

## Vorlesung „Higgs und Elektroschwache Wechselwirkung“ mit Übungen

Achim Geiser, Benno List

Zeit: Mittwoch, 14:15-15:45 (VL)

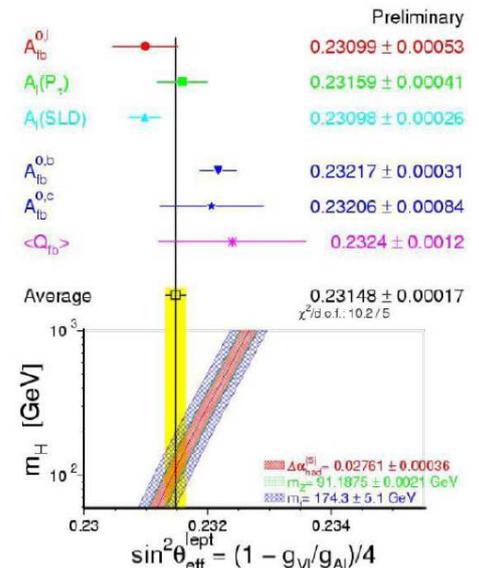
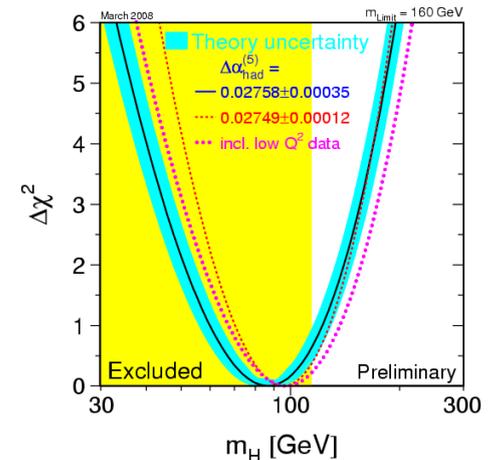
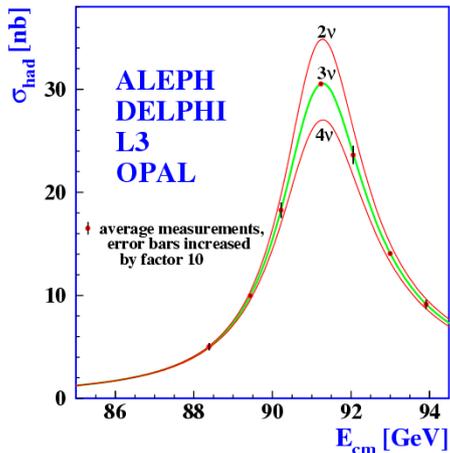
Ort: Sem. 3, Jungiusstraße

Erster Termin: Mittwoch, 2.4.2008

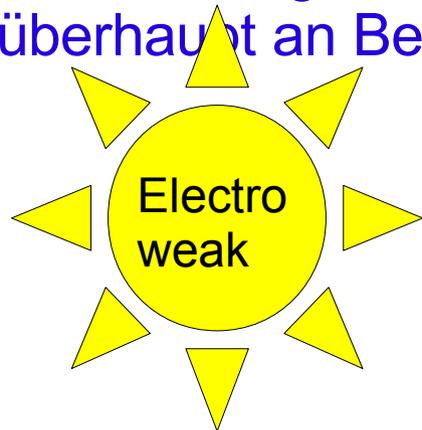
Endgültiger Termin von Vorlesung und Übung werden bei ersten Termin besprochen!

### Inhalt:

- Glashow-Salam-Weinberg-Theorie der schwachen WW
- Higgs-Mechanismus
- Präzisionsmessungen bei LEP
- Phänomenologie des Higgs
- Flavour-Physik (Quarks und Leptonen)
- Probleme des Standardmodells



- Sehr interessanter Teil des SM
- Die Probleme des SM stecken im elektroschwachen Sektor  
=> Weisen den Weg zur Physik jenseits des SM
- Ungelöste Fragen (Higgs? Neutrinos)
  - => Experimentelle Aktivität
  - => Theoretische Aktivität: Erweiterungen des Standardmodells
- Sehr präzise Messungen möglich
  - Erlauben quantitative Überprüfung der Theorie
  - Ermöglichen Blick „über den Tellerrand“:  
Modelle können z.T getestet werden, *bevor* die vorhergesagten Teilchen überhaupt an Beschleunigern erzeugt werden können



