

## 10. Gültigkeitsgrenzen für das Standardmodell:

### Experimente an Beschleunigern

- Standardmodell: Nicht die letzte Antwort
  - Anzahl der Parameter
  - unbeantwortete Fragen
  - (innere) Probleme
- Vereinigung der Wechselwirkungen
- Erweiterungen / Abwandlungen des Standardmodells und experimentelle Resultate
  - GUT - Theorie (SU(5))
  - Super-symmetrie (SUSY)
  - Technicolour
  - $Z'$

# Standardmodell: Nicht die letzte Antwort

So erfolgreich das Standardmodell (= elektroschwache plus starke Theorie) alle Präzisionstests gemeistert hat: Es ist bereits heute klar, daß noch es noch eine allgemeinere und umfassendere Theorie geben muß. Gründe für diese Überzeugung:

## 1) Anzahl der Parameter im Standardmodell:

18

### ► Kopplungen:

$g_{em}, G_F, \alpha_s$

3

### ► Fermionmassen:

$m_f, f = q, l^\pm, (\nu)$

9 (+3,  $m_\nu \neq 0$ )

### ► Higgs - Bosonmasse:

$m_H$

1

### ► schwacher Mischungswinkel:

$\sin^2 \theta_w$

1

### ► Quarkmischung & CP-Verletzung

CKM-Matrix + Phase  $\delta_{13}$

4 (+4,  $m_\nu \neq 0$ )

# Unbeantwortete Fragen im Standardmodell

Drei große Kategorien offener Fragen:

- **Problem der Teilchenmassen:**  
Stammen Teilchenmassen tatsächlich aus der Kopplung an das Higgs-Boson?
- **Problem der Vereinheitlichung der Wechselwirkungen:**  
Können alle Teilchen-Wechselwirkungen vereinheitlicht beschrieben werden und, wenn ja, folgen daraus neue beobachtbare Phänomene (Baryonzerfall, Neutrinomassen) und Relationen für Kopplungen sowie Fermionmassen?
- **Problem der Flavours (Teilchensorten):**  
Was ist der Ursprung der sechs Flavours für die Quarks sowie Leptonen und wie erklärt sich die Mischung der elektroschwachen Eigenzustände und die CP-Verletzung?

# Innere Probleme des Standardmodells ...

... zeigen an, daß das Standardmodell nicht für alle denkbar möglichen Energien als beschreibende Theorie anwendbar ist

- **Standardmodell ist nicht asymptotisch frei**  
betrachte Photonenaustausch (z.B. bei electrom. Bindung)

The diagram shows a vertical wavy line representing a photon. It is equal to the sum of three terms: 1) a vertical wavy line (the tree-level propagator), 2) a wavy line with a fermion loop (a circle with two fermion lines) attached to it, and 3) a wavy line with a fermion loop and a photon loop (a circle with a photon line) attached to it. This represents a perturbative expansion of the photon propagator.

$$= \frac{1}{1 - \left[ \text{loop} \right]}$$

(wie eine geometr. Reihe)

$$\Rightarrow \alpha_{em}(Q^2) = \frac{\alpha_{em}(\mu^2)}{1 - \frac{\alpha_{em}(\mu^2)}{3\pi} \ln \frac{Q^2}{\mu^2}}$$

hat Pol bei  $Q = \mu \cdot \exp\left(\frac{3\pi}{\alpha_{em}}\right) \sim 10^{550} \text{ GeV}$

jenseits der Energieskala, die durch die Planck-Masse gegeben ist:  $m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$

→ S. Modell: Approximation einer fundamentaleren Theorie bei kleinen Energien?

# Innere Probleme des Standardmodells...

## • Hierarchie und Natürlichkeit

"Neue" Physik bei  $\Lambda = m_{pl} = 10^{19} \text{ GeV}$  oder bei  $m_{GUT} = 10^{16} \text{ GeV}$

Aber warum ist el. schwache Skala  $m_w \ll m_{pl}$  ?

oder: Warum ist  $G_F \gg G_N$  (Gravitat.konst) ?

→ Hierarchie-Problem durch sehr unterschiedliche Massenskalen. Betrachte Fermionschleifenkorrekturen zum Higgs:

zum Higgs:

$$\Rightarrow m_H^2(m_w) = m_H^2(\Lambda) + c g_w^2 \Lambda^2$$

Dies gilt generell in Modellen mit 1 fundamentalem Boson

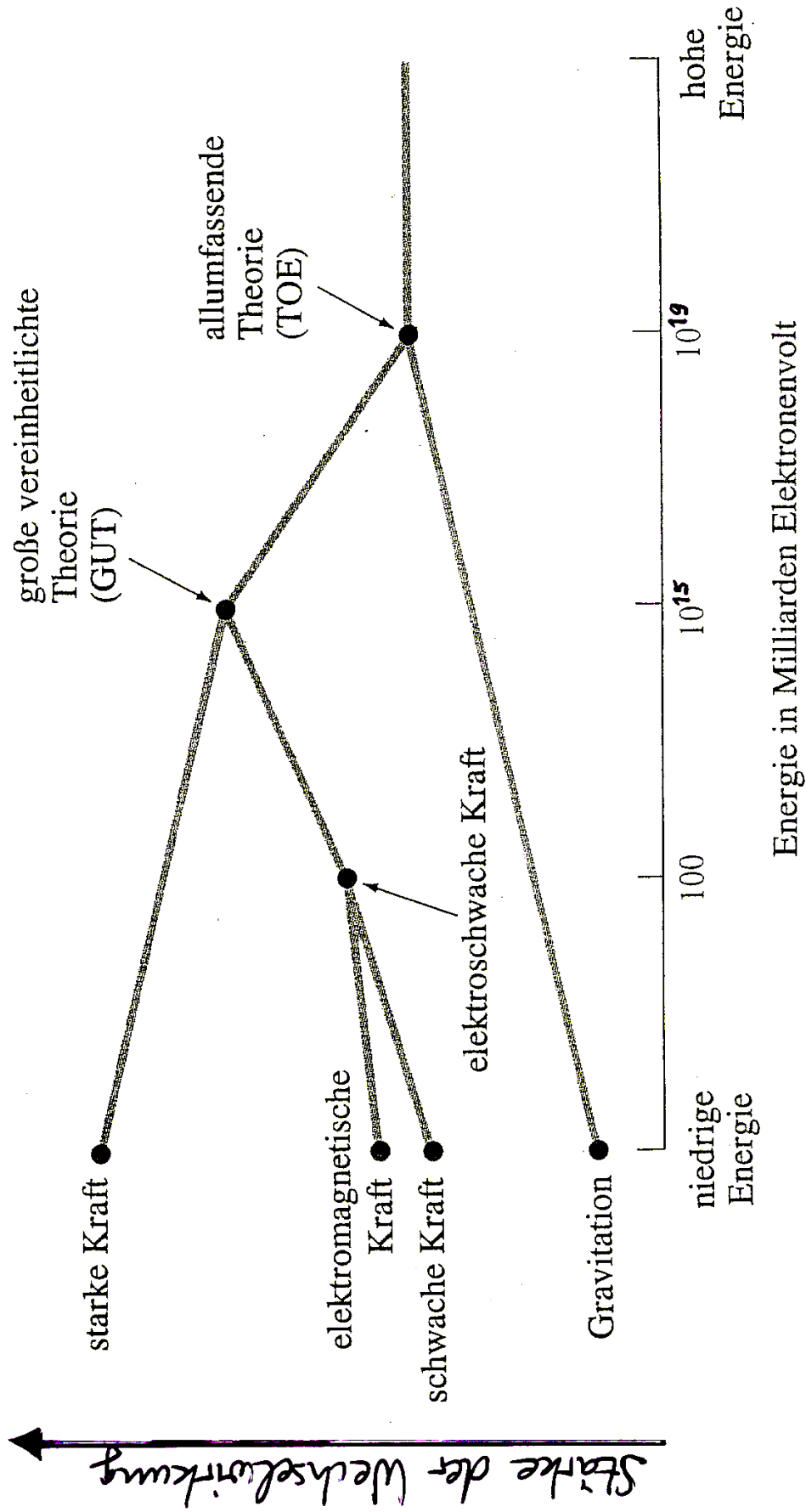
Falls  $m_H \ll \Lambda \Rightarrow$  Feinabstimmung der Parameter oder

$$c \approx 0 \rightsquigarrow m_H(m_w) = m_H(\Lambda)$$

$$\Rightarrow \text{natürlicher Wert } m_H = \mathcal{O}(m_w)$$

⇒ Es wird eine Energieskala  $\Lambda$  für "neue" Physik benötigt, die  $\Lambda \ll m_{pl}$  erfüllt! Oder die "neue" Physik muß  $c \approx 0$  sicherstellen!

