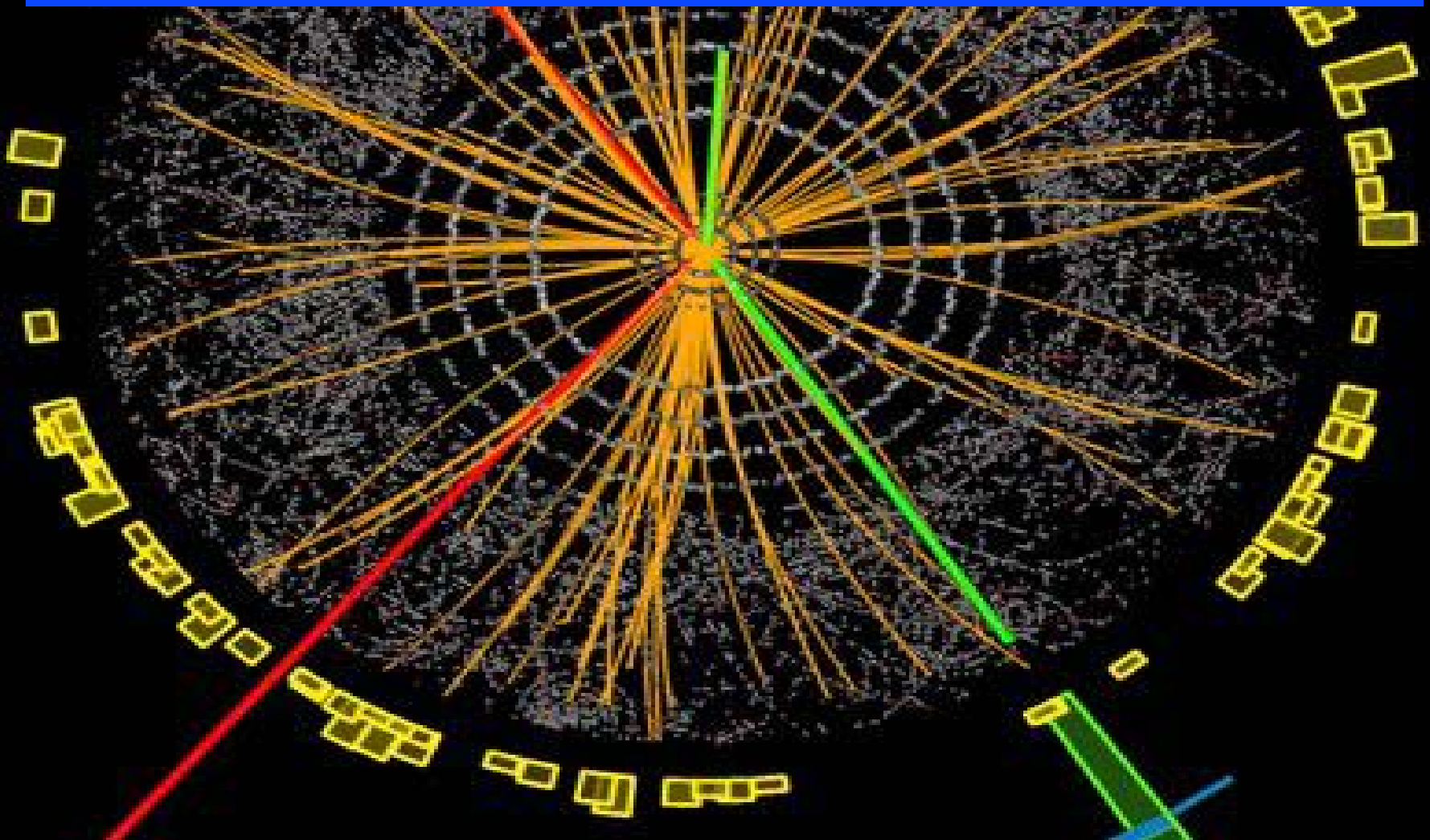
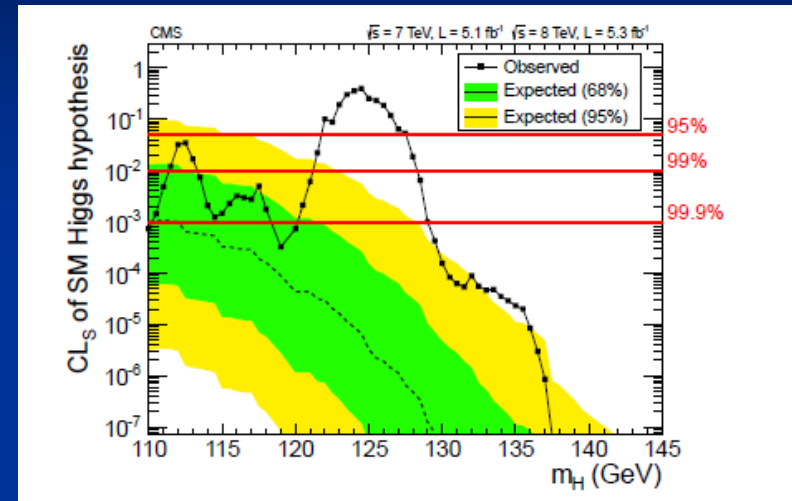
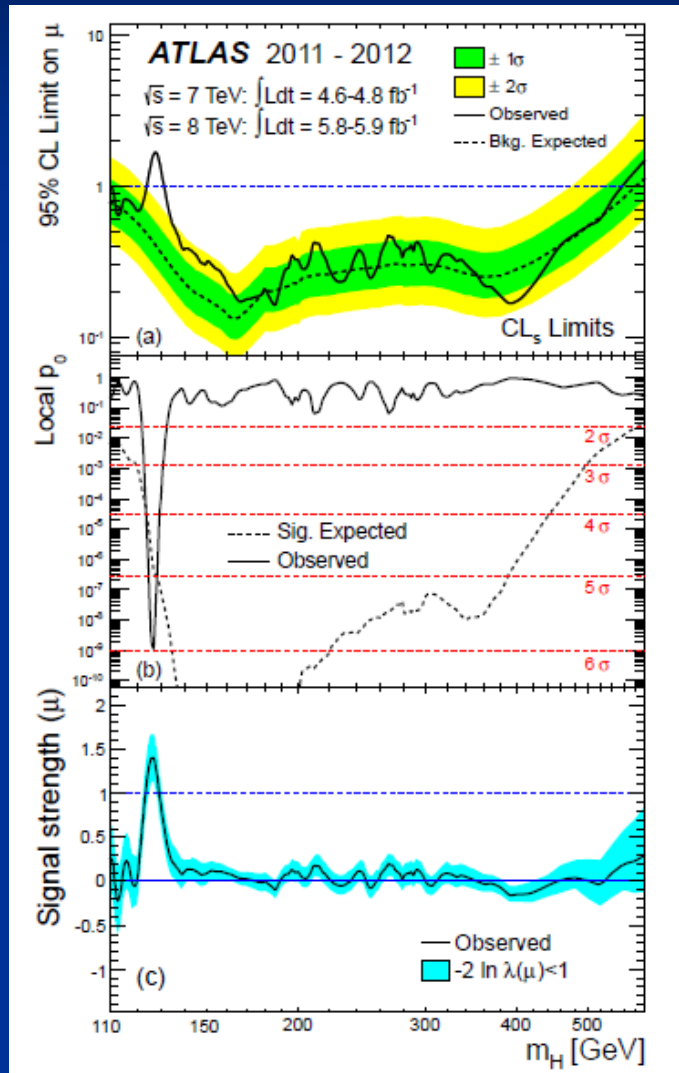


Das Higgs Boson und seine Masse

Was lernen wir von der Entdeckung am LHC ?



LHC : Higgs Boson gefunden ?