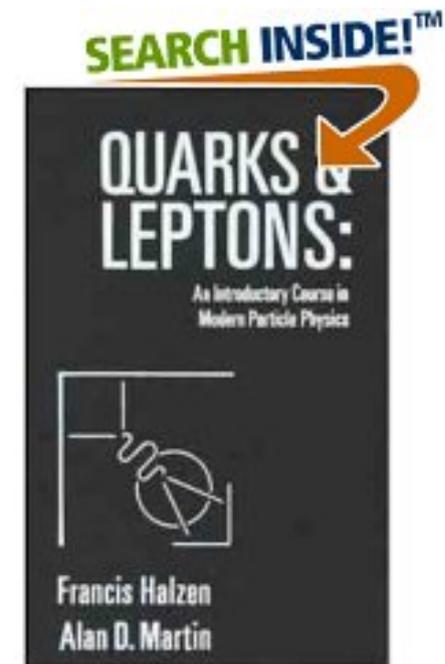
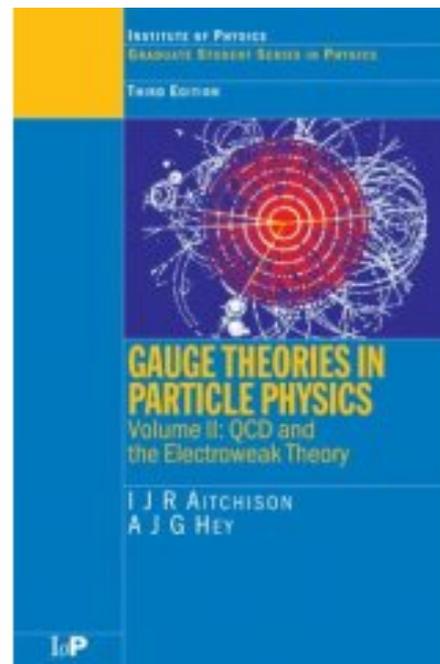
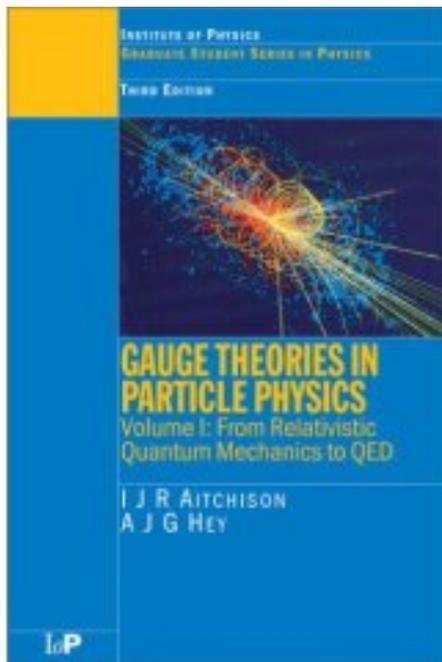
- Baut auf Teilchenphysik für Fortgeschrittene auf
- Kann aber auch parallel gehört werden
- Betonung liegt auf
  - modernem Zugang zur Theorie (Eichprinzip)
  - phänomenologischen Konsequenzen der Theorie
  - experimentellen Fakten
- Die ist
  - keine Theorievorlesung
  - keine Einführung in QFT
  - wir rechnen keine Feynman-Graphen

Web-Page:

[www.desy.de/~blist/vl-ew-ss08/](http://www.desy.de/~blist/vl-ew-ss08/)

- Einführung
- Elektromagnetismus als Eichtheorie
- Glashow-Salam-Weinberg-Theorie
- Higgs-Mechanismus
- Präzisionsmessungen
- Das Top-Quark
- Higgs I: SM-Higgs
- Higgs II: Erweiterte Higgs-Modelle
- Quark-Flavourphysik
- Neutrino-Massen und -Mischung
- Probleme des Standardmodells
- Ausblick