# Der Weg zur Vereinheitlichung aller Kräfte?

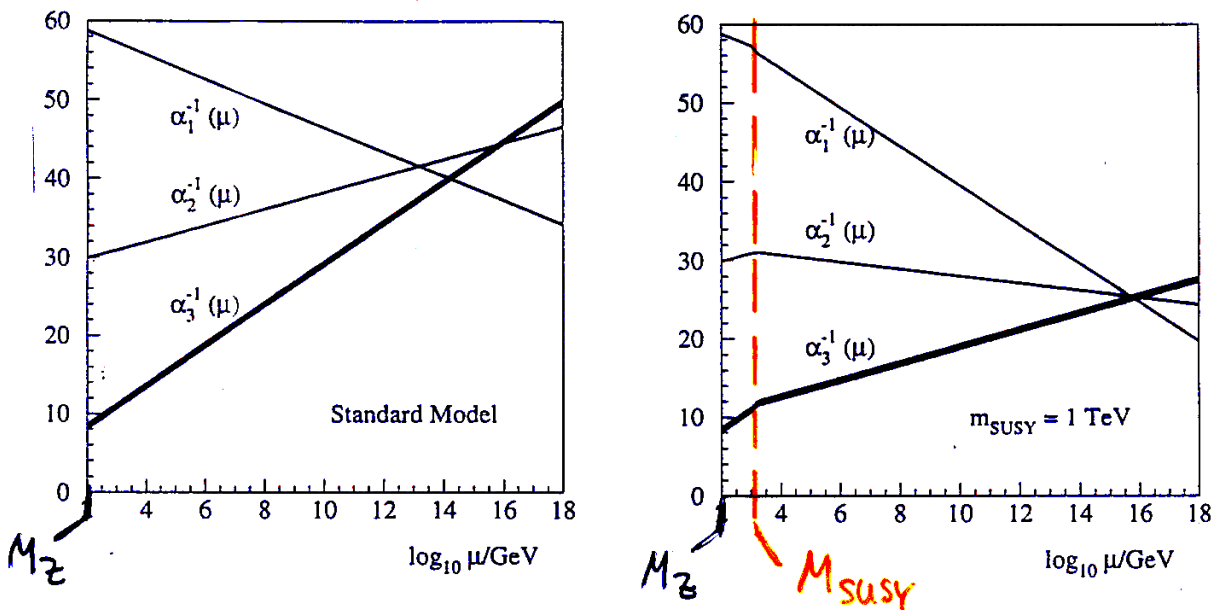


# Vereinheitlichung der Kopplungen bei GUT-Skala

Renormierte Kopplungen des Standardmodells sind energieabhängig (Auflösung der Vakuumpolarisation), berechenbar durch Renormierungsgruppen-Gleichungen (RGE)  
 Parametrisierung der Standardmodell-Kopplungen für eine GUT (große vereinheitlichte Theorie von el. schw + stark)

$$\alpha_1 \equiv \frac{5}{3} \cdot 4\pi g_z^2 \sin^2 \theta_w; \alpha_2 = 4\pi g_w^2; \alpha_3 \equiv \alpha_s$$

J. Mnich/Physics Reports 271 (1996) 181-266



Vereinigung der Kopplungen durch geeignete zusätzl. Schwelle:

Anpassung: Schwelle bei  $10^{3 \pm 1}$  GeV

Vereinigung bei  $10^{16 \pm 1}$  GeV

Schwelle  $\hat{=}$  Skala der neuen physikal. Prozesse ( $\leadsto$  neue Teilchen!)

# Erweiterungen des Standardmodells

- **GUT** (große vereinheitlichte Theorie):  
muß die Eichgruppen von starker ( $SU(3)_{\text{colour}}$ ) und elektroschwacher Theorie ( $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$ ) umfassen.  
M.a.W. die GUT-Gruppe muß  $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$  als Untergruppe beinhalten. Die kleinste solche Gruppe ist  **$SU(5)$** . In  $SU(5)$  sind die Fermionen in 5-pletts:  
 $\bar{5} = (\bar{d}_r, \bar{d}_g, \bar{d}_b, \nu_e, e^-)_{\text{links}}$   
oder 10-pletts

$$10 = \left( \begin{array}{ccc|cc} 0 & \bar{u}_r - \bar{u}_g & & d_b & u_b \\ \cdot & 0 & \bar{u}_b & d_g & u_g \\ \cdot & \cdot & 0 & d_r & u_r \\ \hline \cdot & \cdot & \cdot & 0 & e^+ \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \end{array} \right)_{\text{links}}$$

angeordnet. (Man beachte die Blockstruktur: links oben ein  $3 \times 3$  Block der  $SU(3)$ , rechts unten ein  $2 \times 2$  Block der  $SU(2)$ , die  $2 \times 3$  Blöcke sind dann Kombinationen von  $SU(3)$  und  $SU(2)$ , die Punkte " $\cdot$ " sind durch die hermitisch-konjugierten Elemente zu ersetzen)

Die Erhaltung der elektr. Ladung erzwingt die Spurfreiheit der (irreduziblen) Darstellungen von  $SU(5)$ ,  
d.h.  $Sp(\bar{5}) = 3 \cdot \frac{1}{3} + 0 + -1 \stackrel{!}{=} 0$   
womit die Drittelzahligkeit der Quarks begründet wäre!  
(Auch Gleichheit von Elektron- & Protonladung ergibt sich zwanglos!)



# SU(5) - GUT - Theorie

An der Vereinigungsskala  $\Lambda_{\text{GUT}}$  sind alle Kopplungs-  
konstanten gleich:

$$g_{\text{GUT}}^2(\Lambda_{\text{GUT}}) = g_w^2(\Lambda_{\text{GUT}}) = \frac{3}{5} \cdot [g_z^2(\Lambda_{\text{GUT}}) - g_w^2(\Lambda_{\text{GUT}})] = \underbrace{4\pi \alpha_s(\Lambda_{\text{GUT}})}_{\approx g_s^2}$$

speziell für SU(5)-GUT für abelsche  
U(1)-Untergruppen-Kopplungskonst.

Da  $g_w = e/\sin\theta_w$  und  $g_z = e/\cos\theta_w \sin\theta_w$  gilt, kann  
man den Wert von  $\sin\theta_w$  bei  $\Lambda_{\text{GUT}}$  ausrechnen!

Diesen Wert "rennt" man mittels der Renormierungsgruppe-  
Gleichung von  $\Lambda_{\text{GUT}}$  zu  $m_Z$  herunter, um mit  
experimentellen Resultaten zu vergleichen:

$$\Rightarrow \sin^2\theta_w = \frac{3}{8} - \frac{55}{24\pi} \cdot \alpha_{\text{em}}(m_Z) \cdot \ln\left(\frac{\Lambda_{\text{GUT}}}{m_Z}\right)$$

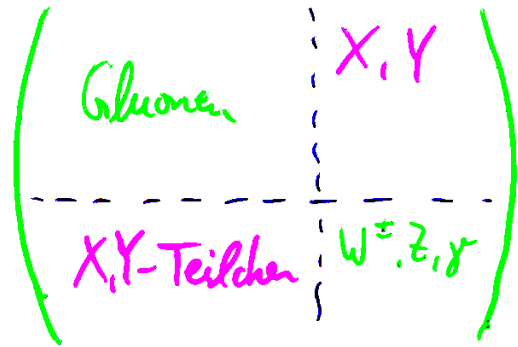
↖  $\sim 10^{13} \text{ GeV}$   
↗  $\sim 91.2 \text{ GeV}$   
↖  $1/128.8$

$$\Rightarrow \sin^2\theta_w(m_Z) \approx 0.23$$

Experimentelle Messung:  $\sin^2\theta_w(m_Z) = 0.2229 \pm 0.0004$   
zeigt Übereinstimmung mit berechnetem Wert in der  
richtigen Größenordnung. Trotzdem hat SU(5)-GUT  
Probleme, z. B. treffen sich die Kopplungen nicht  
in einem Punkt bei  $\Lambda_{\text{GUT}}$  und außerdem ...

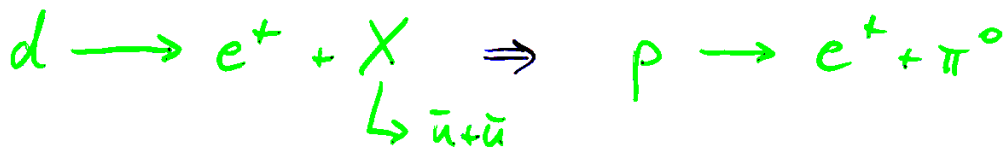
## Problem der SU(5)-GUT-Theorie

... sagt Proton-Zerfall voraus. Betrachte dazu den Sektor der Eich- bzw. Wechselwirkungsteilchen:



$\Rightarrow$   $X, Y$ -Teilchen mit  $-\frac{4}{3}, -\frac{1}{3}$  el. Ladung und Quark & Leptoneigenschaft

►  $X, Y$ -Teilchen verursachen Protonenzerfall:



Berechnete Proton-Lebensdauer in SU(5)-GUT (hängt von Masse des  $X$ -Teilchens ab und  $m_X \approx \Lambda_{\text{GUT}}$ )

$$\tau_p \sim 10^{30} \text{ Jahre}$$

$$\text{Exp.: } \tau_p > 10^{32} \text{ Jahre}$$



$\Rightarrow$  Deswegen wird heute die SU(5)-GUT-Theorie als ausgeschlossen betrachtet, obwohl sie viele weitere Erklärungen anbietet, z.B. für die Baryon-Antibaryon-Asymmetrie im Universum, allerdings auch die Existenz magnetische Monopole mit sehr hohen Massen.

# Supersymmetrie

... ist eine Symmetrie, die die kraftvermittelnden Bosonen mit den Materiebausteinen Fermionen verknüpft. Jedes Teilchen, Fermion wie Boson, hat einen supersymmetrischen Partner mit identischen Quantenzahlen bis auf den Spin:

● Teilchen im minimalen supersym. Standardmodell MSSM

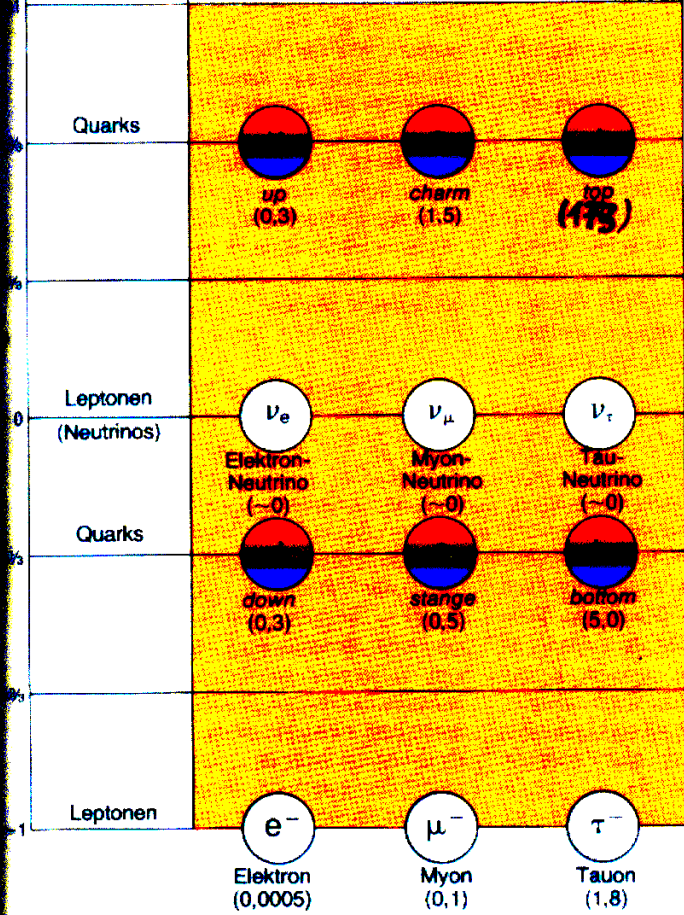
| Spin 0                                      | Spin 1/2  | Spin 1      |
|---|---|-------------|
| $\tilde{L}, \tilde{\nu}$ (skalare Leptonen) | $l, \nu$  |             |
| $\tilde{q}$ (skalare Quarks)                | $q$   |             |
|   | $\tilde{g}$ (Gluino)  | $g$         |
| $h, H, A$                                   | $\tilde{\chi}_0^0, \tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0$ } mischen zu 4 Neutralinos | $\gamma, Z$ |
| $H^\pm$                                     | $\tilde{W}^\pm, \tilde{H}^\pm$ } mischen zu 2 Charginos $\tilde{\chi}_j^\pm, j=1,2$                 | $W^\pm$     |

● mindestens zwei Higgs-Dubletten  $8-3=5$  Higgs-Teilchen

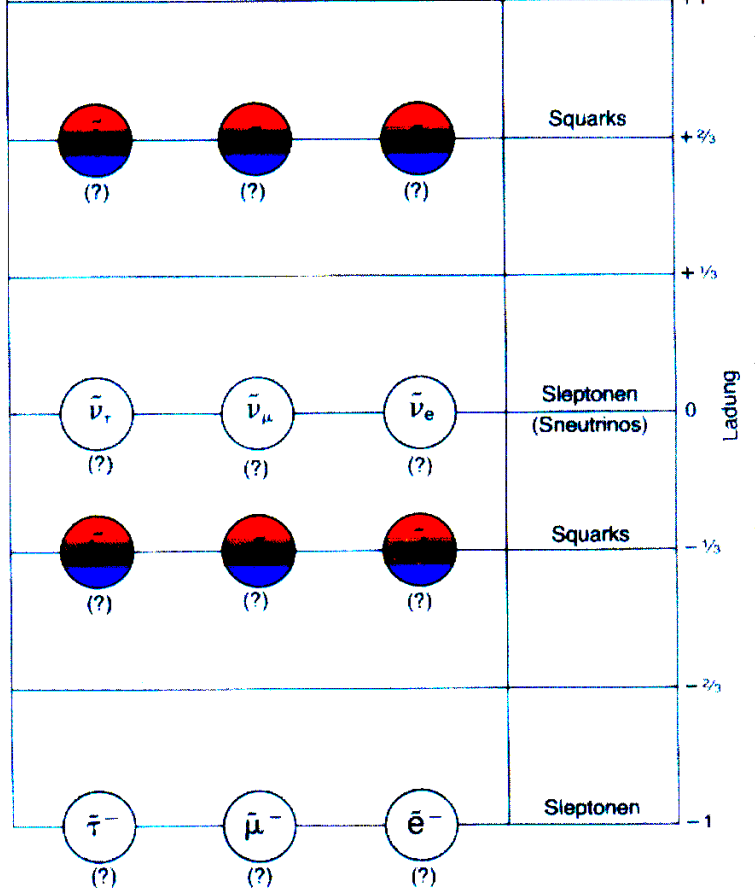
$h, H, A, H^+, H^-$

● R-Parität :  $R = (-1)^{3B + L + 2S}$  ist erhalten  
 ⇒ leichtestes SUSY-Teilchen LSP ist stabil!  
 Baryon-, Leptonzahl, Spin

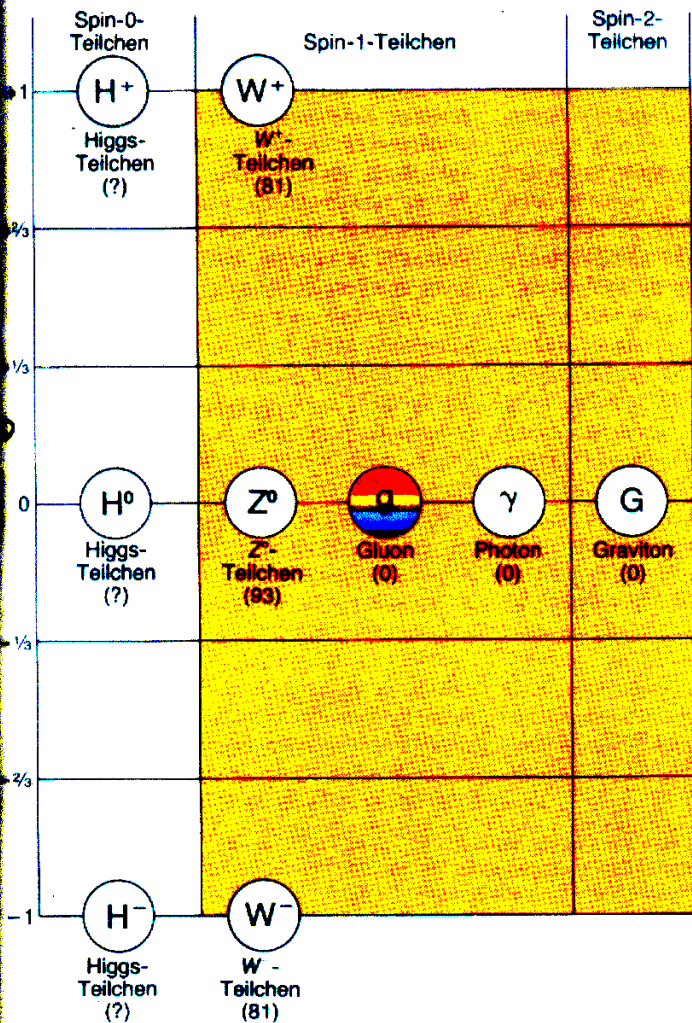
Elementarteilchen  
(Fermionen: Spin-1/2-Teilchen)



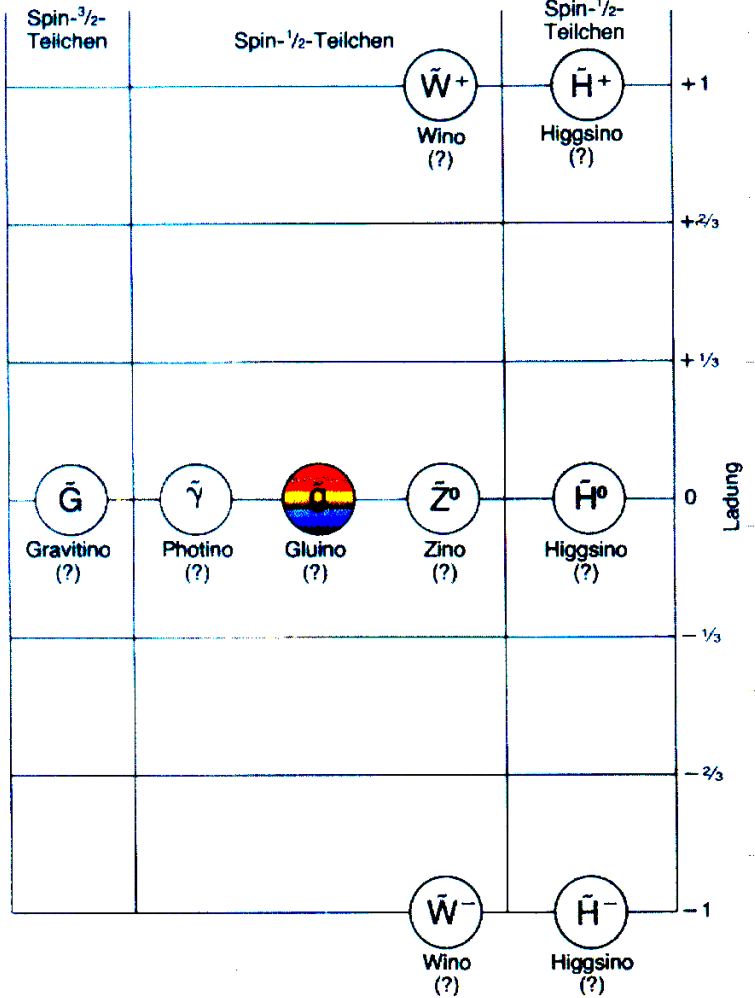
ihre Superpartner  
(Bosonen: Spin-0-Teilchen)


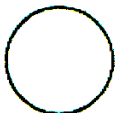
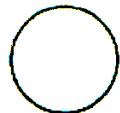

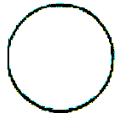
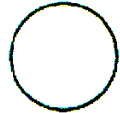
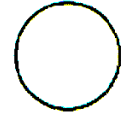



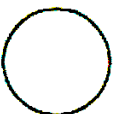
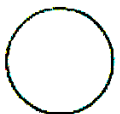