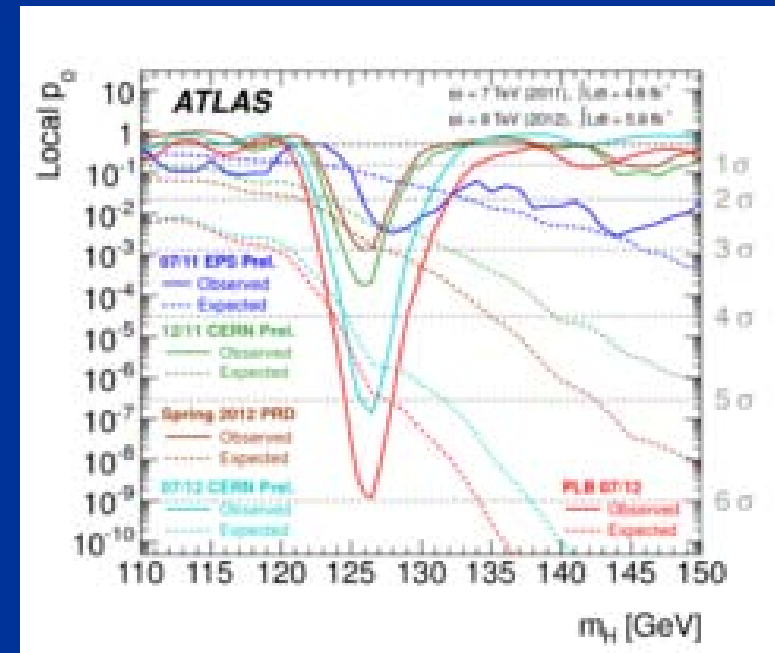
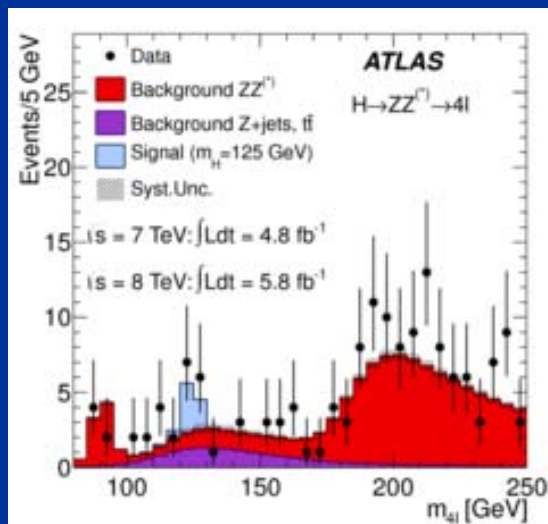
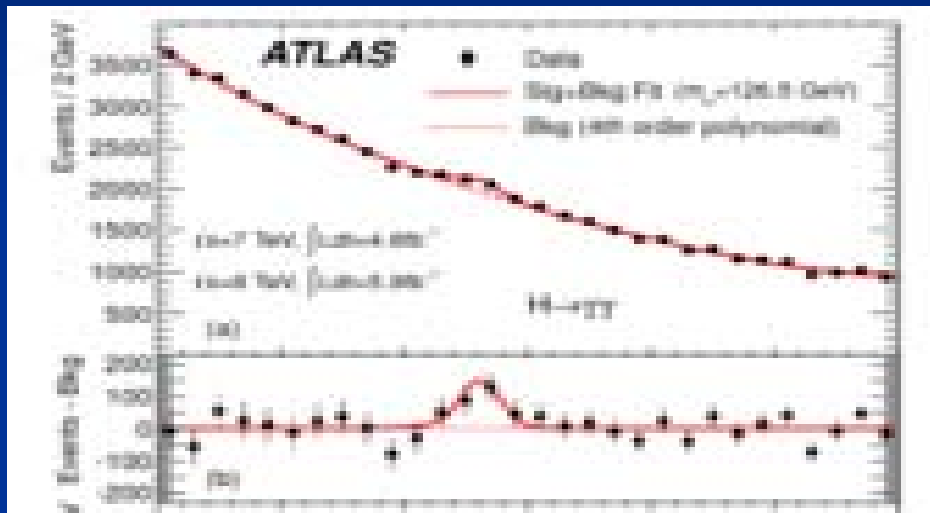


CMS 2011/12

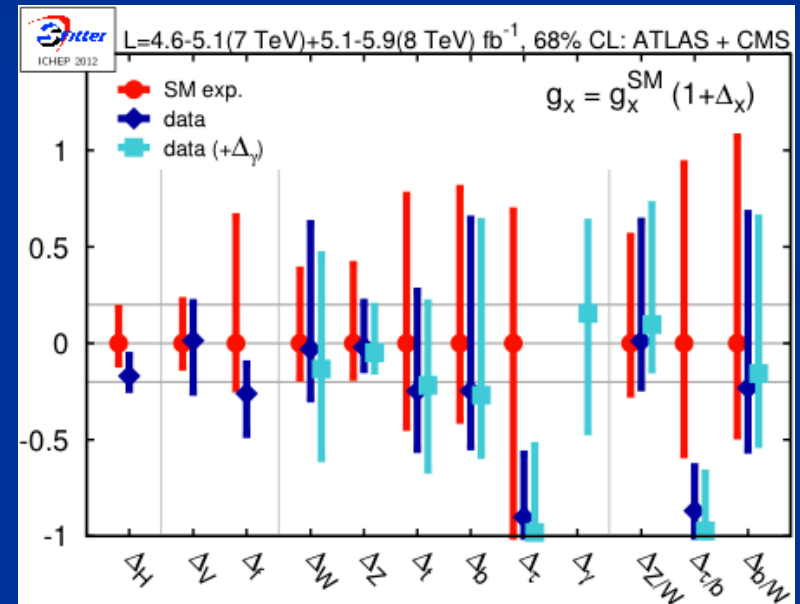
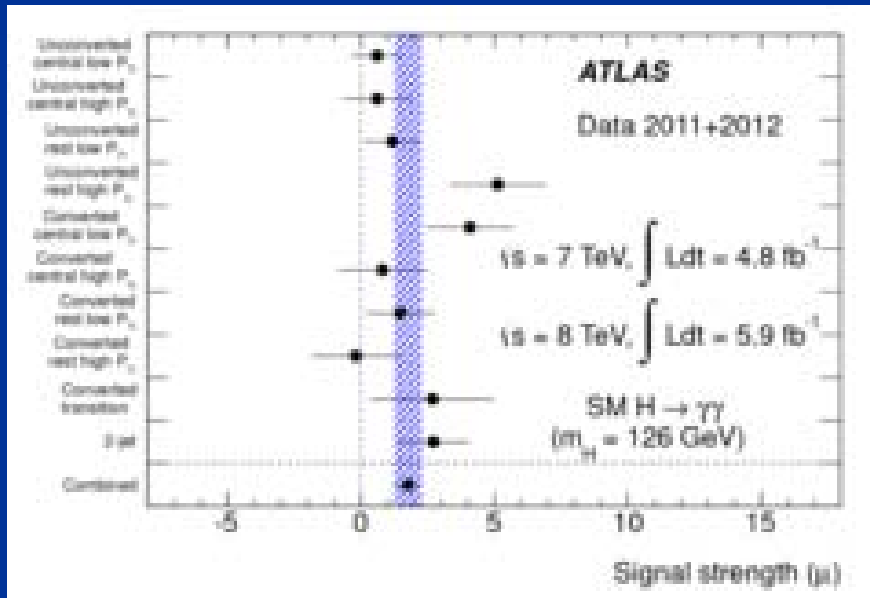
ATLAS 2011/12

Higgs Boson gefunden !

Masse 125-126 GeV

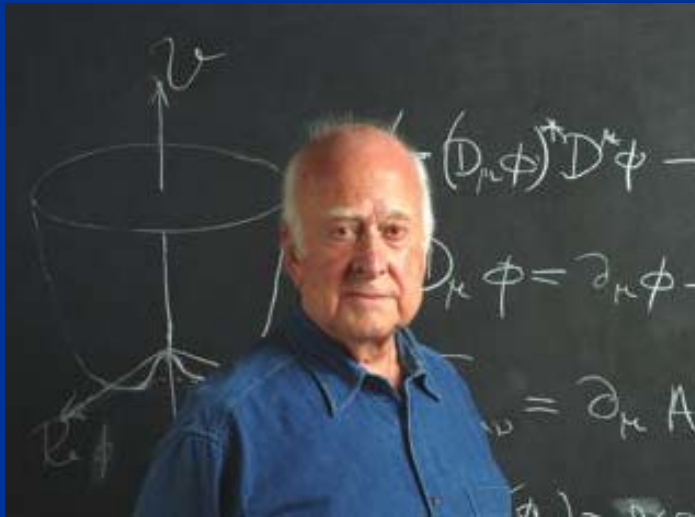


Higgs Boson des Standard-Modells kompatibel mit allen Beobachtungen

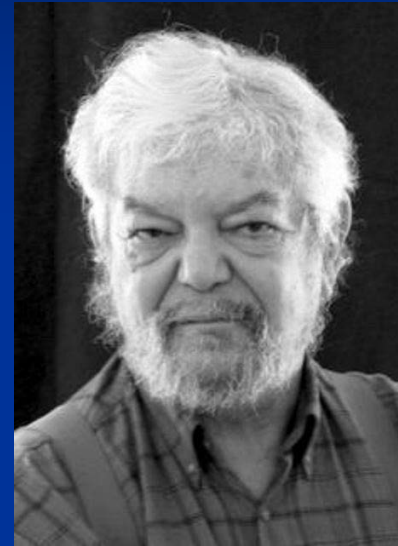


T.Plehn, M.Rauch

Brout-Englert-Higgs Mechanismus bestätigt



Higgs Brout
 Englert



eine Vorhersage...

