

# Alternativen zum Higgs-Mechanismus

Das Standard-Modell der starken und elektro-schwachen Wechselwirkung ist eine Eichtheorie zu den Gruppen

$$SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$$

in der die elektroschwache Gruppe spontan gebrochen

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

durch ein Dublett elementarer Higgs-Skalarfelder.

Neutrinos bleiben masselos und es gibt 3 Fermion = Familien mit CP-Verletzung durch eine komplexwertige CKM-Mischungsmatrix für die geladene W-Boson-Quark Wechselwirkung.

Da Higgs-Teilchen bislang unentdeckt sind, ist die Frage nach Alternativen zum Higgs-Mechanismus

berechtigt. Eine mögliche Realisierung, bei der die Symmetriebrechung dynamisch (anstatt spontan) erfolgt, sind Technicolour Modelle (auch Hypercolour-), die ohne elementares Skalarfeld auskommen.

# Technicolour

Die grundlegende Idee der Technicolour geht auf die Quantenchromodynamik QCD zurück, die ja eine Flavour-Symmetrie  $SU(2)_L \otimes SU(2)_R$  für masselose u- und d-Quarks aufweist. In Konsequenz wären die Pionen die 3 masselosen Goldstone-Teilchen, da diese Symmetrie spontan gebrochen ist, sodass der Vakuumerwartungswert

$$\langle 0 | u\bar{u} | 0 \rangle \equiv \langle u\bar{u} \rangle_{\text{vac}} = \langle d\bar{d} \rangle_{\text{vac}} \neq 0$$

nur noch unter  $SU(2)_{L+R}$  invariant ist (NB: Brechung durch Terme der Art  $m_u \cdot u\bar{u}_R + m_d \cdot d\bar{d}_R$ ).

Werden u, d in  $q = \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$  zusammengefasst, dann ergibt sich der Vakuumerwartungswert zu

$$\frac{1}{2v^2} \langle q\bar{q} \rangle_{\text{vac}} = f_\pi \approx 95 \text{ MeV}$$

mit Zerfallskonstante  $f_\pi$  des Pions und  $v$  definiert in Analogie zum Vakuumerwartungswert im Higgs-Mechanismus, jedoch

$$v \approx 95 \text{ MeV}$$

(anstatt  $1/\sqrt{2}G_F \approx 246 \text{ GeV}$ )

# Technicolour

Durch  $v$  wird die brechung der  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  zur  $U(1)_{em}$  erreicht, sodass durch Bildung eines  $q\bar{q}$ -Kondensats hypothetisch W- und Z-Bosonen eine masse, z.B.  $M_W = \frac{1}{2} g_W v \approx 80 \text{ MeV}$  ( $v = f_\pi \approx 246 \text{ GeV}$ ) erhalten, wenn sie ans  $q\bar{q}$ -Kondensat koppeln. Allerdings sind die so zu erwartenden Massen viel zu klein, daher wird eine neue, QCD-artige Wechselwirkung eingeführt, Technicolour (TC) genannt. Diese TC-Wechselwirkung besitzt entsprechende "Quarks", Techniquarks, welche die TC-Ladung tragen und die Technimesonen bilden können, z.B. Technipion  $\pi_T (= U\bar{D}, \dots)$ , Technirho  $\rho_T$ , Techniomega  $\omega_T$ , etc. Entscheidend ist aber eine erheblich größer Technipion-Zerfalls-konstante  $F_\pi \approx 246 \text{ GeV}$ , um die bekannten Massen von W- und Z-Bosonen erklären zu können.