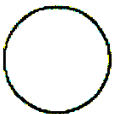
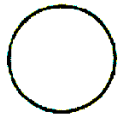
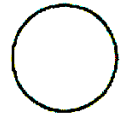
kraftvermittelnde Teilchen (Bosonen)



ihre Superpartner



|  |   |
|--|---|
| <p>Quarks</p>                                       | <p>B <math>\frac{1}{3}</math></p> <p>L 0</p> <p>S <math>\frac{1}{2}</math></p> <p>R 2</p> <p><math>36 = 3 \times 6 = 3 \times (2 \times 3) = 3 \times (2 \times 3 \times 2) = 3 \times 6 \times 2 = 36</math></p> |
| <p>Leptonen</p>                                     | <p>B 0</p> <p>L 1</p> <p>S <math>\frac{1}{2}</math></p> <p>R 2</p>  |
| <p>Photon</p>                                       | <p>B 0</p> <p>L 0</p> <p>S 1</p> <p>R 2</p>   |
| <p>Gluon</p>                                        | <p>B 0</p> <p>L 0</p> <p>S 1</p> <p>R 2</p>   |
| <p>W<sup>+</sup>-W und Z<sup>0</sup>-Teilchen</p>  | <p>B 0</p> <p>L 0</p> <p>S 1</p> <p>R 2</p>   |
| <p>Graviton</p>                                   | <p>B 0</p> <p>L 0</p> <p>S 2</p> <p>R 4</p>   |
| <p>Higgs-Teilchen</p>                             | <p>B 0</p> <p>L 0</p> <p>S 0</p> <p>R 0</p>   |

|   |  |
|---|--|
| <p>Squarks</p>       | <p>B <math>\frac{1}{3}</math></p> <p>L 0</p> <p>S 0</p> <p>R 1</p> |
| <p>Sleptonen</p>     | <p>B 0</p> <p>L 1</p> <p>S 0</p> <p>R 1</p>                        |
| <p>Photino</p>       | <p>B 0</p> <p>L 0</p> <p>S <math>\frac{1}{2}</math></p> <p>R 1</p> |
| <p>Gluino</p>        | <p>B 0</p> <p>L 0</p> <p>S <math>\frac{1}{2}</math></p> <p>R 1</p> |
| <p>Winos, Zino</p>  | <p>B 0</p> <p>L 0</p> <p>S <math>\frac{1}{2}</math></p> <p>R 1</p> |
| <p>Gravitino</p>   | <p>B 0</p> <p>L 0</p> <p>S <math>\frac{3}{2}</math></p> <p>R 3</p> |
| <p>Higgsino</p>    | <p>B 0</p> <p>L 0</p> <p>S <math>\frac{1}{2}</math></p> <p>R 1</p> |

# Supersymmetrie

## Vorteile:

- Beinhaltet das präzise getestete Standardmodell der el. schwachen & starken Ww.
- Löst das Hierarchie-Problem, da  $\Lambda_{\text{susy}} \approx 1 \text{ TeV}$  und da

$$\text{H} \text{---} \text{O} \frac{f}{f} \text{---} \text{H} \quad + \quad \text{H} \text{---} \text{O} \frac{\tilde{f}}{\tilde{f}} \text{---} \text{H}$$

sich gegenseitig aufheben  $\rightarrow c=0$  falls  $|m_f^2 - m_{\tilde{f}}^2| \lesssim 1 \text{ TeV}$

- Theorie kann berechnet werden
- sagt viele neue Teilchen vorher
- bringt GUT-Vereinheitlichung wieder ins Spiel
- ...

## Nachteile:

- Symmetrie ist offensichtlich gebrochen, da kein supersym. Partner des Elektrons, etc. beobachtet wurde, d.h.  $m_f \neq m_{\tilde{f}}$
- bringt zusätzlich zu den 18 Parametern des Standardmodells weitere **106 Parameter**  
21 Massen, 41 Mischungswinkel, 43 CP-verletzende Phasen, 1 Vakuumerwartungswert für zweites Higgs-Dublett



# Supersymmetrie

...Nachteile:

- hat phänomenologische Defizite:
  - ▷ keine Erhaltung der separaten Leptonenzahlen  $L_e, L_\mu, L_\tau$
  - ▷ keine Unterdrückung von flavour-ändernden Wechselwirkungen durch neutrale Eichbosonen z.B.  $Z \begin{matrix} \swarrow \\ \searrow \end{matrix} \begin{matrix} u \\ \bar{e} \end{matrix}$
  - ▷ viele neue Quellen für CP-Verletzung, die inkonsistent mit den experimentellen Grenzen sind

⇒ Nahezu der gesamte 124 dimensionale Parameter-  
raum des MSSM ist ausgeschlossen! MSSM "lebt"  
nur in sehr speziellen Punkten des gesamten Parameter-  
raumes

- Reduzierung der Parameter durch Annahmen:
    - ▷ Vereinigung der "Eichbosino"-Massen bei  $m_{\text{GUT}} (= \Lambda_{\text{GUT}})$   
 $M_1(m_{\text{GUT}}) = M_2(m_{\text{GUT}}) = M_3(m_{\text{GUT}}) \equiv m_{1/2}$
    - ▷ Vereinigung der s-Fermionmassen bei  $m_{\text{GUT}}$   
 $m_{\tilde{f}}(m_{\text{GUT}}) \equiv m_0$
- ⇒ Massen bei anderen Energieskalen werden durch Renormierungsgruppen-Gleichung berechnet

## MSSM-Parameter

beschreiben Massen, Wirkungsquerschnitte, Verzweigungsverhältnisse von Charginos und Neutralinos

- $M_2$  SU(2) Gauginomasse ( $\tilde{W}^\pm, \tilde{Z}$ ) an el. schwachen Skala ( $m_w$ )
- $\tan\beta = \frac{v_2}{v_1}$  Verhältnis der Vakuumerwartungswerte der beiden Higgs-Dubletts
- $\mu$  Skala der Higgsino-Masse ( $>0$  oder  $<0$ )
- $m_0$  Massenskala der skalaren Fermionen  $m_{\tilde{f}}(m_{\text{GUT}}) = m_0$
- $A$  trilineare Kopplung ( $H\tilde{q}\tilde{q}$  und  $H\tilde{\ell}\tilde{\ell}$ :  $A = A_c = A_u = A_d$ )

Parametersatz entspricht einem beschränkten SUSY-Modell (CMSSM), da Universalität der SUSY-Parameter an GUT (oder Supergravitations-) Skala angenommen wird

z.B.  $m_{\tilde{f}}(m_{\text{GUT}}) = m_0$

Außerdem: R-Paritätserhaltung

→ Leichtestes SUSY-Teilchen (LSP) ist stabil, neutral und trägt keine Farbe

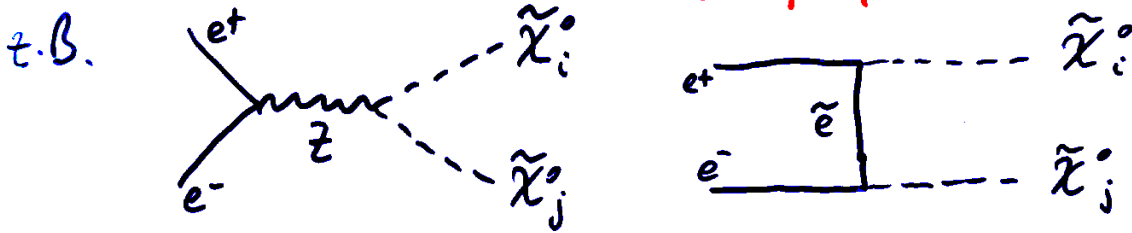
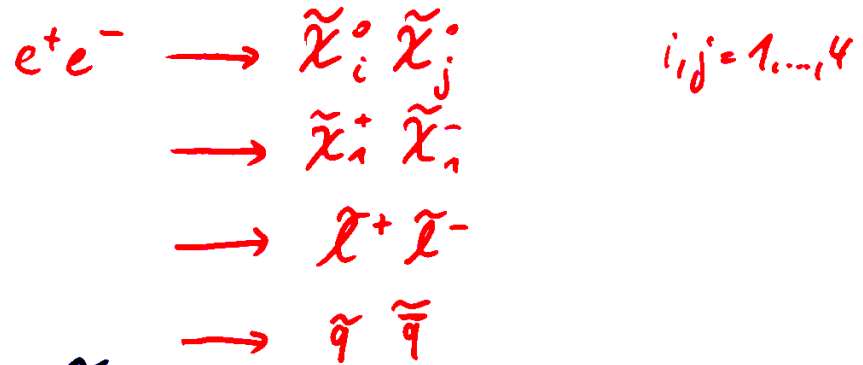
→ LSP ist schwach wechselwirkend

Kandidaten für LSP:  $\tilde{\chi}_1^0$  oder  $\tilde{\nu}$  oder Gravitino



# Experimentelle Signaturen

- SUSY-Produktion:



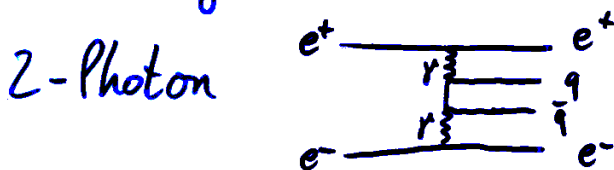
- Zerfall der SUSY-Teilchen:

- ▷  $\tilde{\chi}_i^\pm \longrightarrow \tilde{\chi}_i^0 q \bar{q}', \tilde{\chi}_i^0 l \nu, \tilde{\nu} l$
- ▷  $\tilde{\chi}_i^0 \longrightarrow \tilde{\chi}_i^0 q \bar{q}, \tilde{\chi}_i^0 \gamma$   $i = 2, 3, 4$
- ▷  $\tilde{\chi} \longrightarrow \tilde{\chi}_i^0 l$

wobei LSP ( $\tilde{\chi}_i^0$ ) ähnlich wie Neutrinos ungesehen dem Detektor entkommt  $\longrightarrow$  fehlende Energie & Impuls

- Signatur und Untergrund von  $\Delta M = m_{\text{SUSY}} - m_{\text{LSP}}$  abhängig

- SM-Untergrund:



W-Paarproduktion, radiative 2-Fermion-Endzustände, ...