Asymptotic safety of gravity and the Higgs boson mass

Mikhail Shaposhnikov

Institut de Théorie des Phénomènes Physiques, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland

Christof Wetterich

Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg, Philosophenweg 16, D-69120 Heidelberg, Germany

12 January 2010

Abstract

There are indications that gravity is asymptotically safe. The Standard Model (SM) plus gravity could be valid up to arbitrarily high energies. Supposing that this is indeed the case and assuming that there are no intermediate energy scales between the Fermi and Planck scales we address the question of whether the mass of the Higgs boson m_H can be predicted. For a positive gravity induced anomalous dimension $A_\lambda > 0$ the running of the quartic scalar self interaction λ at scales beyond the Planck mass is determined by a fixed point at zero. This results in $m_H = m_{\min} = 126$ GeV, with only a few GeV uncertainty. This prediction is independent of the details of the short distance running and holds for a wide class of extensions of the SM as well.

s in $m_H = m_{\min} = 126$ GeV, with o

zu gut um wahr zu sein ?

500 theoretische Physiker = 500 Modelle

äquidistante Vorhersagen

Bereich 100-600 GeV ...

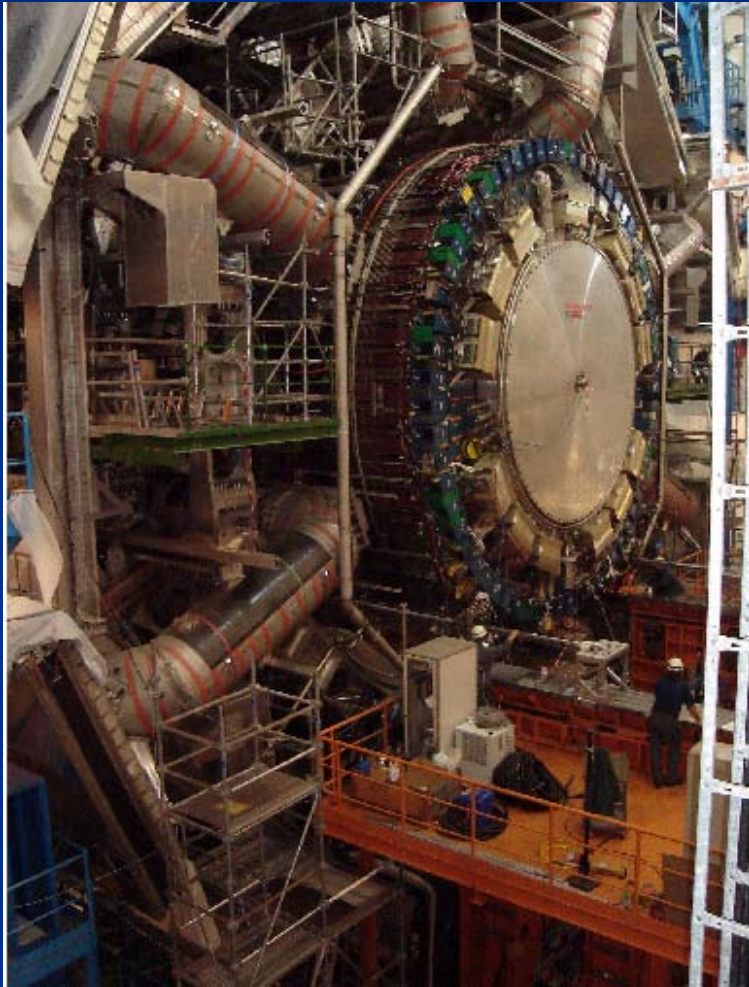
3 GeV Bins : man erwartet mehrere korrekte Vorhersagen,
allerdings für verschiedene Modelle

Motivation hinter der Vorhersage ?

Brout- Englert- Higgs- Mechanismus:

Spontane Symmetrie-Brechung

Spontane Symmetrie-Brechung bestätigt beim LHC



Spontane Symmetrie-Brechung

$$-\mathcal{L}_\varphi = \frac{1}{2}\partial^\mu\varphi^\dagger\partial_\mu\varphi + V(\varphi)$$

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} - \sum_k \frac{\partial^2\varphi}{\partial x_k^2} + \frac{\partial V}{\partial\varphi^\dagger} = 0$$

$$\begin{aligned} V(\varphi) &= -\mu^2\varphi^\dagger\varphi + \frac{1}{2}\lambda(\varphi^\dagger\varphi)^2 \\ &= \frac{1}{2}\lambda(\varphi^\dagger\varphi - \varphi_0^2)^2 + \text{const.}) \end{aligned}$$

$$\mu^2 > 0$$

$$\varphi_0^2 = \frac{\mu^2}{\lambda}$$

Fermi Skala

$$\varphi_0 = 175 \text{ GeV}$$

Feldgleichung für Erwartungswert des Higgs - Skalars

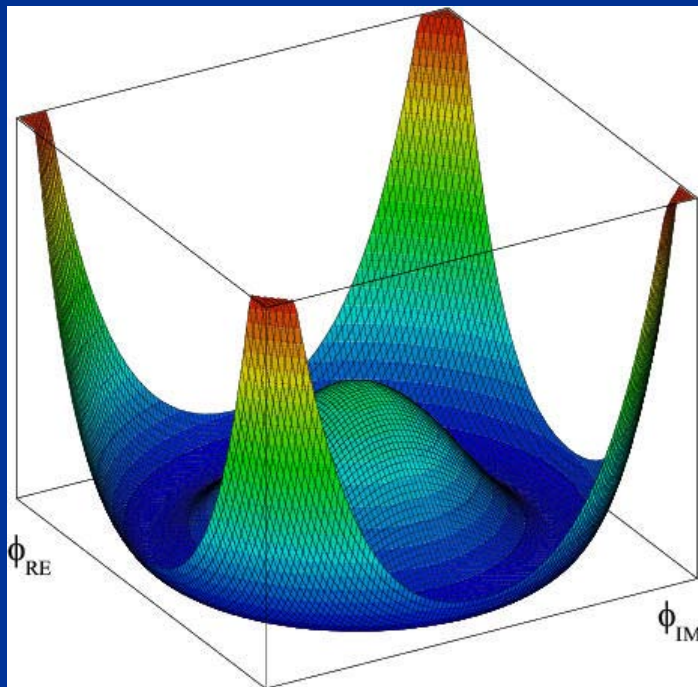
$$-\mathcal{L}_\varphi = \frac{1}{2}\partial^\mu\varphi^\dagger\partial_\mu\varphi + V(\varphi)$$

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} - \sum_k \frac{\partial^2\varphi}{\partial x_k^2} + \frac{\partial V}{\partial\varphi^\dagger} = 0$$

$$V(\varphi) = -\mu^2\varphi^\dagger\varphi + \frac{1}{2}\lambda(\varphi^\dagger\varphi)^2$$

$$\ddot{\varphi} - \Delta\varphi - \mu^2\varphi + \lambda(\varphi^\dagger\varphi)\varphi = 0$$

Potenzial für Higgs-Skalar



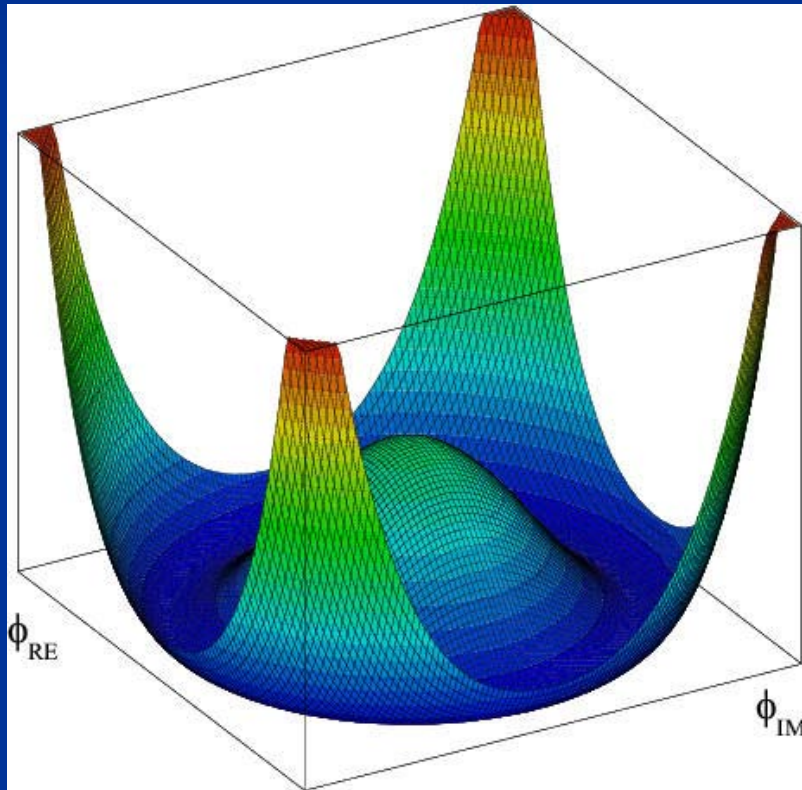
$$\mu^2 > 0$$

$$\begin{aligned} V(\varphi) &= -\mu^2 \varphi^\dagger \varphi + \frac{1}{2} \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2 \\ &= \frac{1}{2} \lambda (\varphi^\dagger \varphi - \varphi_0^2)^2 + \text{const.} \end{aligned}$$