# Probleme der Technicolour

Mit diesem Ansatz können W- und Z-Bosonen ihre großen Massen erhalten. Allerdings gelingt die Massenerzeugung für die Fermionen des Standard-Modells erst, wenn die Eichgruppe der TC

$$SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y \otimes SU(3)_{TC}$$

erweitert wird zur **Extended Technicolour (ETC)** Eichgruppe, in der Technifermionen  $F$  mit einem Standard-Modell Fermion  $f$  eine gemeinsame Darstellung haben (z.B. für Technifermionen mit 3 Technicolours):

$$\begin{array}{c} (F_{TCr} \ F_{TCg} \ F_{TCb} \ | \ f) \\ \longleftarrow \quad \quad \quad \longrightarrow \\ \quad \quad \quad TC \\ \longleftarrow \quad \quad \quad \longrightarrow \\ \quad \quad \quad ETC \end{array}$$

Bei einer Energieskala  $\mu$  bricht  $ETC \rightarrow TC$ , sodass die Fermionmasse

$$m_f = \frac{1}{2\mu^2} \langle F\bar{F} \rangle_{vac}$$

entsteht. Aufgrund der Größe von  $\langle F\bar{F} \rangle_{vac} \sim (1\text{TeV})^3$  (da  $\frac{1}{2v^2} \langle Q\bar{Q} \rangle_{vac} \approx 246\text{ GeV}$ ), muss  $\mu \approx 30\text{ TeV}$  sein, um eine Fermionmasse  $m_f \approx 1\text{ GeV}$  zu erzeugen.

## Probleme der Technicolour

Um das Quarkmassenspektrum (u, d sehr leicht, t sehr schwer) zu erklären und dabei eine genügend große Technipionmasse zu behalten, darf die Technicolour-Kopplungskonstante nur sehr langsam mit der Energie "laufen" (in Analogie zur QCD):

$$\alpha_{TC}(Q^2) = \frac{4\pi}{\left(11 - \frac{2}{3}n_F\right) \cdot \ln \frac{Q^2}{\Lambda_{TC}^2}}$$

wobei  $\Lambda_{TC} \approx 1 \text{ TeV}$  ist. Also werden sehr viele Technifermionen benötigt (Anzahl:  $n_F$ ), um dieses langsame "Laufen" zu erreichen:

### walking (extended) Technicolour (WTC)

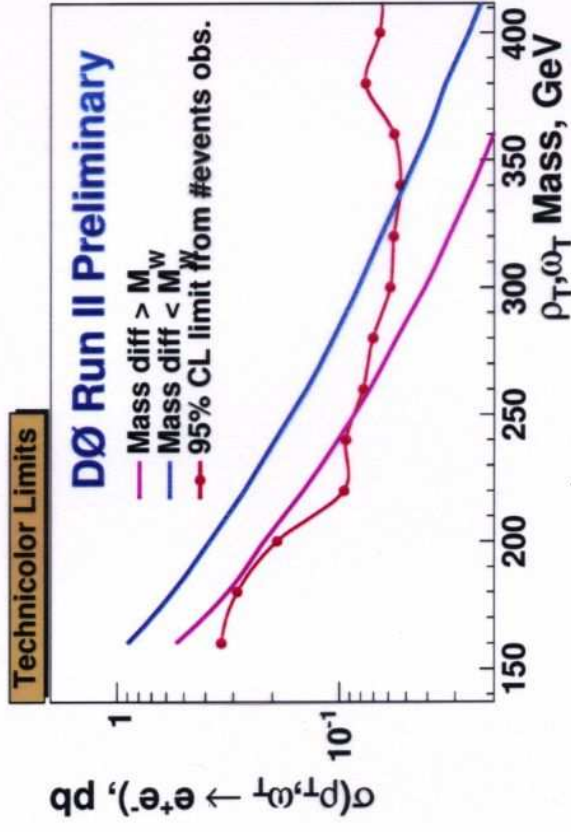
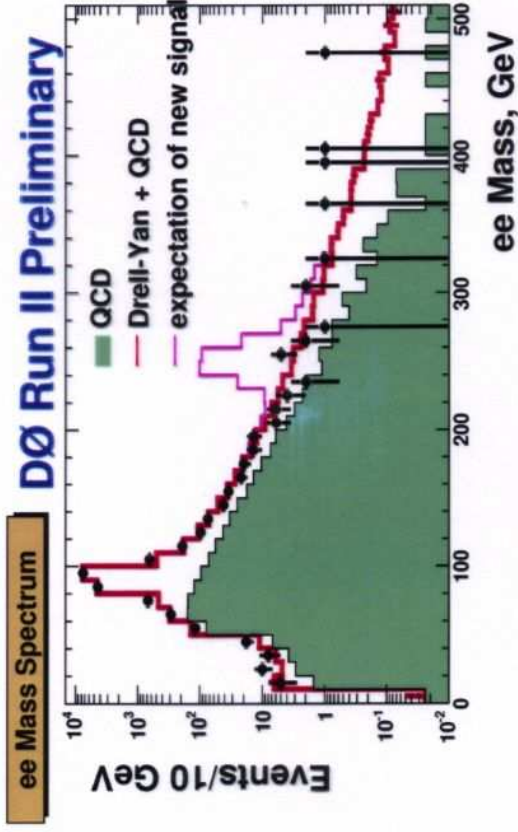
Nach allen diesen "Behandlungen" ergibt sich, dass insbesondere die Technivektormesonen, also  $\rho_T, \omega_T$  deutlich leichter als 1 TeV sein könnten. Dies eröffnet Perspektiven, solche Teilchen an Beschleuniger-Experimenten (z.B. Tevatron Proton-Antiproton Beschl. @ FNAL) zu suchen.