- I.J.R. Aitchison & A.J.G. Hey: Gauge Theories in Particle Physics, 3<sup>rd</sup> ed., IOP Publishing
  - Volume I: From Relativistic Quantum Mechanics to QED, 49EUR
  - Volume II: QCD and Electroweak Theory, 48EUR
  - Alte Auflage (2<sup>nd</sup> ed): Ab 38EUR bei Amazon
- F. Halzen & A.D. Martin: Quarks and Leptons. Wiley. 124EUR



- Schwache WW:
  - Koppelt an linkshändige Fermionen
    - => Linkshändige Fermionen bilden schwache Isospin-Doublets
    - => Rechtshändige Fermionen sind schwache Isospin-Singletts
- Renormierbarkeit: Brauche SU(2) Eichtheorie
- Glashow 1961: Elektromagnetismus: Zusätzliche U(1)  
aber: U(1) entspricht der Hyperladung, nicht der elektrischen Ladung!  $Q = e (t_3 + y/2)$  (Gell-Mann-Nishijima)
- Weinberg 1967 & Salam 1968: SU(2)xU(1) ist spontan gebrochen über Higgs-Mechanismus
  - W- und Z-Bosonen bekommen Masse
  - Photon bleibt masselos
- 't Hooft 1971: Nichtabelsche Eichtheorien (auch spontan gebrochene) sind renormierbar!

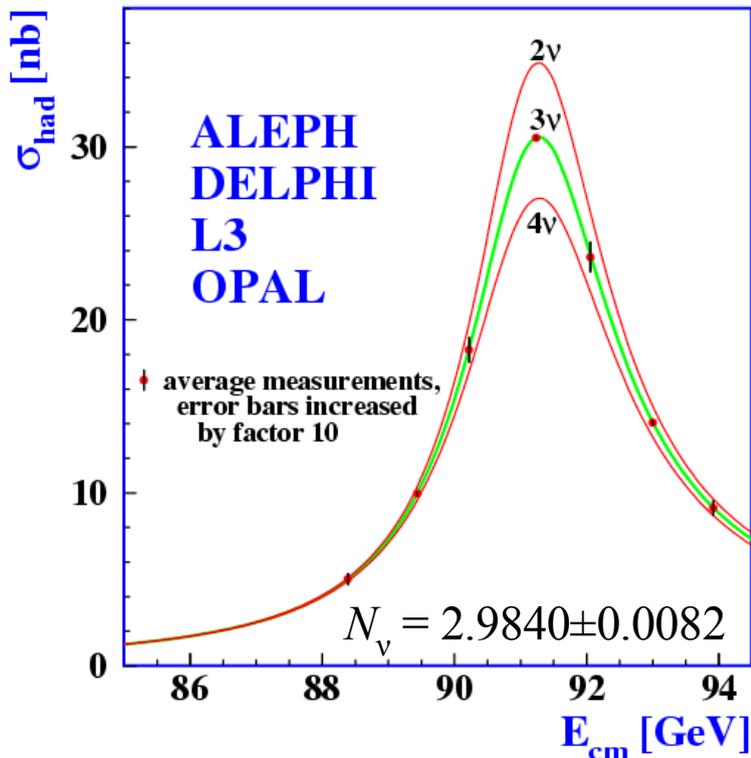
- SU(2) muss gebrochen sein (e/v haben verschiedene Massen)
- Goldstone 1961: Gebrochene Symmetrie führt zu einem masselosen Boson. Problem!
- Higgs 1964 & Kibble 1967: Bei spontan gebrochenen **Eich**symmetrien gibt es keine Goldstone-Boson
- Salam 1968: Spontane Brechung von  $SU(2)_L \times U(1)$  führt zu einem physikalischen Higgs-Boson