φ : komplexes Feld

$$\varphi^\dagger = \varphi^*$$

Vakuum : statische homogene Lösung , Minimum des Potenzials



$$\mu^2 > 0$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - \sum_k \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_k^2} + \frac{\partial V}{\partial \varphi^\dagger} = 0$$

$$V(\varphi) = -\mu^2 \varphi^\dagger \varphi + \frac{1}{2} \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2$$
$$= \frac{1}{2} \lambda (\varphi^\dagger \varphi - \varphi_0^2)^2 + \text{const.})$$

$$\varphi = \varphi_0$$

$$\varphi_0^2 = \frac{\mu^2}{\lambda}$$

Spontane Symmetrie-Brechung

$$-\mathcal{L}_\varphi = \frac{1}{2}\partial^\mu\varphi^\dagger\partial_\mu\varphi + V(\varphi)$$

$$V(\varphi) = -\mu^2\varphi^\dagger\varphi + \frac{1}{2}\lambda(\varphi^\dagger\varphi)^2$$
$$= \frac{1}{2}\lambda(\varphi^\dagger\varphi - \varphi_0^2)^2 + \text{const.})$$

$$\varphi_0^2 = \frac{\mu^2}{\lambda}$$

Fermi Skala

$$\varphi_0 = 175 \text{ GeV}$$

Phase von φ_0 beliebig , jeder gebene Wert ist nicht invariant unter Phasenrotation : SSB

Radiale Mode und Goldstone-Mode

Entwicklung um Minimum des Potentials

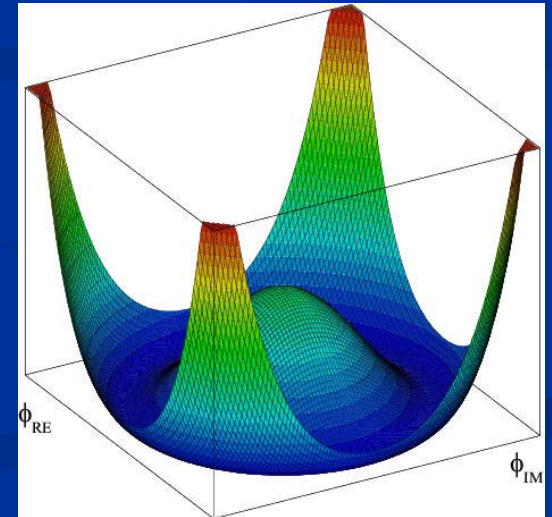
$$\varphi = \varphi_0 + \sigma + i\eta$$

$$\varphi_0, \sigma, \eta : \text{real}$$

$$-\mathcal{L}_\varphi = \frac{1}{2}\partial^\mu\sigma\partial_\mu\sigma + \frac{1}{2}\partial^\mu\eta\partial_\mu\eta \\ + \frac{1}{2}m^2\sigma^2 + \dots$$

Massenterm für
radiale Mode

$$m^2 = 2\lambda\varphi_0^2$$



Masse des Higgs-Bosons

lineare Näherung :

$$\ddot{\sigma} - \Delta\sigma + m^2\sigma = 0$$

$$m^2 = 2\lambda\varphi_0^2$$

Fermi Skala

$$\varphi_0 = 175 \text{ GeV}$$

λ : quartische Kopplung
des Skalarfelds

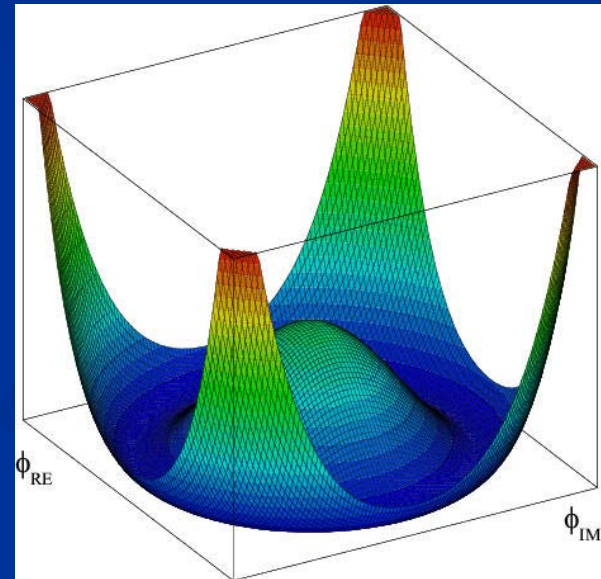
$$\begin{aligned} V(\varphi) &= -\mu^2\varphi^\dagger\varphi + \frac{1}{2}\lambda(\varphi^\dagger\varphi)^2 \\ &= \frac{1}{2}\lambda(\varphi^\dagger\varphi - \varphi_0^2)^2 + \text{const.}) \end{aligned}$$

masselose Goldstone-Mode

$$-\mathcal{L}_\varphi = \frac{1}{2}\partial^\mu\sigma\partial_\mu\sigma + \frac{1}{2}\partial^\mu\eta\partial_\mu\eta \\ + \frac{1}{2}m^2\sigma^2 + \dots$$

lineare Näherung :

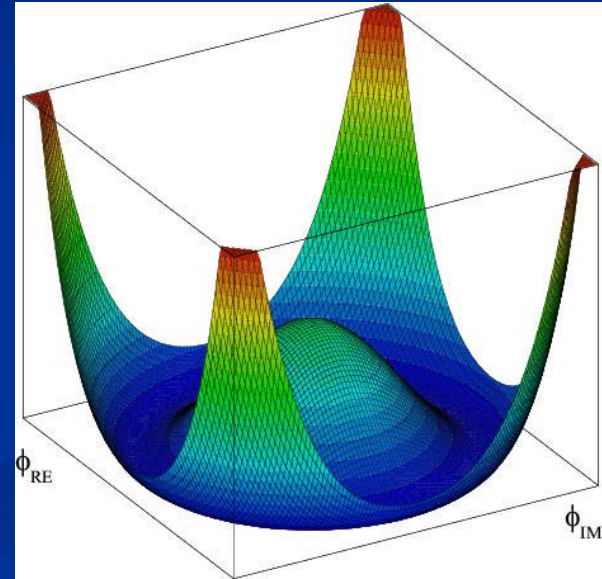
$$\ddot{\eta} - \Delta\eta = 0$$



ähnlich elektromagnetische Wellen im Vakuum,
aber ohne Polarisation

masselose Goldstone-Mode

$$\begin{aligned} V(\varphi) &= -\mu^2 \varphi^\dagger \varphi + \frac{1}{2} \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2 \\ &= \frac{1}{2} \lambda (\varphi^\dagger \varphi - \varphi_0^2)^2 + \text{const.}) \end{aligned}$$



Supra-Fluidität in He^4

Abelscher Higgs-Mechanismus

Supraleitung

Kopplung eines komplexen Skalarfelds an elektromagnetisches Feld (Photon)

$$-\mathcal{L}_\varphi = \frac{1}{2}(D^\mu\varphi)^*D_\mu\varphi + V(\varphi) \\ + \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$$

$$D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu$$

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

Abelscher Higgs-Mechanismus

Supraleitung

$$\frac{1}{2}(D^\mu\varphi)^*D_\mu\varphi = \frac{1}{2}\partial^\mu\sigma\partial_\mu\sigma$$



$$+\frac{1}{2}e^2\varphi_0^2A^\mu A_\mu$$

$$+\frac{1}{2}\partial^\mu\eta\partial_\mu\eta - e\varphi_0A^\mu\partial_\mu\eta$$

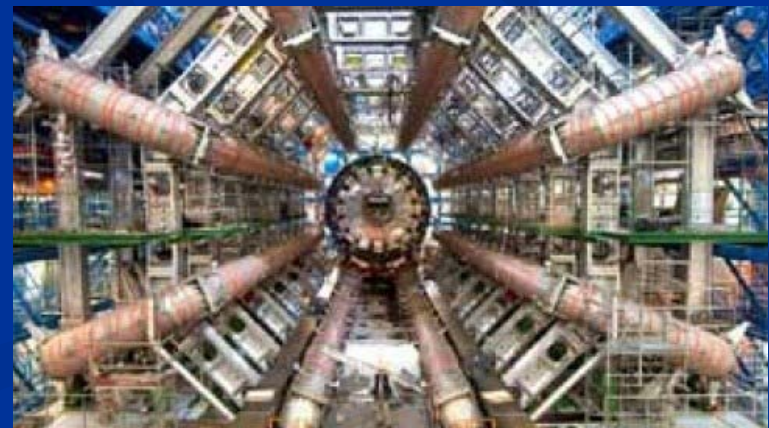
$$+e^2\varphi_0\sigma A^\mu A_\mu + \dots$$

$$\varphi = \varphi_0 + \sigma + i\eta$$

$$D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu$$

massives Photon !