## Resultat der SUSY-Suche

- keine Anzeichen für Produktion supersym. Teilchen bei LEP bis  $\sqrt{s} = 196 \text{ GeV}$
- Anzahl der Kandidaten ist verträglich mit SM-Untergrund
- Grenzen auf Wirkungsquerschnitte und Massen

▶ Obere Grenzen auf WQ für  $e^+e^- \rightarrow \tilde{l}^+\tilde{l}^-, \tilde{\chi}^+\tilde{\chi}^-, \tilde{\chi}^0\tilde{\chi}^0, \dots$   
braucht wenige Annahmen: Paarproduktion und Zerfall der supersym. Teilchen

▶ Untere Grenzen auf Massen und Grenzen auf Modellparameter, d.i. Interpretation in einem Modell z.B. unter Nutzung der Beziehungen zwischen Massen, Modellparametern und Wirkungsquerschnitten

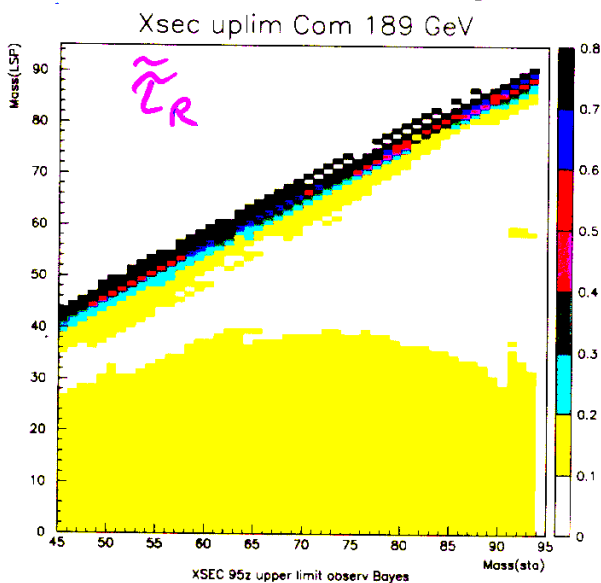
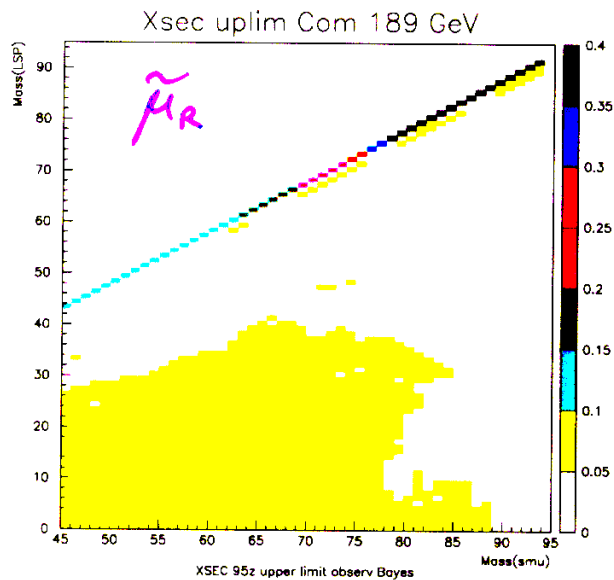
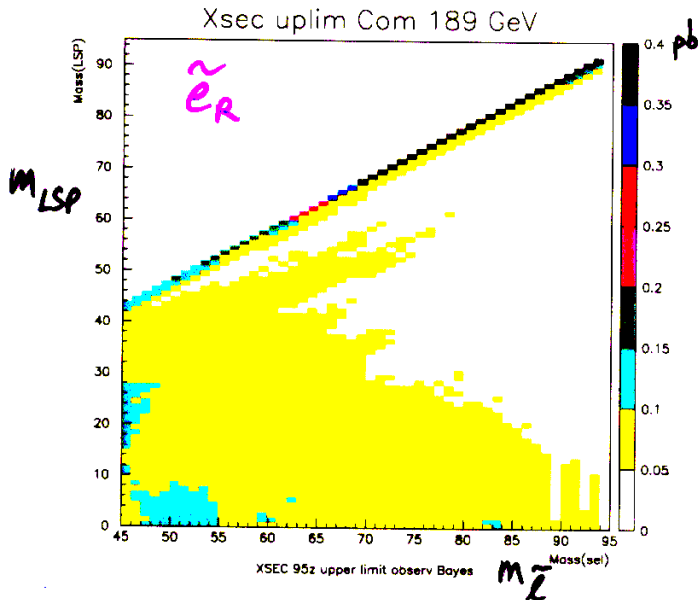
Prinzip: Scan des Parameterraumes  $M_2, \tan\beta, \mu, m_0, \dots$

Wähle einen MSSM-Parametersatz, berechne Wirkungsquerschnitte und vergleiche mit experimentell ausgeschlossenenem WQ  
→ Ausschluß eines Punktes im Parameterraum wie z.B. einer Massenkombination

# Obere Grenzen auf Wirkungsquerschnitt

$$e^+e^- \rightarrow \tilde{\ell}^+ \tilde{\ell}^- \text{ bei } \sqrt{s} = 189 \text{ GeV}$$

Darstellung in  $m_{\tilde{\ell}} - m_{LSP}$  - Ebene



i.a.

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \tilde{\ell}_R^+ \tilde{\ell}_R^-) < \sigma(e^+e^- \rightarrow \tilde{\ell}_L^+ \tilde{\ell}_L^-)$$

⇒ wähle Produktion rechts =  
häufiger skalare Leptonen  
für Grenzen

Beste Grenzen im Bereich mittlerer  $\Delta M$  und  $m_{\tilde{\ell}}$

$\Delta M \rightarrow 0$  Effizienzverlust: sichtbare Energie sehr gering

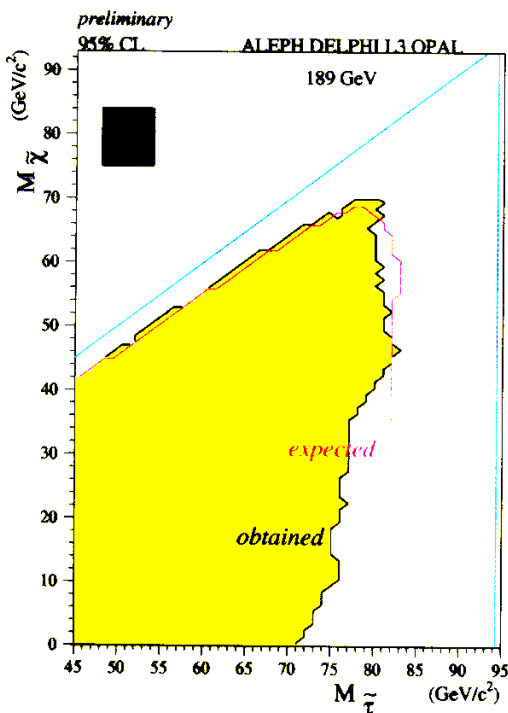
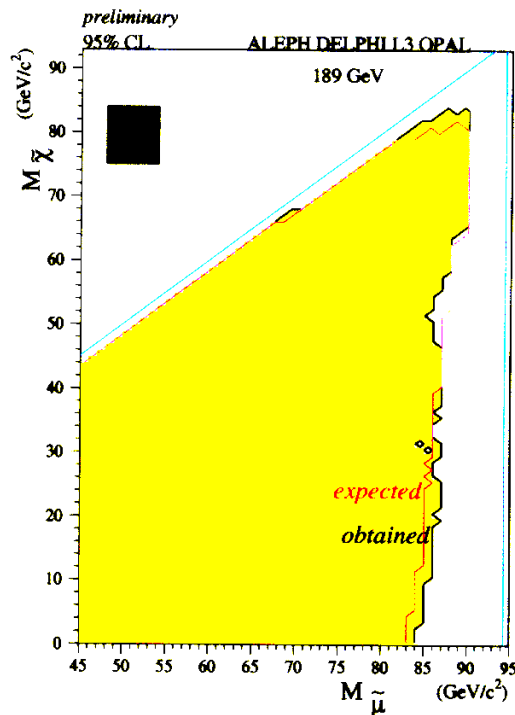
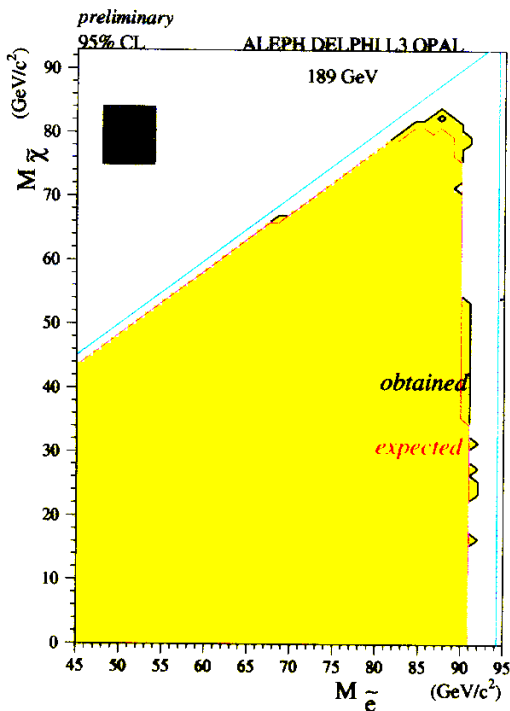
$\Delta M \rightarrow E_{beam}$  nahezu keine fehlende Energie  $\rightarrow$  Untergrund  $e^+e^- \rightarrow \ell^+\ell^-$

# Untere Grenzen auf Massen der skalaren Leptonen

in  $m_{\tilde{\chi}_1^0} - m_{\tilde{\ell}}$  Ebene für feste Parameter  $\mu = -200 \text{ GeV}$

und  $\tan\beta = 1.5$

(an diesem Punkt sind die Massengrenzen auf Neutralinos aus der Suche nach Neutralinos und Charginos am schwächsten)