## Summary:

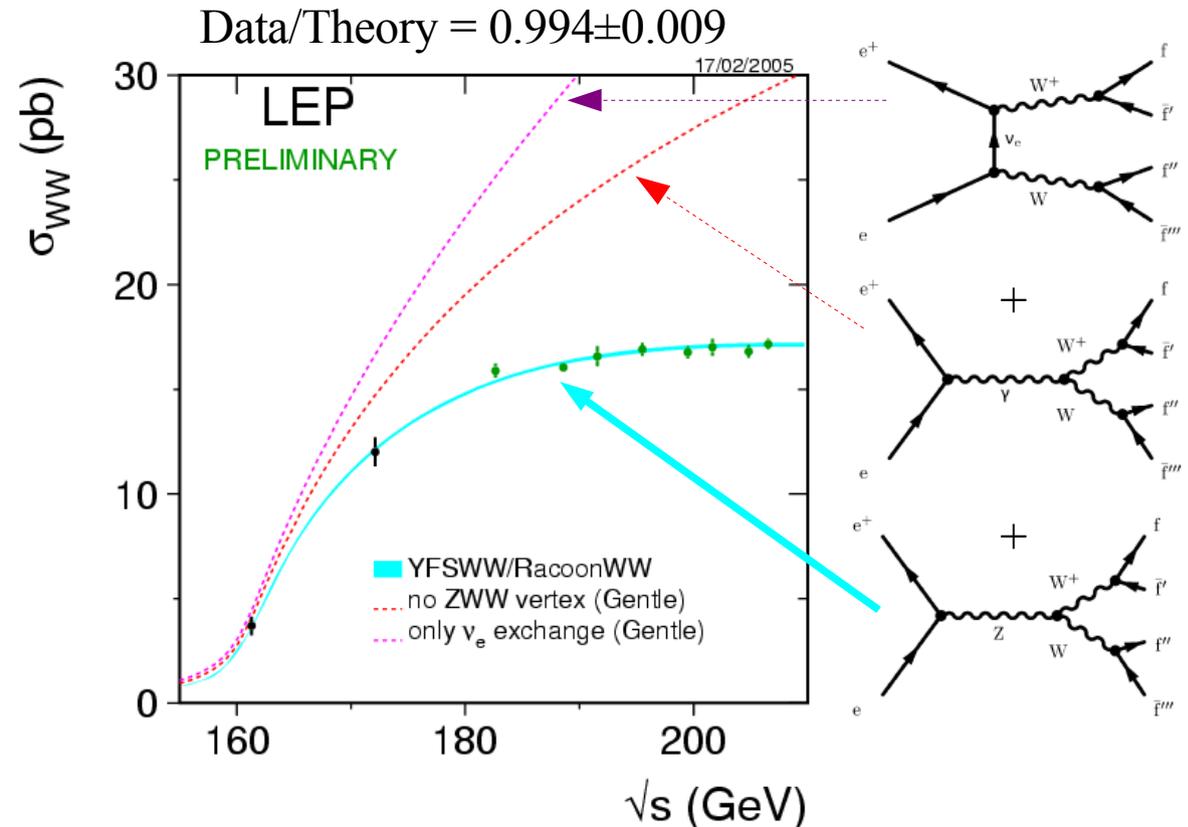
- Wir starten mit einer Eichtheorie  $SU(2)_L \times U(1)_Y$
- Spontane Symmetriebrechung mittels Higgsfeld
- => Massive Vektorbosonen  $W^\pm$ , Vorhersage des  $Z^0$
- Übrig bleibt ein masseloses Eichfeld: das Photon!
- Konsequenz: Alle Fermionmassen kommen auch aus Kopplung an das Higgs!

- GSW-Modell hat 4 fundamentale Parameter:
  - 2 Eichkopplungen  $g, g' \Rightarrow e, \sin\theta_W$
  - 2 Parameter des Higgs-Feldes:  $\lambda, \mu \Rightarrow v$  (Vakuumerwartungswert),  $m_H$
  - Mit diesen Parametern kann man alle Wirkungsquerschnitte, Winkelverteilungen und Boson-Massen vorhersagen!
- Theorem (Veltman): Alle Observablen (außer  $m_H$  selbst) hängen nur logarithmisch von  $m_H$  ab!  
 $\Rightarrow$  Präzise Vorhersagen sind auch ohne Messung von  $m_H$  möglich
- Bestgemessene Größen:  $\alpha_{em} = 1/137, G_F, M_Z$
- Korrekturen höherer Ordnung (Schleifen):  
Hängen von allem ab, „was in den Schleifen umläuft“  
 $\Rightarrow$  Präzisionsmessungen erlauben
  - Tests des Standardmodells
  - Vorhersagen für unbekannte Größen:  $m_{top}, m_H!$