Photon Masse $m=e \varphi$



Eich-Symmetrie

$$\delta\varphi(x) = -i\xi(x)\varphi(x)$$

$$\delta A_\mu(x) = -\frac{1}{e}\partial_\mu\xi(x)$$

$$\begin{aligned}\delta(D_\mu\varphi(x)) &= -i\xi(x)D_\mu\varphi(x) \\ &\quad -i\partial_\mu\xi(x)\varphi(x) \\ &\quad -ie\delta A_\mu(x)\varphi(x) \\ &= -i\xi(x)D_\mu\varphi(x)\end{aligned}$$

Goldstone-Boson ist Eichfreiheitsgrad

kein physikalisches Teilchen

Kann durch Eichtransformation eliminiert werden,
wird zur longitudinalen Komponente des massiven Photons

Standard-Modell der elektroschwachen Wechselwirkung : Brout-Englert-Higgs-Mechanismus

- ϕ : zwei komplexe Felder (Higgs-Doublet)
- W- und Z-Bosonen werden massiv,
Photon bleibt masselos

Standard-Modell der elektroschwachen Wechselwirkung : Brout-Englert-Higgs-Mechanismus

Die Massen aller geladenen Fermionen und
W,Z-Eichbosonen sind proportional zum
(Vakuum -Erwartungs -) Wert des skalaren Felds φ_H

Für Elektron, Quarks , W- und Z- Bosonen :

$$m_{\text{electron}} = h_{\text{electron}} * \varphi_H$$

etc.

Brout-Englert-Higgs- Mechanismus gibt den Elementarteilchen ihre Masse

nicht : dominanter Beitrag zur Protonmasse und
Masse der Atome
(QCD , chirale Symmetriebrechung)

Lektionen

1

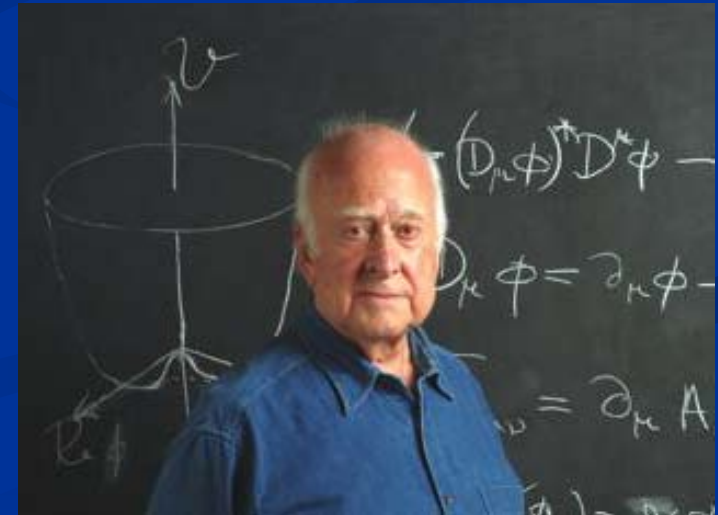
Das Vakuum ist
kompliziert

Masse hängt ab von den Eigenschaften des Vakuums

Elementarteilchen : Anregungen des
Vakuums (Vakuum = Äther ...)

Teilchen-Eigenschaften hängen von
Eigenschaften des Vakuums ab

Spontane Symmetrie-Brechung nicht
nur Eigenschaft von Festkörpern,
Magneten etc.,
sondern zentrale Eigenschaft der
fundamentalen Gesetze !



Das Vakuum ist nicht leer !

2

Fundamentale “Konstanten”
sind nicht konstant

*Hatten Kopplungskonstanten
im frühen Universum
andere Werte als heute ?*

Ja !

Fundamentale Kopplungs-Konstanten in der Quanten-Feld-Theorie

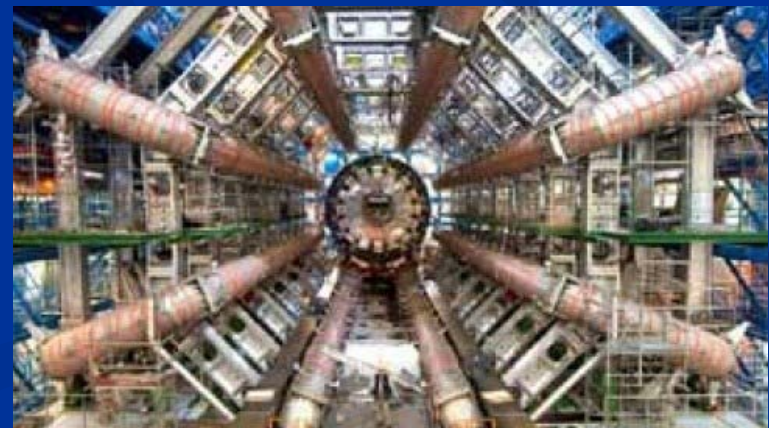
*Massen und Kopplungskonstanten
werden durch Eigenschaften des
Vakuums bestimmt !*

Ähnlich zu Maxwell-Gleichungen in Materie

Physik der kondensierten Materie : Gesetze hängen vom Zustand des Systems ab

- Grundzustand ,
- Thermischer Gleichgewichtszustand ...
- Beispiel : Gesetze des Elektromagnetismus in Supraleitern sind von Maxwell-Gleichungen im Vakuum verschieden

Photon Masse $m=e \varphi$



Standard-Modell der Elementarteilchen-Physik :

Elektroschwache Eichsymmetrie ist durch
Erwartungswert des Higgs-Skalars spontan
gebrochen.

Und wenn dieser früher einen anderen Wert hatte ?

Kosmologie :

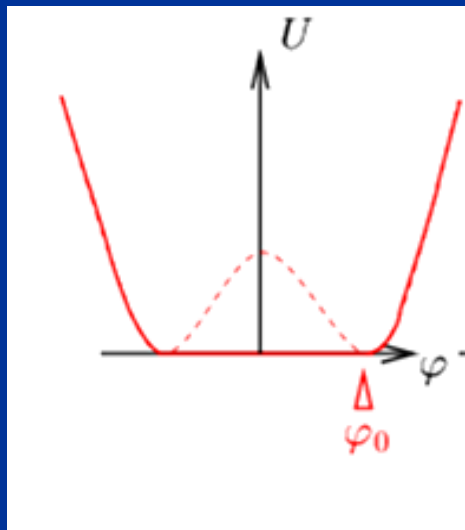
- Universum ist nicht in festem statischen Zustand
- Dynamische Evolution
- Gesetze hängen von der Zeit ab

Restoration der Symmetrie bei hoher Temperatur im frühen Universum

Niedrige T

SSB

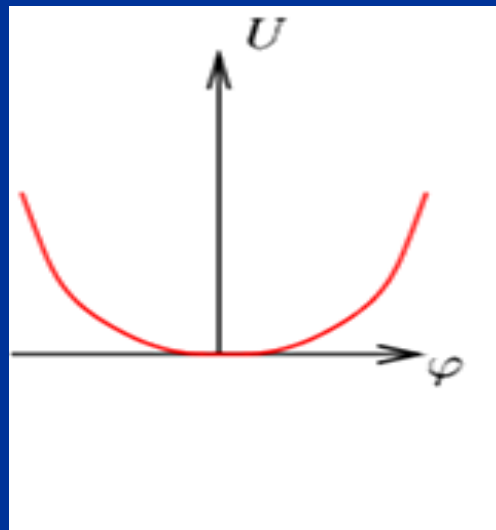
$$\langle \varphi \rangle = \varphi_0 \neq 0$$



Hohe T

SYM

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



hohe Temperatur :
Weniger Ordnung
Mehr Symmetrie

Bespiel:
Magnete

Standard-Modell der elektroschwachen Wechselwirkung : Brout-Englert-Higgs-Mechanismus

Die Massen aller geladenen Fermionen und
W,Z-Eichbosonen sind proportional zum
(Vakuum -Erwartungs -) Wert des skalaren Felds φ_H

Für Elektron, Quarks , W- und Z- Bosonen :

$$m_{\text{electron}} = h_{\text{electron}} * \varphi_H$$

etc.