## Suche nach Technicolor am Tevatron-Beschleuniger:

- Techni-Vektormesonen  $\rho_T$  oder  $\omega_T$ :  
 $p\bar{p} \rightarrow \rho_T, \omega_T \rightarrow e^+e^-$
- ▷ Wirkungsquerschnitt  $\sigma_{TC}(\rho_T, \omega_T \rightarrow e^+e^-)$  abhängig von:
  - Masse der Techni-Vektormesonen  
 ( $\rho_T$  und  $\omega_T \approx$  massenentartet)
  - Massendifferenz: Techni-Vektormesonen – Technipionen  
 (falls Massendiff.  $> m_W$ , dann  $\rho_T, \omega_T \rightarrow W + \pi_T$  bevorzugt)
  - Symmetriebrechungsskala  $M_T$  (hier: 100 GeV)

- ▷ In  $200 \text{ pb}^{-1}$  integrierter Luminosität
- ▷ Suche nach Resonanzen in  $e^+e^-$ -Paarmasse
- ▷ Nichtbeobachtung von Überschuss in  $e^+e^-$ -Produktion
- ⇒ Obergrenze auf Techni-Vektormeson-Massen (@ 95%CL):

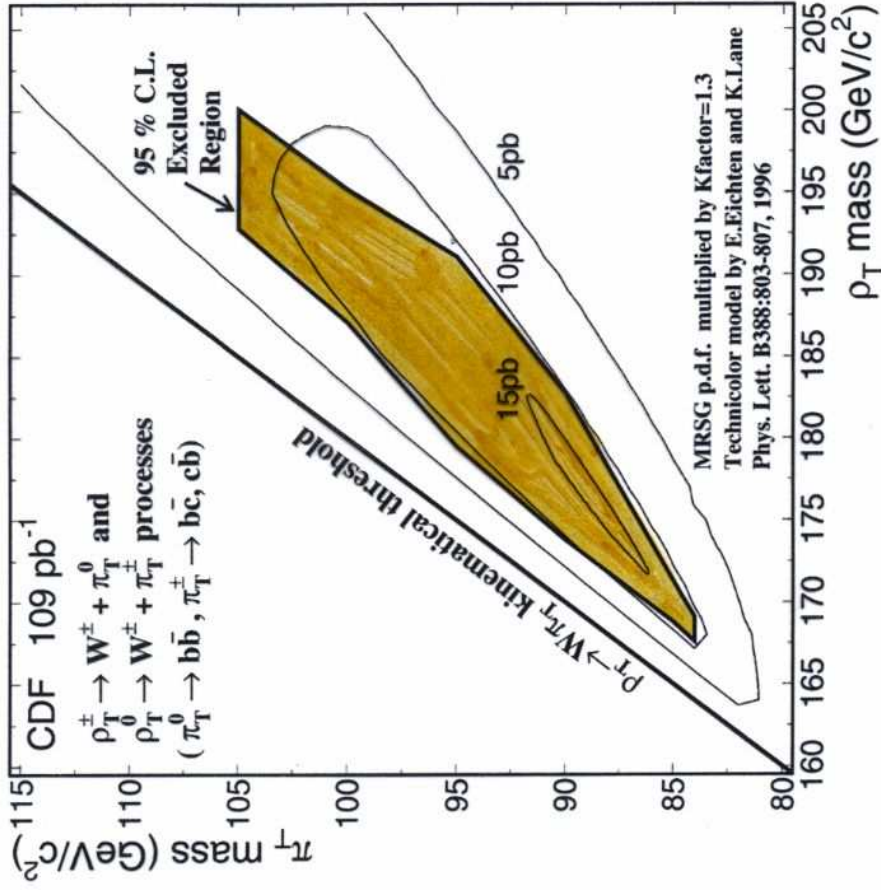
Massendifferenz $> m_W$	$< m_W$
→ $m(\rho_T), m(\omega_T) > 250 \text{ GeV}$	$> 340 \text{ GeV}$