- Breite des Z-Bosons erlaubt Messung der Anzahl (leichter) Neutrino-Generationen
- Anstieg des Wirkungsquerschnittes für  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$  beweist Existenz der WWZ-Kopplung (nichtabelsche Struktur der WW)

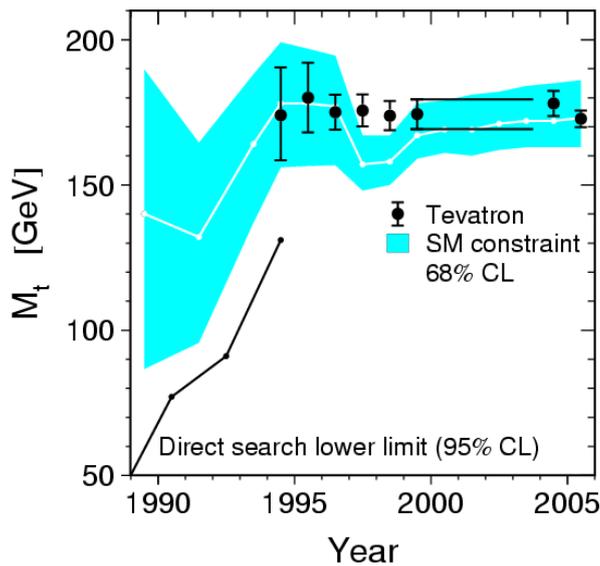


ADLO&SLD, Phys. Rep. 427(2006)257, Fig. 1.13

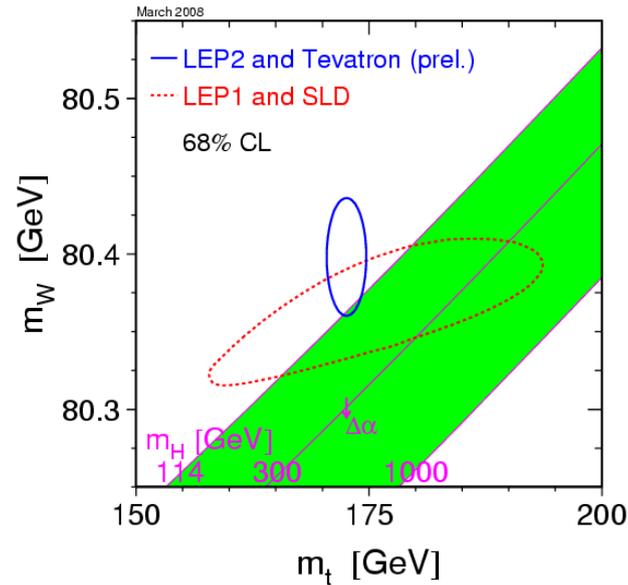


<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/lepww/4f/Winter05/>

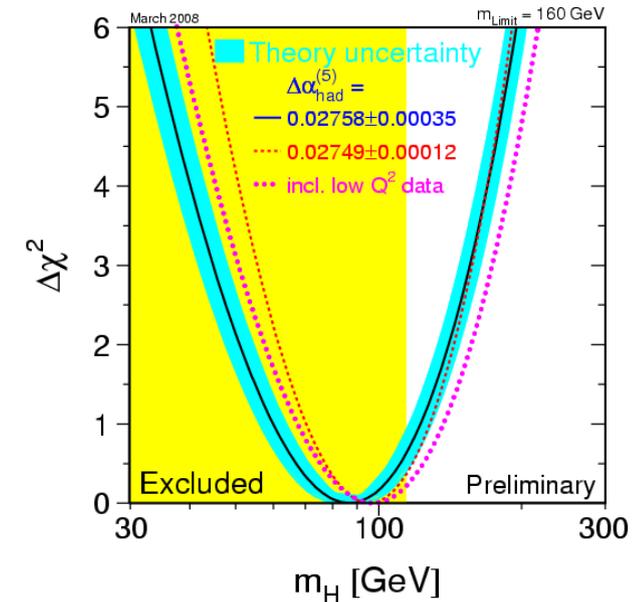
- Beispiel: Vorhersage der Top-Masse aus LEP-Daten vor der TOP-Entdeckung
- Beispiel: Vorhersage der Higgs-Masse