Für  $\Delta M > 156 \text{ GeV}$  bei  $\sqrt{s} = 189 \text{ GeV}$

$$m_{\tilde{e}_R} > 89 \text{ GeV}$$

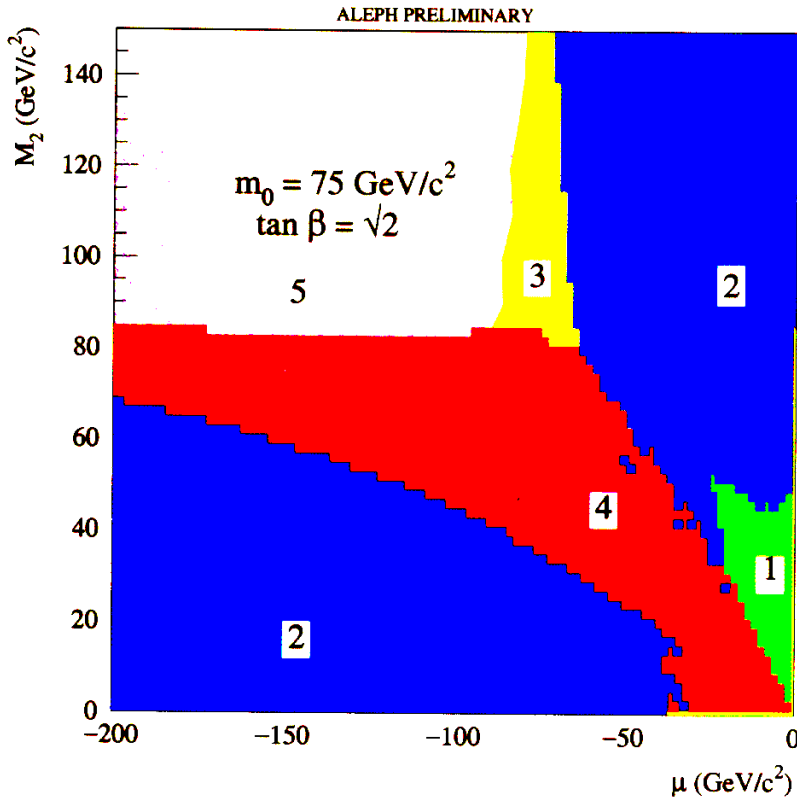
$$m_{\tilde{\mu}_R} > 84 \text{ GeV}$$

$$m_{\tilde{\tau}_R} > 71 \text{ GeV}$$

} @ 95% CL

# Massengrenze auf das LSP

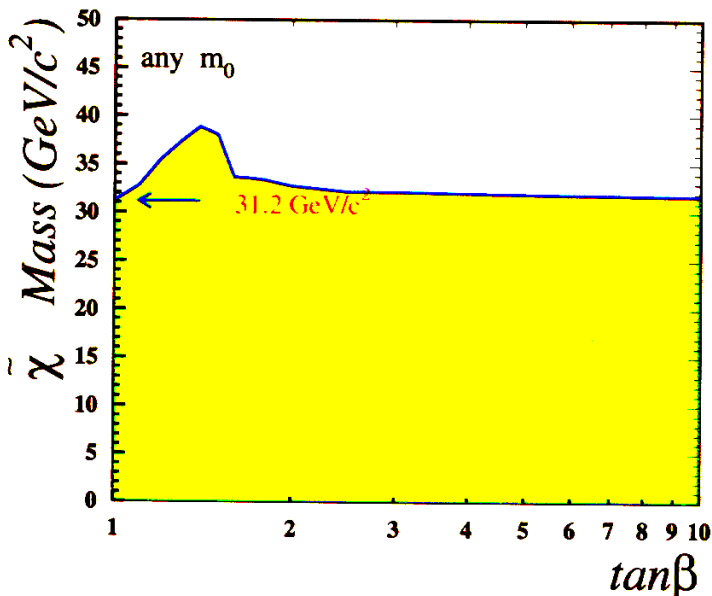
Aus Suche nach supersym. Teilchen kann der Parameter-  
raum von  $(\mu, M_2)$  eingeschränkt werden:



- 1  $\hat{=}$  LEP I
- 2  $\hat{=}$   $\tilde{\chi}^\pm$  (Charginos)
- 3  $\hat{=}$   $\tilde{\chi}^0$  (Neutralinos)
- 4  $\hat{=}$   $\tilde{\ell}$  (skalare Leptonen)
- 5  $\hat{=}$  Higgs-Suche

Jeder ausgeschlossene  $(\mu, M_2)$ -Punkt schließt gewisse  
 $m_{\tilde{\chi}_1^0}$  aus!

Preliminary DELPHI LSP limit at 189 GeV



$\Downarrow$

LEP:  $m_{\tilde{\chi}_1^0} > 32 \text{ GeV}$   
für alle  $m_0$  und  $\tan \beta$   
(Plot gilt auch für  $\tan \beta \rightarrow 1/\tan \beta$ )

# Der MSSM-Higgs-Sektor

2 Higgs-Doublets mit entgegengesetzter Hyperladung, um allen Materie-Fermionen Masse zu verleihen (außerdem Cancellation gewisser Dreiecks-Anomalien)

2 Doublets  $\cong$  8 Freiheitsgrade  
- 3 Bosonmassen ( $W^\pm, Z$ )  
 $\Rightarrow$  5 Higgsteilchen

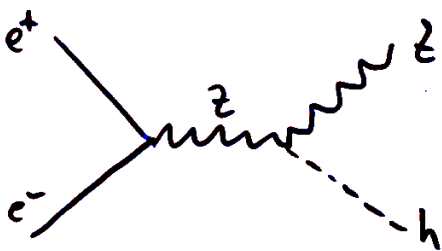
2 neutrale mit  $CP = +1$  :  $h, H$  ( $m_h < m_H$ )  
1 neutrales mit  $CP = -1$  :  $A$   
2 geladene Higgs-Bosonen :  $H^\pm$

## Theoretische Vorhersagen

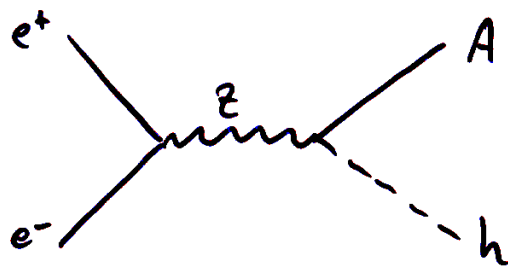
- in niedrigster Ordnung  $m_h < m_Z, m_{H^\pm} > m_W$
- Strahlungskorrekturen ( $m_{\text{top}}^4 \dots$ )  $m_h \lesssim 130 \text{ GeV}$

Produktion der neutralen MSSM Higgs-Bosonen bei LEP.

hängt ab von  $\alpha - \beta$  ( $\tan \beta = \frac{v_2}{v_1}$ ,  $\alpha =$  Higgsmischungswinkel)



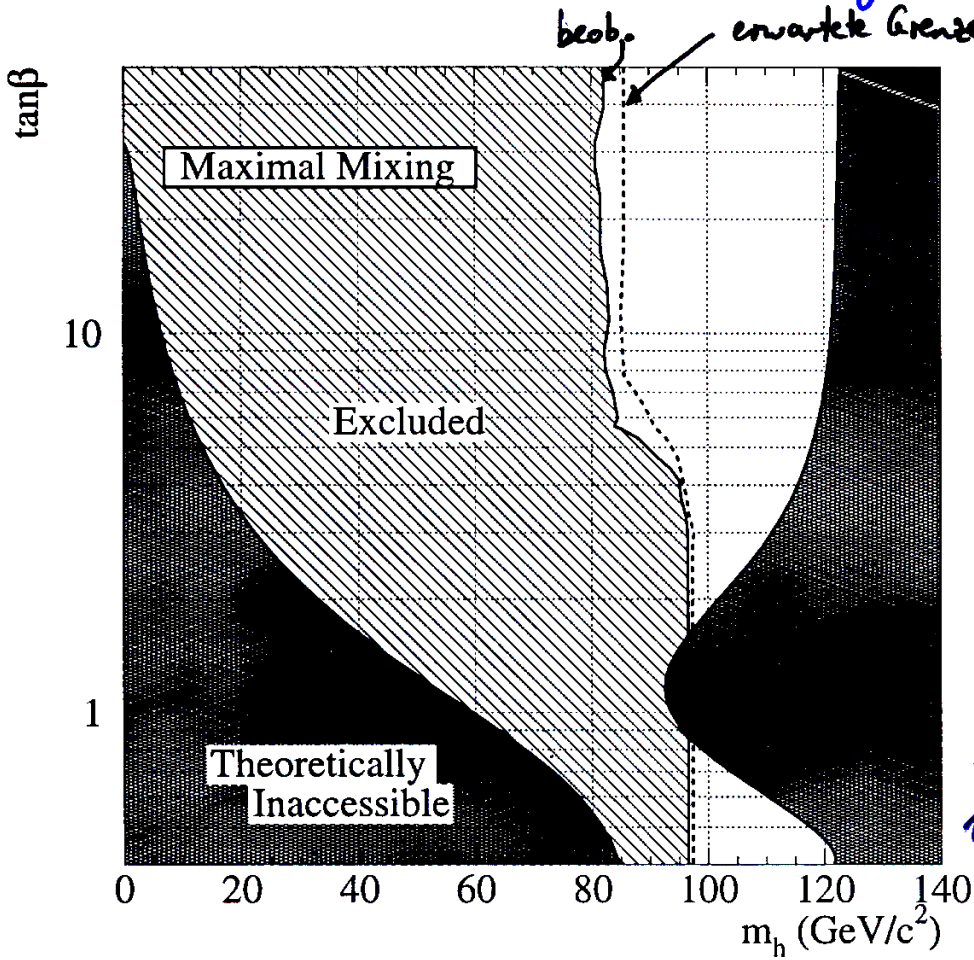
$$\sigma_{hZ} = \sigma_{hZ}^{\text{SM}} \cdot \sin^2(\alpha - \beta)$$



$$\sigma_{hA} = \sigma_{hZ}^{\text{SM}} \cdot \bar{\lambda} \cdot \cos^2(\alpha - \beta)$$

( $\bar{\lambda}$ : kinemat. Faktor)