## Grenzen auf Technicolor-Teilchen:

- Falls  $m(\rho_T) - m(\pi_T) > m_W$
- ▷ Zerfall  $\rho_T \rightarrow \pi_T + W$  mit  $\pi_T \rightarrow b\bar{b}, b\bar{c}, c\bar{b}$  bevorzugt
- ▷ Experimentelle Signatur:
  - 2 Jets + 1  $W$
  - mindestens 1 Jet vom b-Quark
  - $W \rightarrow e\nu_e, \mu\nu_\mu$

Massenbereich  $170 < m(\rho_T) < 190$  GeV  
 ausgeschlossen für  $m(\pi_T) \approx \frac{1}{2}m(\rho_T)$

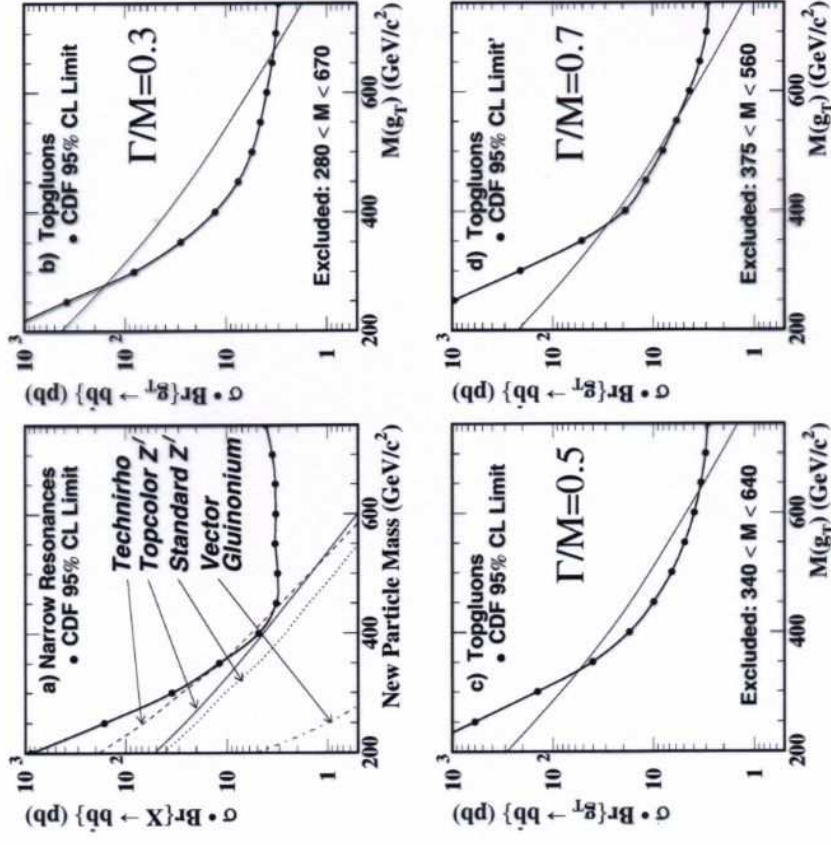


**Figure 1:** 95% CL exclusion region [16] for a light technirho decaying to  $W^\pm$  and a  $\pi_T$ , and in which the  $\pi_T$  decays to two jets including at least one  $b$  quark. See full-color version on