Im heissen Plasma
des frühen Universums :

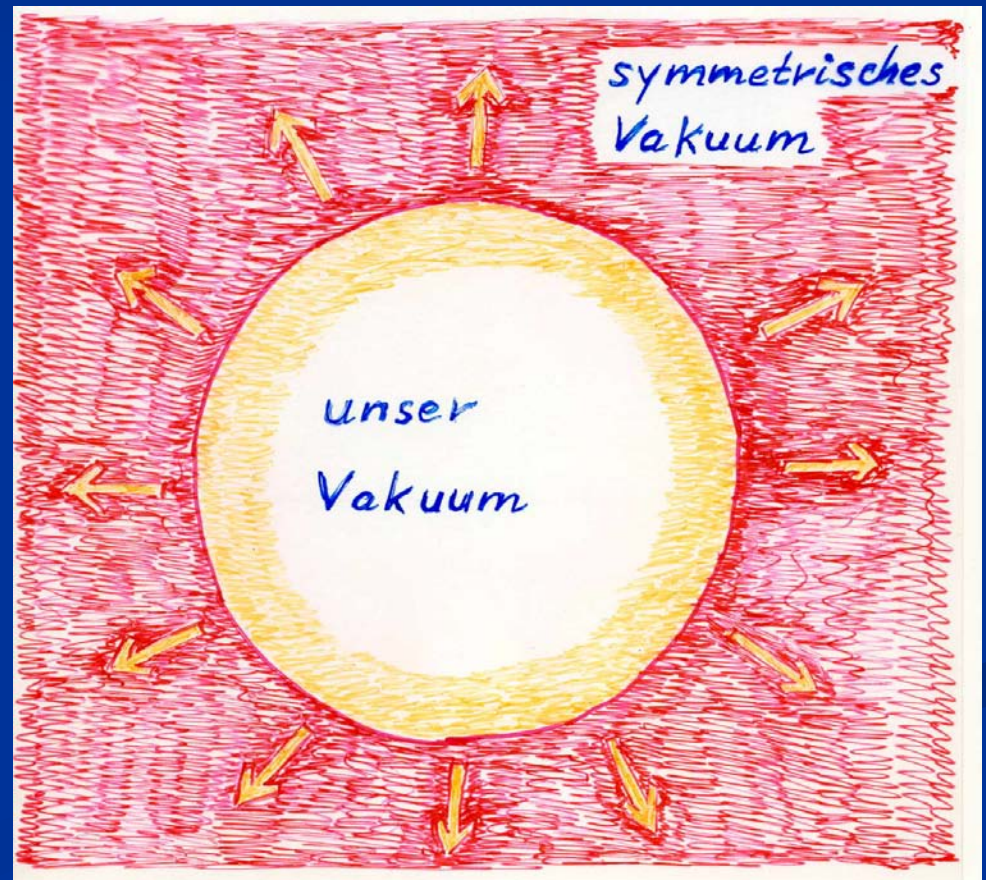
Gleiche Masse von Elektron
und Myon !

Ähnliche Stärke der
elektromagnetischen and schwachen
Wechselwirkung

Elektroschwacher Phasenübergang im frühen Universum

10^{-12} s nach Urknall

crossover



Zeitliche Änderung von Kopplungskonstanten

Wie stark ist die **gegenwärtige** Änderung
der Kopplungskonstanten ?

Kann zeitliche Änderung der Kopplungskonstanten beobachtet werden ?

Feinstruktur-Konstante α (elektrische Ladung)

Verhältnis Elektron- zu Proton- Masse

Verhältnis Nukleon- zu Planck- Masse

Zeitentwicklung von Kopplungen und skalare Felder

- Feinstruktur-Konstante hängt ab vom Wert des Higgs Felds : $\alpha(\varphi)$
- Zeitentwicklung von φ  Zeitentwicklung von α

Jordan,...

Statische Skalar – Felder im Standard - Modell

- Wert des Higgs – Skalars nach dem elektroschwachen Phasenübergang eingefroren
- Keine beobachtbare zeitliche Änderung von Kopplungskonstanten im Standard - Modell

**Beobachtung einer zeitlichen
oder räumlichen Variation der
Kopplungskonstanten**



**Physik jenseits des
Standard Modells**

Quintessenz Kosmologie

Massen und Kopplungen können vom Wert des Kosmon – Felds abhängen

ähnlich zur Abhängigkeit vom Wert des Higgs Felds

3

**Standard Modell der
Elementarteilchenphysik könnte bis
zur Planck Länge gültig bleiben**

Längen- und Energie- Skalen

- Newton's Konstante

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

- Reduzierte Planck Masse

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

- Planck – Länge 10^{-34} m

Längen- und Energie- Skalen

Fermi – Skala 175 GeV

Reduzierte Planck Masse

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

Fermi – Länge 10^{-18} m

Planck – Länge 10^{-34} m

The background of the slide is a photograph of a desert landscape. It features rolling sand dunes with distinct, wavy ripples on their surfaces, created by wind. The dunes are a warm, golden-brown color. In the distance, a larger, smoother dune rises against a pale, clear sky. The overall scene is serene and expansive.

**Die grosse Wüste :
Neue Physik erst bei der
Planck - Länge**

a prediction...

Asymptotic safety of gravity and the Higgs boson mass

Mikhail Shaposhnikov

Institut de Théorie des Phénomènes Physiques, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland

Christof Wetterich

Institut für Theoretische Physik, Universität Heidelberg, Philosophenweg 16, D-69120 Heidelberg, Germany

12 January 2010

Abstract

There are indications that gravity is asymptotically safe. The Standard Model (SM) plus gravity could be valid up to arbitrarily high energies. Supposing that this is indeed the case and assuming that there are no intermediate energy scales between the Fermi and Planck scales we address the question of whether the mass of the Higgs boson m_H can be predicted. For a positive gravity induced anomalous dimension $A_\lambda > 0$ the running of the quartic scalar self interaction λ at scales beyond the Planck mass is determined by a fixed point at zero. This results in $m_H = m_{\min} = 126$ GeV, with only a few GeV uncertainty. This prediction is independent of the details of the short distance running and holds for a wide class of extensions of the SM as well.

s in $m_H = m_{\min} = 126$ GeV, with o

The mass of the Higgs boson, the great desert, and asymptotic safety of gravity



key points

- great desert
- solution of hierarchy problem at high scale
- high scale fixed point
- vanishing scalar coupling at fixed point



Planck scale, gravity

no multi-Higgs model

no technicolor

no low scale
higher dimensions

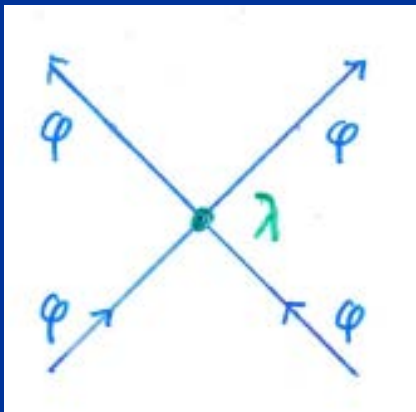
no supersymmetry

Entscheidende Grösse quartische skalare Kopplung

Vorhersage der Masse des Higgs Bosons

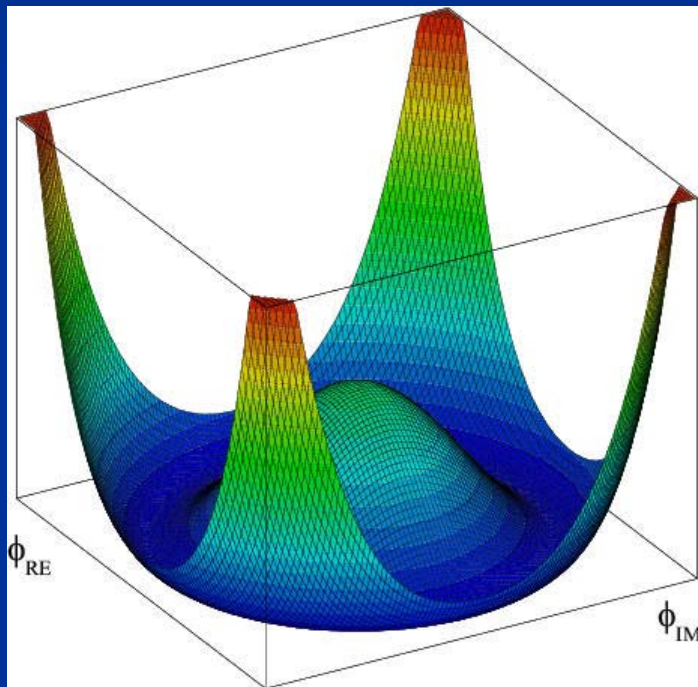
=

Vorhersage des Werts der quartischen skalaren
Kopplung λ bei der Fermi Skala



$$M_s^2 = 2\lambda(\varphi_L^2)\varphi_L^2$$

Potenzial für Higgs-Skalar



$$V(\varphi) = -\mu^2 \varphi^\dagger \varphi + \frac{1}{2} \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2$$
$$= \frac{1}{2} \lambda (\varphi^\dagger \varphi - \varphi_0^2)^2 + \text{const.})$$