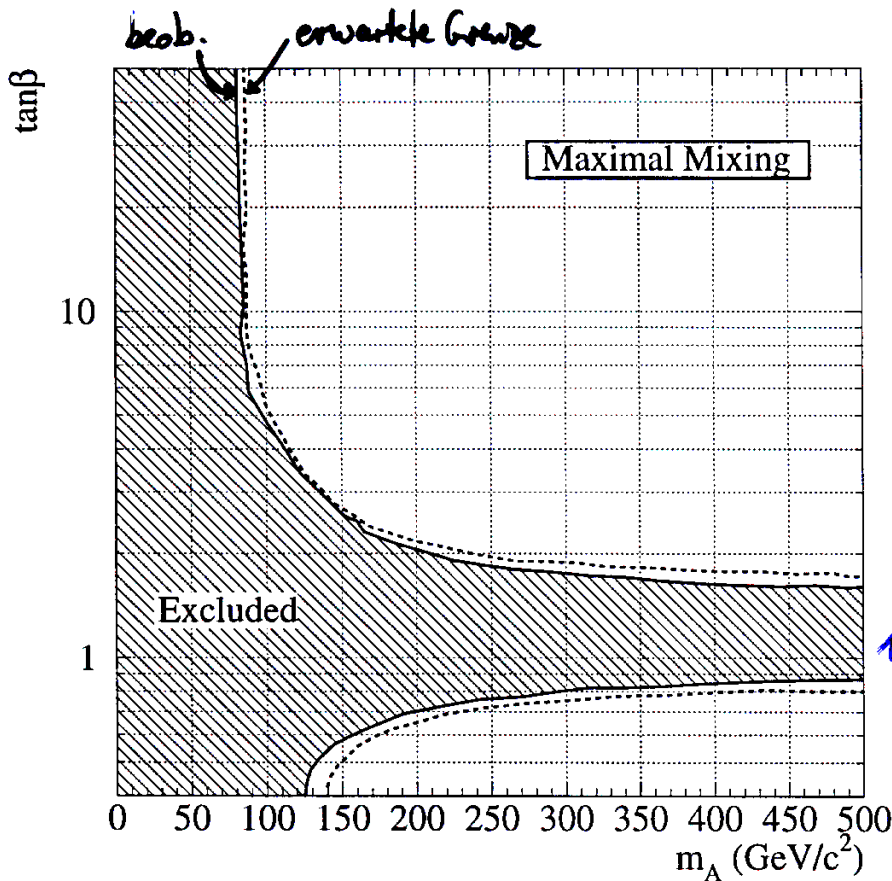
# MSSM - Higgs - Massengrenzen



Ausschluss von  $\tan\beta \approx 1$   
abhängig von s-top-  
Mischung

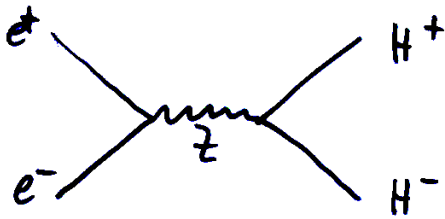
$$\tilde{t}_1 = \tilde{t}_L \cos\theta_{LR} + \tilde{t}_R \sin\theta_{LR}$$

LEP  
189 GeV  $m_h > 80.7 \text{ GeV}$   
@ 95% CL



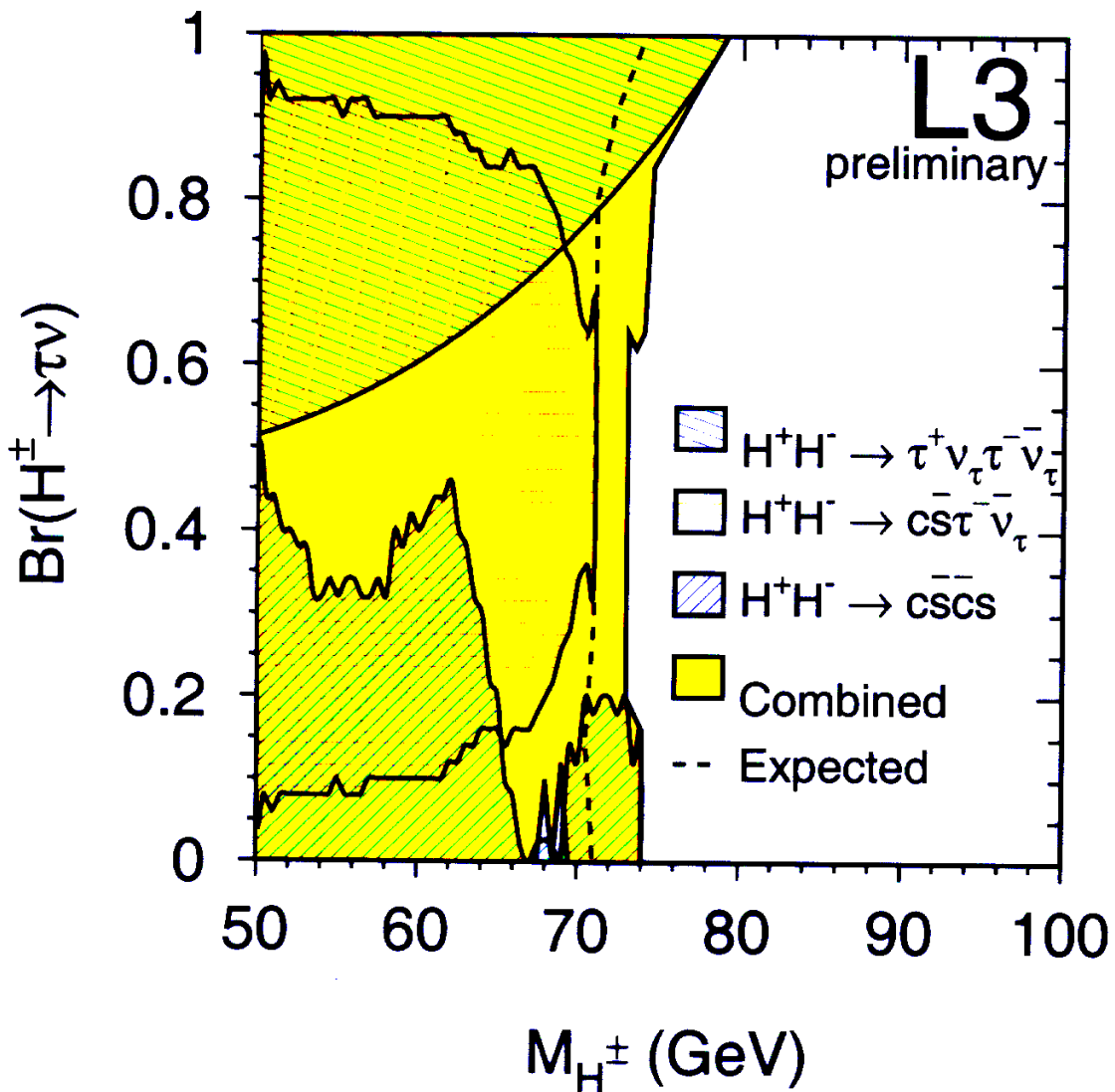
LEP  
189 GeV  $m_A > 80.9 \text{ GeV}$   
@ 95% CL

# Geladene MSSM-Higgs Bosonen



und  $H^+ \rightarrow c\bar{s}, \tau^+\nu_\tau$

Analyse mit SC-Fit ( $\Sigma(\vec{p}, E) = (\vec{0}, \sqrt{s})$ ,  $m_1^{rec} = m_2^{rec}$ )



LEP bis  $\sqrt{s} = 189 \text{ GeV}$



$m_{H^\pm} > 77.3 \text{ GeV @ 95\% CL}$



## Techni-Colour

- Anstelle des Higgs-Mechanismus zur Brechung der el. schwachen Symmetrie in die emagn. Sym.

$$U(1)_Y \otimes SU(2)_L \longrightarrow U(1)_{em}$$

kann auch ein zweifermion-System diese Brechung der Symmetrie hervorrufen. Dies ist ein Mechanismus, der beispielsweise zur Brechung der Chiralität der QCD beim Übergang von masselosen zu massiven Quarks (Mesonen, Baryonen) benutzt wird. Die bei der Sym. brechung eingebüßten Freiheitsgrade manifestieren sich als sog. Goldstone-Bosonen. In der QCD sind dies die Pionen  $\pi^{\pm}, \pi^0$ . Allerdings ist zugehörige Energieskala der QCD (präziser: Pionzerfallskonstante) zu niedrig, um die hohen Werte von W- und Z-Boson-Massen zu erklären

⇒ Techni-Pionen aus Techni-Quarks mittels Techni-Colour gebunden und

zerfallskonstante  $F_{\pi\pi} \sim 250 \text{ GeV}$

$W^+, W^-, Z$  absorbieren je  $\pi_T^+, \pi_T^-, \pi^0$  und erhalten so ihre Masse.

# Techni-Colour

- Um auch den Fermionen des Standard-Modells Massen zu geben, müssen zusätzliche Techni-Colour-Wechselwirkungen eingeführt werden. Das ist die sog. extended techni-colour ETC
- Damit die Techni-Quark- und Techni-Pion-Massen genügend groß sind, darf die Techni-Colour-Kopplungskonstante nur ganz langsam mit der Skala variieren  $\rightarrow$  walking Techni-Colour  
(zu leichte Techni-Gluonen würden die Häufigkeit von flavour-ändernden neutralen [ohne  $W^\pm$ ] Wechselwirkungen (FCNC) zu stark erhöhen, weil sie Quarks aus verschiedenen Generationen bzw. Familien verkoppeln)
- Experimentelle Suche nach Techni- $\rho$   $S_T$  und  $\omega$  in Proton-Antiproton-Kollisionen ergibt Massengrenzen von  $m_{S_T}, m_{\omega_T} \gtrsim 200 \text{ GeV}$   
(virtuelles  $W^\pm$ ,  $Z$  resoniert in ein Techni-Vektorteilchen  $S_T^\pm, S_T^0$ , welches in walking Techni-Colour gemäß  
 $S_T^\pm \rightarrow W^\pm \pi_T^0$  ;  $S_T^0 \rightarrow W^\pm \pi_T^\mp$  zerfällt und  
 $\pi_T^0, \pi_T^\pm \rightarrow 2$  Quarkjets mit  $b\bar{b}$  oder  $c\bar{c}, \bar{c}c$ )

## Z' - Bosonen

In erweiterten GUT - Theorien können weitere  $U(1)$ -Symmetrien auftreten, die sich in Form von  $Z'$ -Bosonen mit höheren Massen manifestieren. z.B. gibt es in einer  $E(6)$ -GUT zwei weitere  $U(1)$ -Gruppen:  $U(1)_\chi$  und  $U(1)_\psi$ , deren zugehörige Eichbosonen  $Z_\chi$  und  $Z_\psi$  zu den  $Z'$  mischen können ( $\rightarrow$  Mischungswinkel).