ADLO&SLD, Phys. Rep. **427**(2006)257, Fig. 1.16



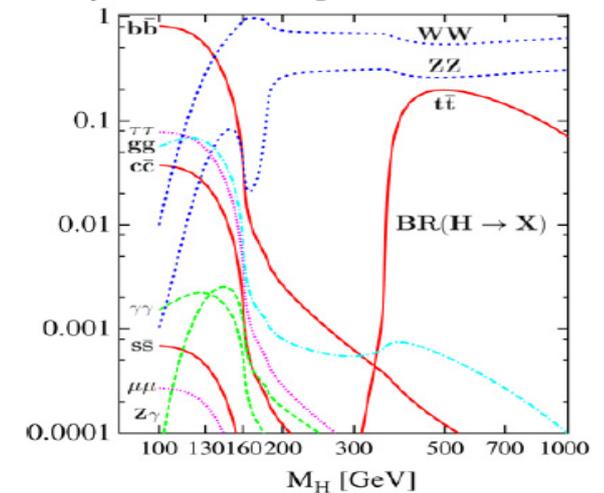
LEP, arxiv:0712.0929, Fig. 2



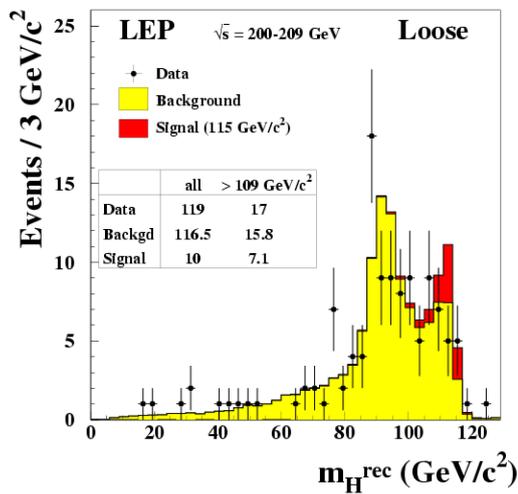
LEP, arxiv:0712.0929, Fig. 5

# Vorschau: SM-Higgs-Phänomenologie

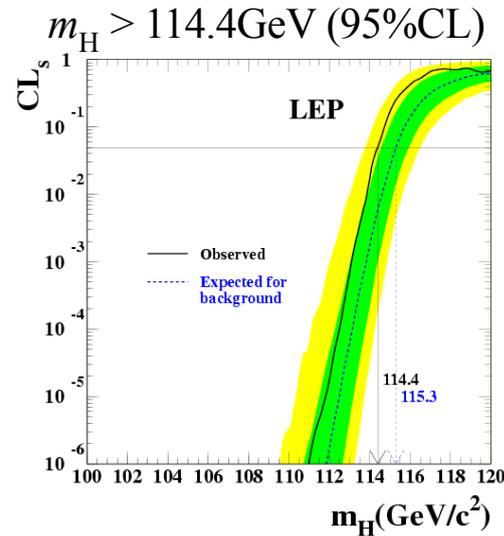
- Eigenschaften des Higgs: Breite, Verzweigungsverhältnisse, Higgs-Selbstkopplung
- Suche nach dem Higgs bei LEP, Tevatron, LHC und ILC
- Messung der Higgs-Eigenschaften