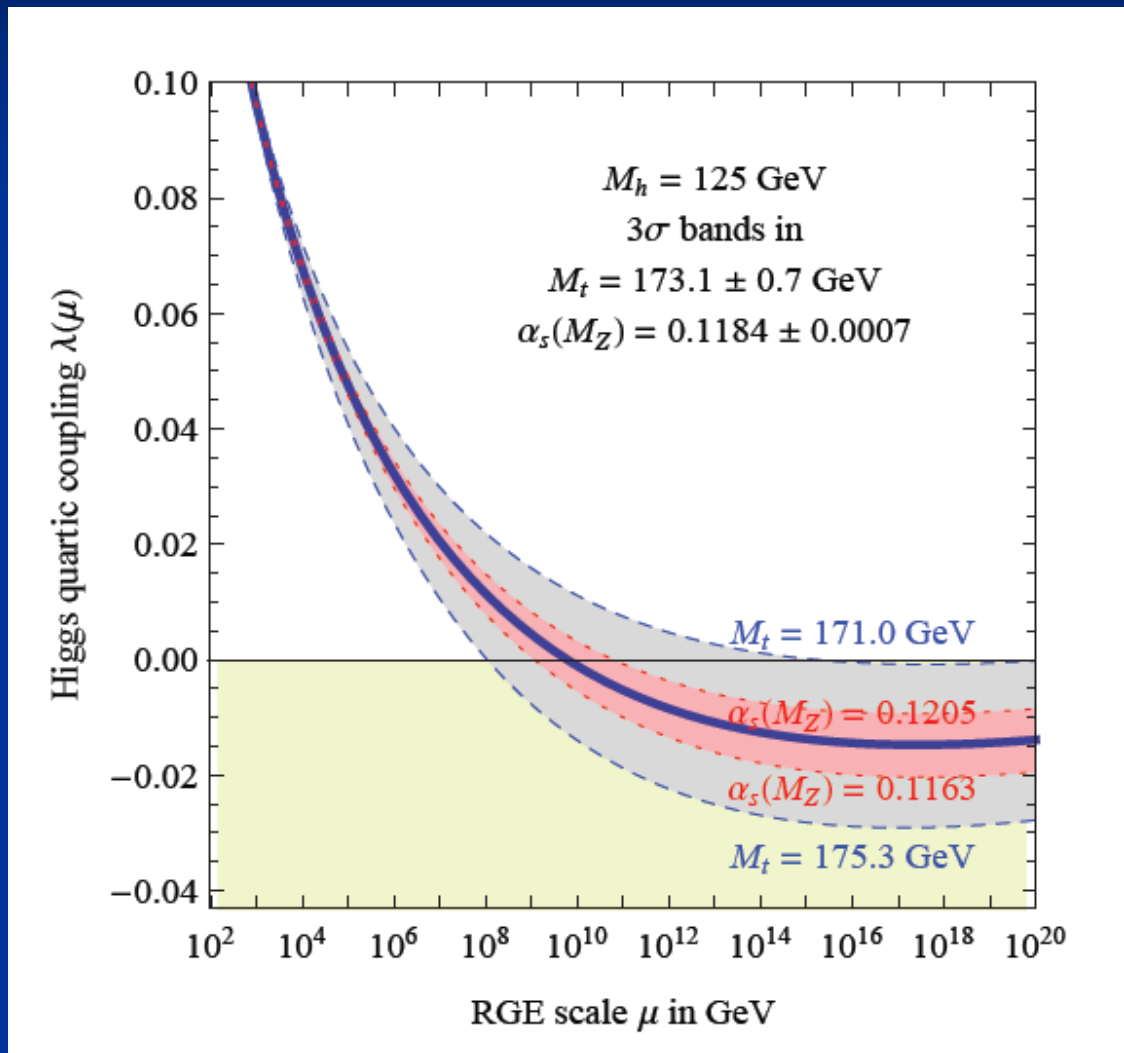
φ : komplexes Feld

$$m^2 = 2\lambda \varphi_0^2$$

Renormierung , laufende Kopplungen

Kopplungen hängen von der
Längenskala ab , oder von einer
Massenskala k

Laufende quartische skalare Kopplung



Degrassi
et al

Vorhersage für die Masse des Higgs Skalars

$$m_H = m_{\min}$$

$$m_{\min} = \left[126.3 + \frac{m_t - 171.2}{2.1} \times 4.1 - \frac{\alpha_s - 0.1176}{0.002} \times 1.5 \right] \text{ GeV} ,$$

2010

M. Shaposhnikov, C. Wetterich, Phys. Lett. **B683** (2010) 196

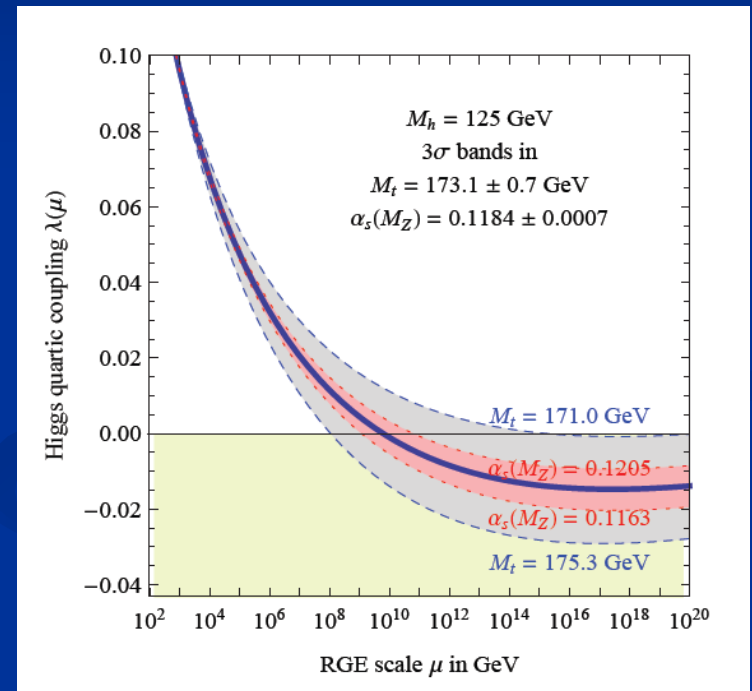
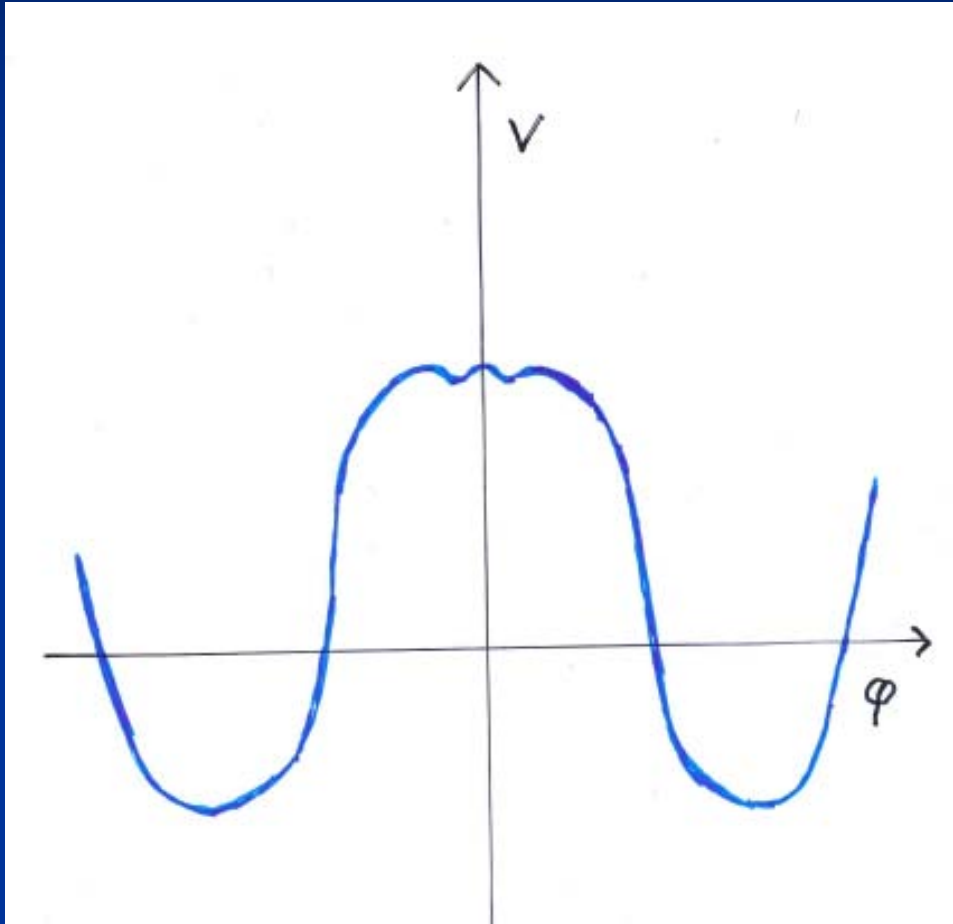
M. Holthausen, K. S. Lim, M. Lindner, JHEP **1202** (2012) 037

“Vorhersage ” für die Masse des
Top – Quarks
bei bekannter Masse des
Higgs Bosons

for $m_H = 126$ GeV :

$$m_t = 171.5 \text{ GeV}$$

Metastabiles Vakuum ?