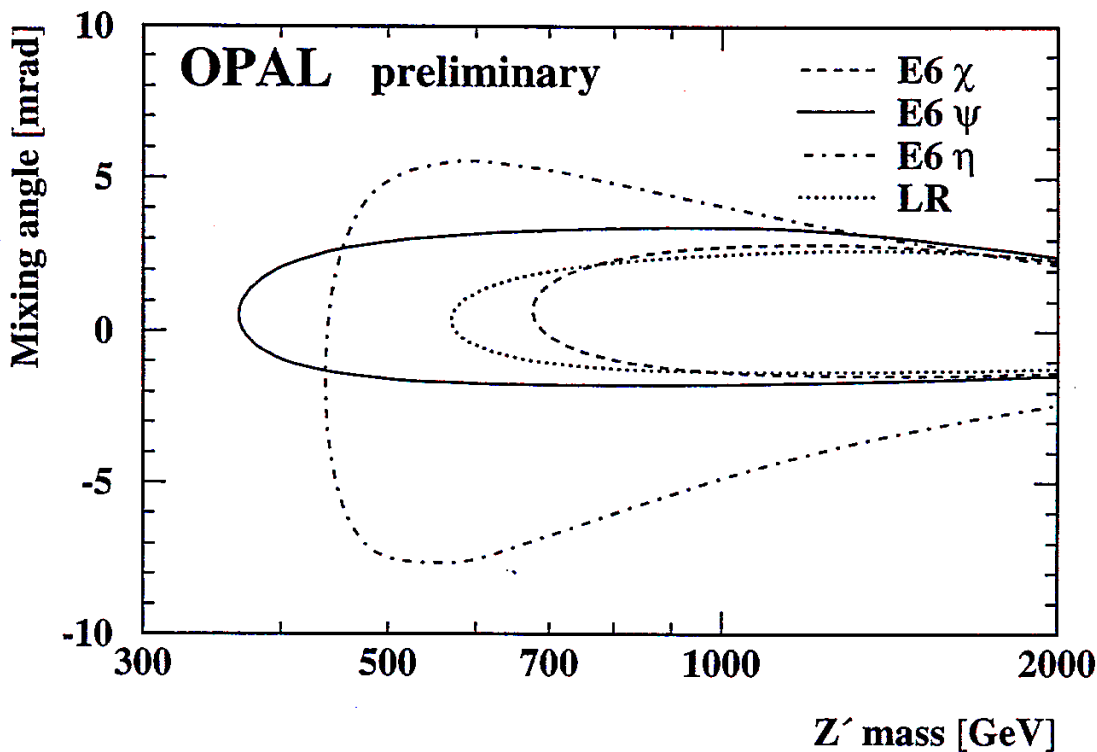


Figure 10: Exclusion contours in the  $Z'$  mass - mixing angle plane at 95 % CL for the four main models. The  $Z$  mass is free during the fit. Free  $M_t$  and  $\alpha_s$  would lead to an increase of the width in  $\theta_M$  by about 10 %.

$\Rightarrow m_{Z'} \gtrsim 300 \text{ GeV}$  für solche Modelle

## Weitere Modelle über das SM hinaus

viele weitere Optionen, z.B.

### • SUSY

- ▶ Gauge mediated supersymmetry breaking (GMSB)  
→ Gravitino ( $\text{Spin } \frac{3}{2}$ ) ist LSP  
S-Lepton  $\tilde{\ell}$  oder Chargino  $\tilde{\chi}^\pm$  ist nächst-leichtestes (NLSP)
- ▶ SUSY ohne R-Paritätserhaltung  
∄ LSP, da alle schweren SUSY-Teilchen in die üblichen Bosonen & Fermionen zerfallen können

### • Techni-Colour Modelle

Anstelle des Higgs treten "Technipionen", die aus "Techniquarks" zusammengesetzt sind; Eichstruktur ist  $SU(N)$  (z.B.  $N=3$ ) wie bei QCD, doch Techni-Colour-Kopplungskonst.  $\Rightarrow \alpha_s$

### • Compositeness Modelle

$W, Z, (H)$  u.a. sind aus noch elementareren Teilchen (z.B. Präonen) zusammengesetzt

- Leptoquarks (z.B. in Form einer Kontakt- $W$  gesucht)  
vermitteln  $W$  zwischen Leptonen und Quarks  $\rightarrow$  Protonen-Zerfall treten in GUT zwangsläufig auf und müssen sehr schwer sein, um experimentelle Proton-Lebensdauer zu garantieren

### • zusätzliche Eichbosonen $Z'$

### • zusätzliche Dimensionen

Gravitation ist so schwach, weil sie in weiteren Dimensionen existiert und wir nur die  $3+1$  dimensionale Projektion sehen  
 $n$  zusätzliche Dimensionen sind "aufgerollt" und haben Radius  $r$   
 $m_{\text{Pl}}^2 \sim r^n \cdot m_{\text{eff}}^{2+n}$  und  $m_{\text{eff}} \approx m_{\text{d. schwach}} \Rightarrow r \sim 10^{\frac{30}{n}-19} \text{ m}$

# Grenzen auf Kontaktwechselwirkungen

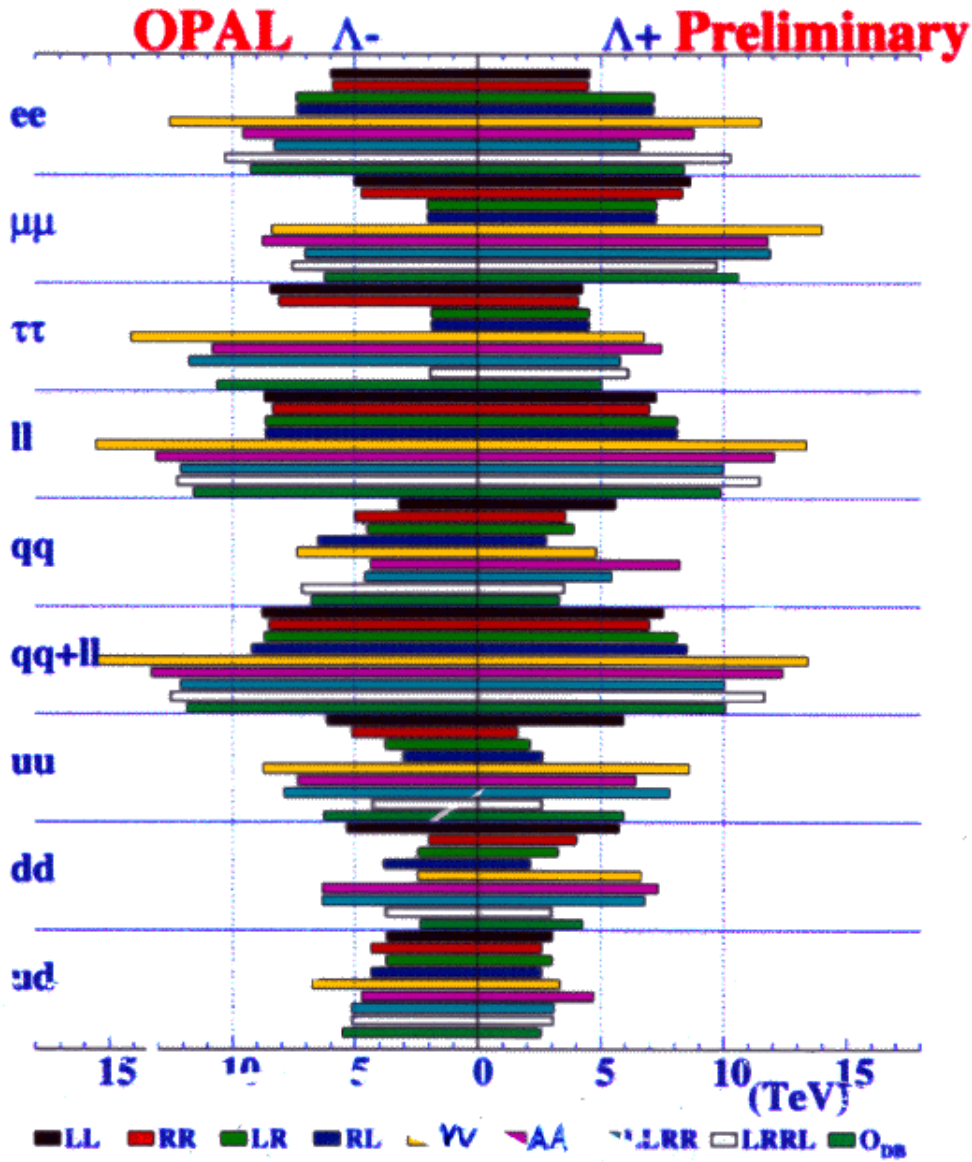
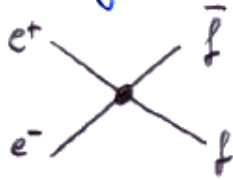


Figure 9: 95% confidence level limits on the energy scale  $\Lambda$  resulting from the contact interaction fits. For each channel, the bars from top to bottom indicate the results for models LL to  $\bar{O}_{DB}$  in the order given in the key.

## Fazit

- Standardmodell zwar experimentell extrem erfolgreich
- aber mit vielen Problemen behaftet
- Erweiterungen sind notwendig
- viele und verschiedenartigste Modelle auf dem Markt
- experimentell ist keines bestätigt
- "Erfinden" von Erweiterungen ist eine große "Spielwiese" für Theoretiker, aber erst die Experimente der kommenden Generation (z.B. der Large Hadron Collider LHC) wird die Antworten auf die noch offenen Fragen geben können.