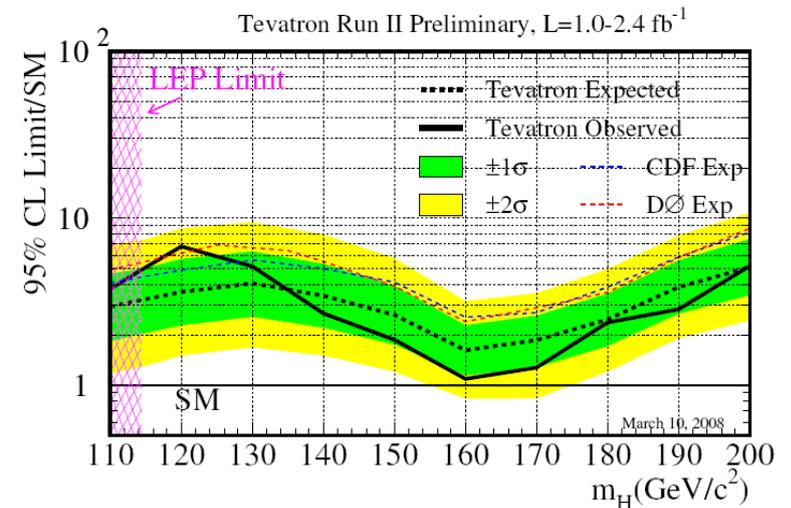
Djouadi, Phys.Rept. **457**(2008)1



LEP, Phys.Lett. **B565**(2003)61.

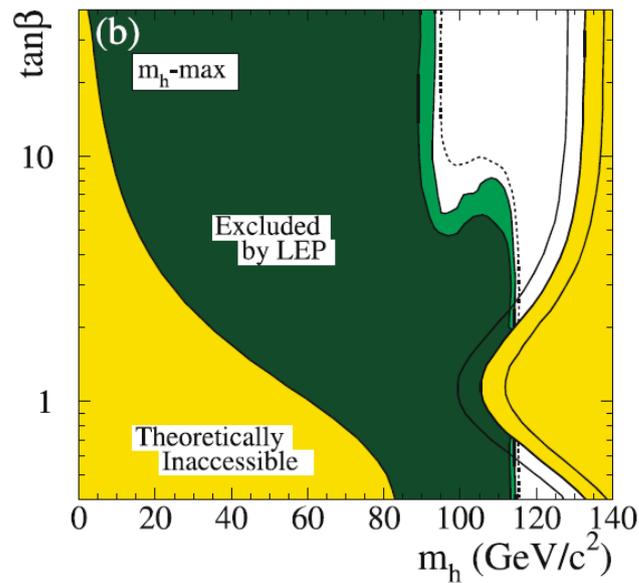


LEP, Phys.Lett. **B565**(2003)61.

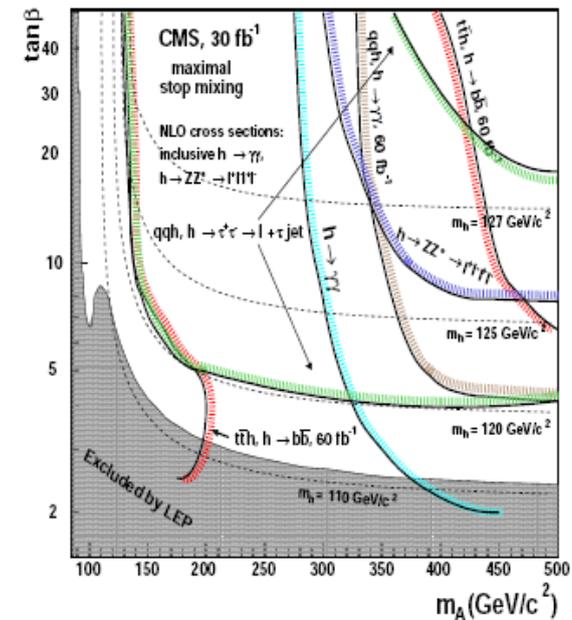


CDF&DØ, Results for winter 08.

- Der einfachste Fall: Genau ein Higgs-(Isospin)dublett  
=> minimales Standard-Modell
- Was passiert, wenn man Higgs-Triplets hat?
- Was passiert, wenn man mehr als ein Higgs-Dublett hat?  
(Supersymmetrie fordert 2 Higgs-Dubletts!)
  - 5 physikalische Higgs-Bosonen:  $h^0, H^0, H^\pm, A^0$

