichte des Universums bei*
- *Zeitabhängige dunkle Energie :*
 $\rho_b(t)$ fällt mit der Zeit !

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 α (elektrische Ladung)

Verhältnis Neutron-Masse zu Proton-Masse

Verhältnis Nukleon-Masse zu Planck-Masse

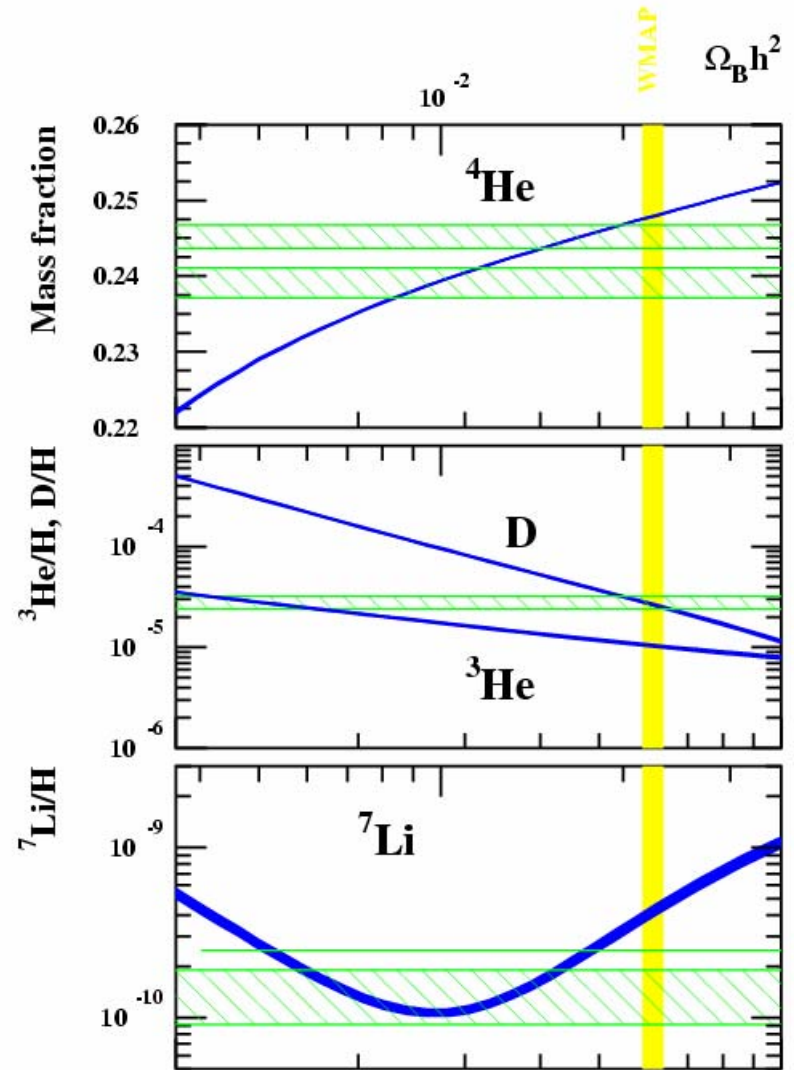
Quintessenz und Zeitabhängigkeit der “fundamentalen Konstanten”

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

ähnlich Higgsfeld in schwacher Wechselwirkung

- Zeitentwicklung von φ \Rightarrow
Zeitentwicklung von α

Primordiale
Häufigkeiten der
leichten Elemente
aus der
Nukleosynthese



wenn jetzige Messung von ^4He 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 α

und Verletzung des Äquivalenzprinzips

differentielle Beschleunigung η

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

MICROSCOPE – Satteliten-Mission

Zusammenfassung

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

Noch viele offene Fragen ????

Die Antwort der Künstlerin ...



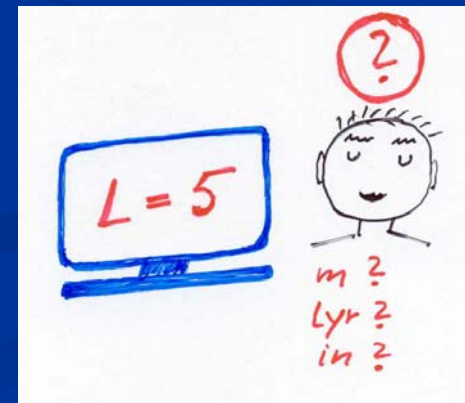
Laura Pesce

Die Antwort der Künstlerin ...