Existenz eines konsistenten Modells dieser Art unsicher

Zusammenfassung

- Entdeckung des Higgs- Bosons : spontane Symmetriebrechung bestimmt Massen der Elementarteilchen
- Vakuum is nicht leer
- Fundamentale Kopplungen sind nicht unveränderlich
- Standard- Modell vielleicht bis zur Planck Skala gültig

conclusions

- observed value of Higgs boson mass is compatible with great desert
- short distance fixed point with small Λ predicts Higgs boson mass close to 126 GeV
- prediction in SM+gravity, but also wider class of models
- desert: no new physics at LHC and future colliders
- relevant scale for neutrino physics may be low or intermediate (say 10^{11} GeV) - oasis in desert ?

The background is a solid dark blue color. On the right side, there are several thick, wavy, light blue lines that flow from the top towards the bottom, creating a sense of movement or a stylized landscape feature like a river or dunes.

end

Running quartic scalar coupling λ and Yukawa coupling of top quark h

$$\partial_t \lambda = \beta_\lambda(\lambda, h, g^2) \quad t = \ln(k/\chi)$$

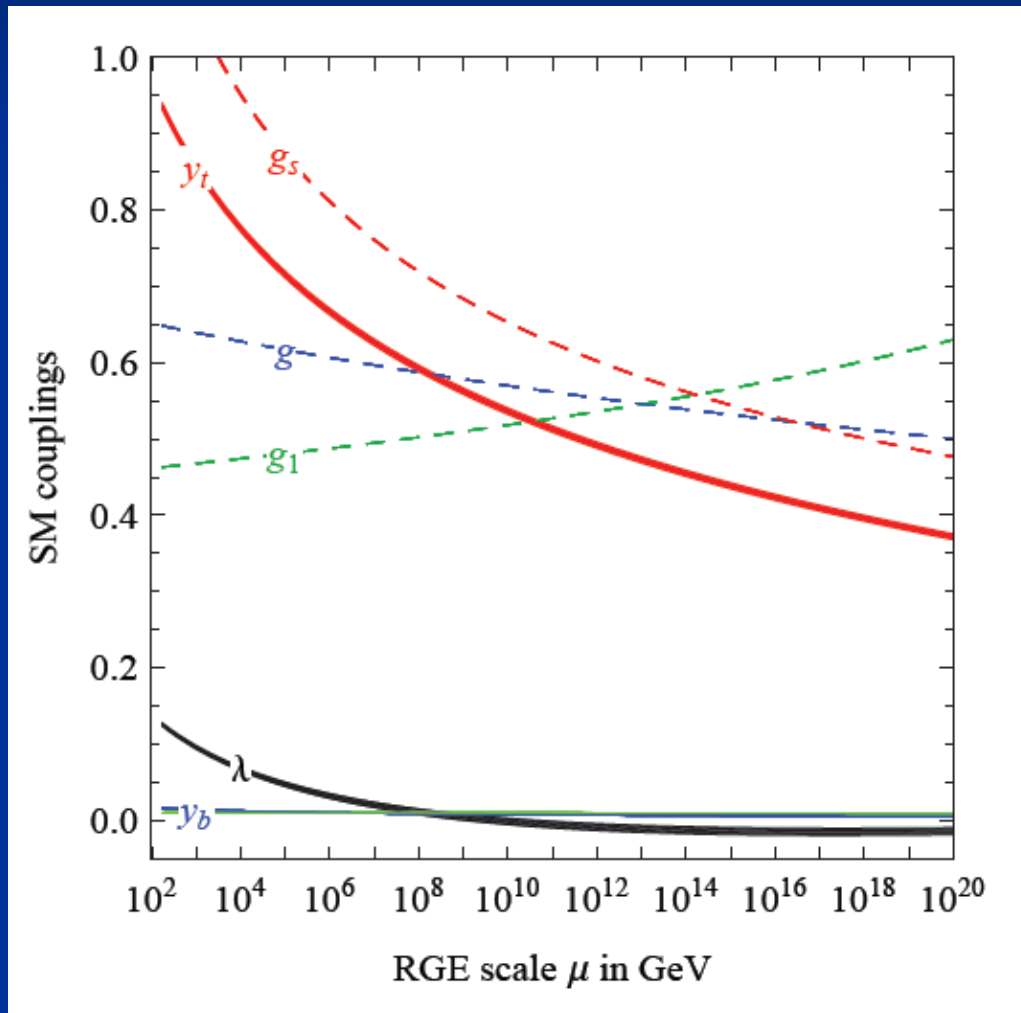
neglect gauge couplings g

$$\beta_\lambda = \frac{3}{4\pi^2}(\lambda^2 + h^2\lambda - h^4)$$

$$\partial_t h = \beta_h = \frac{9}{32\pi^2}h^3$$

$$m_t = h(\varphi_0)\varphi_0$$

running SM couplings



Degrassi
et al

Partial infrared fixed point

become comparable. Indeed, for strong enough h_t the RGE for the ratio λ/h_t^2 ,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\lambda}{h_t^2} \right) = \frac{h_t^2}{16\pi^2} \left\{ 12 \left(\frac{\lambda}{h_t^2} \right)^2 + 3 \frac{\lambda}{h_t^2} - 12 \right\} \quad (16)$$

is governed by an infrared fixpoint.^{13]} The ratio λ/h_t^2 remains constant if the right hand side of (16) vanishes. This happens for

$$\frac{\lambda}{h_t^2} = \left(\frac{65}{64} \right)^{1/2} - \frac{1}{8} = x_0 \quad (17)$$

and corresponds to a mass ratio

$$\frac{M_H}{m_t} \approx 1.3 \quad (18)$$

$$\left(\frac{\lambda}{h^2} \right) = (\sqrt{65} - 1)/8$$

infrared interval

allowed values of λ or λ/h^2 at UV-scale Λ :

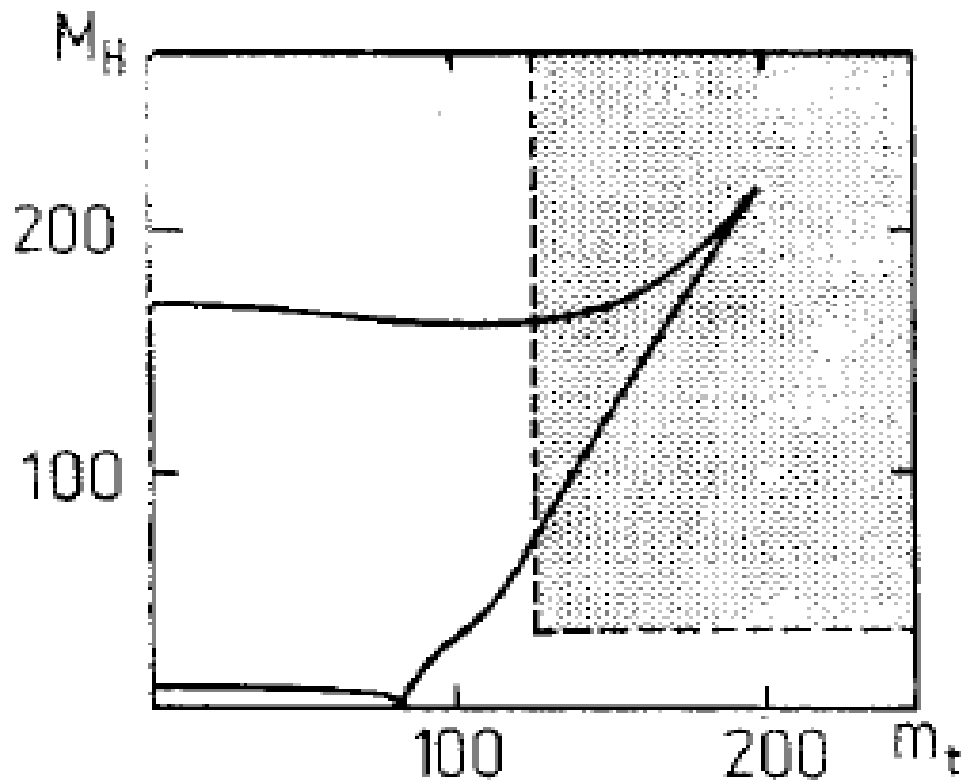
between zero and infinity

are mapped to

finite infrared interval of values of

λ/h^2 at Fermi scale

infrared interval



L. Maiani, G. Parisi and R. Petronzio, Nucl. Phys. B136 (1978) 115

N. Cabbibo, L. Maiani, G. Parisi and R. Petronzio, Nucl. Phys. B158 (1979) 295

M. Lindner, Z. Phys. C31 (1986) 295.

B. Grzadkowski and M. Lindner, Phys. Lett. B178, 81 (1986);

M. Lindner, M. Sher, and H. W. Zaglauer, Phys. Lett. B228, 139 (1989);

M. Sher, Phys. Rept. 179, 273 (1989);

running Planck mass

$$M_P^2(k) = M_P^2 + 2\xi_0 k^2$$

infrared cutoff scale k ,

for $k=0$: $M_P = (8\pi G_N)^{-1/2} = 2.4 \times 10^{18} \text{ GeV}$

What if top pole mass is 173 GeV ?

- standard model needs extension around 10^{11} GeV
- scale of seesaw for neutrinos
- heavy triplet ?