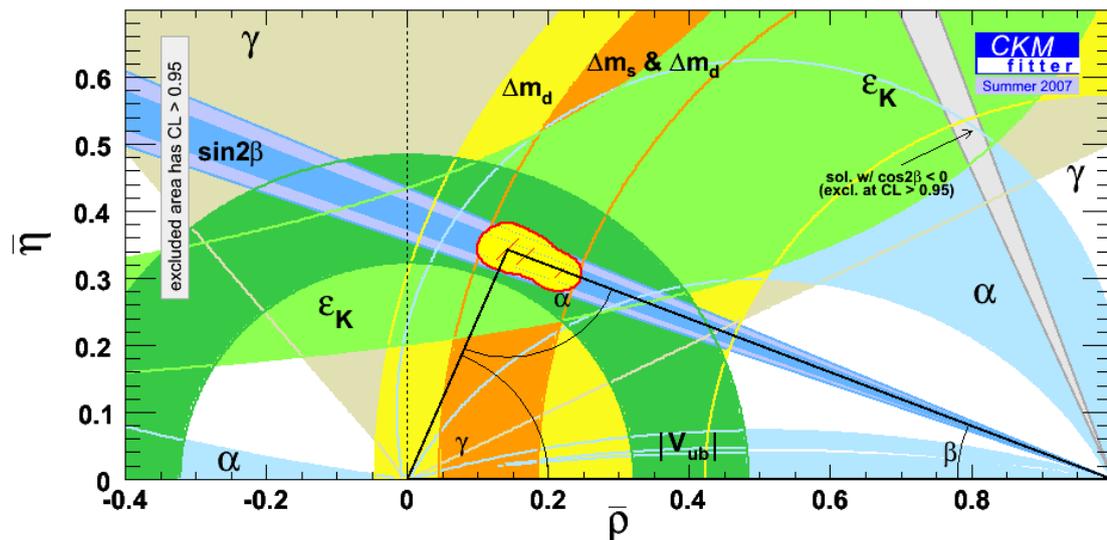


LEP, Eur.Phys.J. **47**(2006)547, Fig. 7



Djouadi, hep-ph/0503173, Fig. 3.37

- Quarks erhalten Massen durch Kopplung an das Higgs-Feld
- Im allgemeinen Fall: Massenmatrix!  
=> Flavour-Eigenzustände sind nicht Masseneigenzustände
- Diagonalisierung der Massenmatrix führt auf die Cabibbo-Kobayashi-Maskawa-Matrix (CKM)  
=> Quark-Mischung ist eine direkte Folge des Higgs-Mechanismus!
- CKM-Matrix hat eine nichtriviale Phase => CP-Verletzung!



CKM Fitter: [http://www.slac.stanford.edu/xorg/ckmfitter/ckm\\_results\\_summer2007.html](http://www.slac.stanford.edu/xorg/ckmfitter/ckm_results_summer2007.html)

- Evidenz für Neutrino-Massen:
  - Atmosphärische Neutrinos
  - Solare Neutrinos
  - Direkte Experimente (KamLAND)
- Massive Neutrinos  $\Leftrightarrow$  Neutrino-Oszillationen
- Zwei mögliche Quellen für Neutrino-Massen:
  - Dirac-Masse (über Kopplung an Higgs)
  - Majorana-Masse  $\Rightarrow$  verletzt Leptonzahl, Neutrino=Antineutrino, ermöglicht „See-Saw-Mechanismus“ (mögliche Erklärung für Kleinheit der Neutrinomassen)
- Neutrino-Mischung ermöglicht CP-Verletzung im Leptonsektor  $\Rightarrow$  offene Frage!

- Gibt es das Higgs-Boson?
  - Welche Masse hat das Higgs?
  - Gibt es mehrere Higgs-Bosonen?
- Sind Neutrinos Dirac- oder Majorana-Teilchen?
  - Welche Masse haben die Neutrinos?
- Gibt es CP-Verletzung im Neutrino-Sektor?
- Ist die elektrische Ladung wirklich quantisiert?
- Wie groß ist die Proton-Lebensdauer?
- Gibt es ein elektrisches Dipolmoment des Neutrons?

## „Work in Progress“: Lösungsansätze vorhanden

- Wie kann die elektroschwache Skala soviel kleinerer als die GUT- oder die Planck-Skala sein?
- Kann man elektroschwache WW und QCD vereinheitlichen?
- Woher kommt die Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum?
- Was ist dunkle Materie?

## „No Idea“: Lösung in weiter Ferne

- Wie kann man eine Quantentheorie der Gravitation formulieren?
- Kann man die vielen freien Parameter des Standardmodells aus einer fundamentaleren Theorie herleiten?
- Warum sind die Massen der Fermionen so unterschiedlich?
- Was ist dunkle Energie?