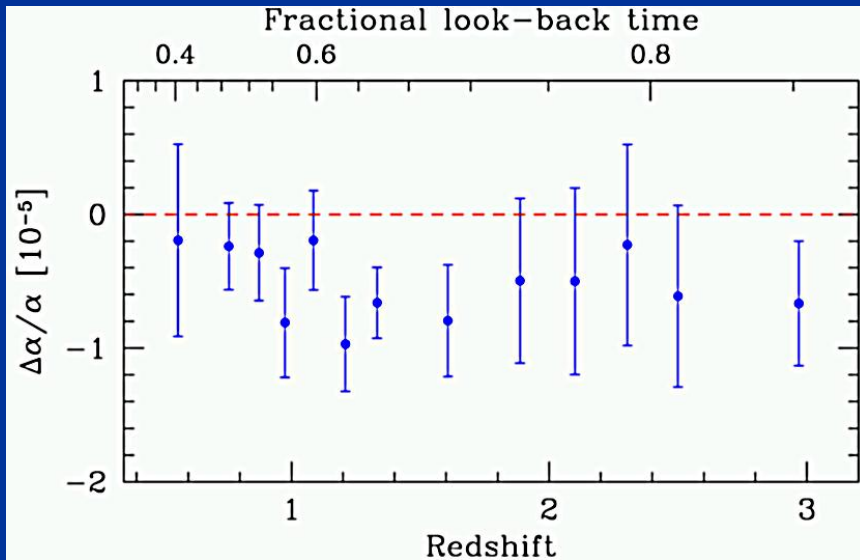
Laura Pesce

Und die Frage ?

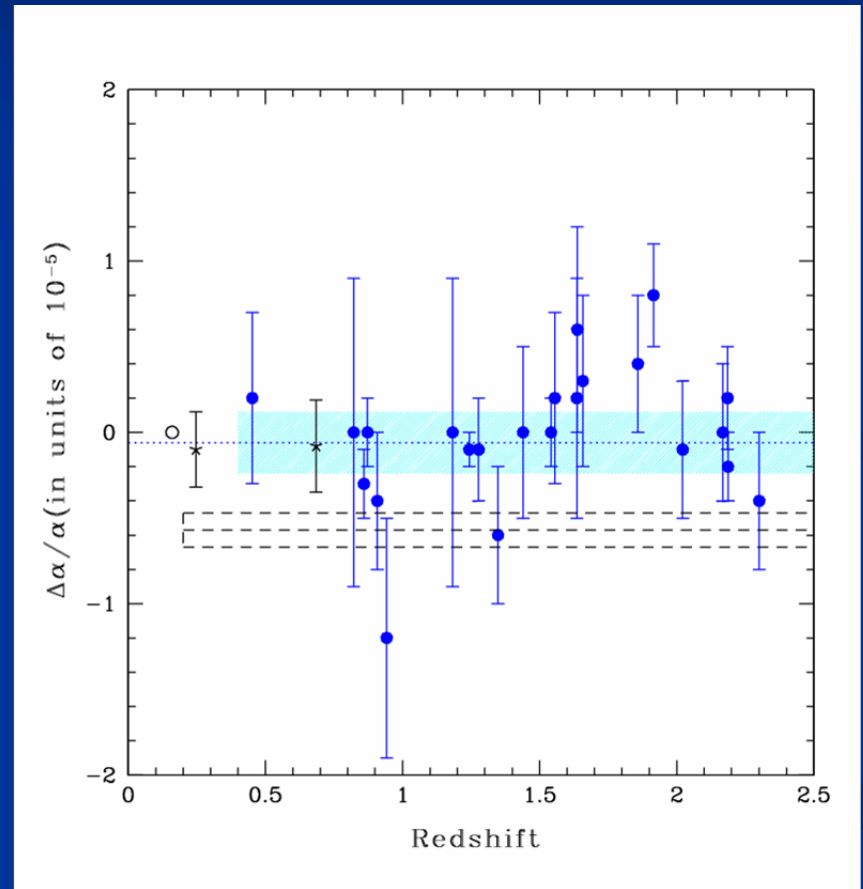


Ende ? nein ! Institutsfest !

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 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