## Topcolor-Modell:

- Technicolor kann große top-Quarkmasse nicht erzeugen
- große top-Quarkmasse Anzeichen für neue Dynamik ?
- ◇ "Topcolor-Modell": el.-schw. Symmetriebrechung durch Bildung eines top-Quark-Kondensats  $\langle \bar{t}t \rangle$
- ▷ Higgs-Teilchen: gebundenes System aus  $t\bar{t}$
- ▷ el.-schw. Symmetriebrechung  $SU(2) \times U(1) \rightarrow U(1)$  wie im Standardmodell durch Higgs-Teilchen
- ◇ "Topcolor Assisted Technicolor" (TC2) als Variante: el.-schw. Symmetriebrechung nicht allein durch  $\langle \bar{t}t \rangle$ -Kondensat, dominante Beiträge durch Technicolor
- ▷ TC2 vereinfacht Konsistenz von ETC mit exp. Beobachtung (gelöste Probleme: Erzeugung d. großen top-Masse, Unterdrückung von  $t \rightarrow b + \pi_T$  durch geladene, leichte Technipionen, Nicht-Beobachtung von FCNC, evtl. Verzicht auf "walking"-Kopplung)
- ▷ Topcolor:  $\exists$  massives Gluon, koppelt nur an top & bottom, Zerfallsbreite  $\Gamma \approx 0.3-0.7 \cdot M(g_T)$  groß

◇ Suche nach Top-Gluon in  $q\bar{q} \rightarrow g_T \rightarrow b\bar{b}$



**Figure 7:** Tevatron limits [30] on new particles decaying to  $b\bar{b}$ : narrow resonances and topgluons for various widths.

→ ausgeschlossen Massenbereich  
 $300 < m(g_T) < 600 \text{ GeV}$



## Grenzen auf Technicolor- und Topcolor-Teilchen:

Auszug aus *Review of Particle Properties*:

(S.Eidelmann *et al.*, Phys.Lett.B592 (2004) 1-1109)

Wenn Technicolor existiert, dann Techni-  
Vektorteilchen schwerer als 200-300 GeV



Wenn Topcolor existiert, dann


Topgluon schwerer als 600 GeV

oder leichter als 300 GeV



Process	Excluded mass range	Decay channels
$p\bar{p} \rightarrow \rho_T \rightarrow W\pi_T$	$170 < m_{\rho_T} < 190$ GeV for $m_{\pi_T} \approx m_{\rho_T}/2$	$\rho_T \rightarrow W\pi_T$ $\pi_T^0 \rightarrow b\bar{b}$ $\pi_T^\pm \rightarrow b\bar{c}$
$p\bar{p} \rightarrow \omega_T \rightarrow \gamma\pi_T$	$140 < m_{\omega_T} < 290$ GeV for $m_{\pi_T} \approx m_{\omega_T}/3$ and $M_T = 100$ GeV	$\omega_T \rightarrow \gamma\pi_T$ $\pi_T^0 \rightarrow b\bar{b}$ $\pi_T^\pm \rightarrow b\bar{c}$
$p\bar{p} \rightarrow \omega_T/\rho_T$	$m_{\omega_T} = m_{\rho_T} < 203$ GeV for $m_{\omega_T} < m_{\pi_T} + m_W$ or $M_T > 200$ GeV	$\omega_T/\rho_T \rightarrow \ell^+\ell^-$
$e^+e^- \rightarrow \omega_T/\rho_T$	$90 < m_{\rho_T} < 206.7$ GeV $m_{\pi_T} < 79.8$ GeV	$\rho_T \rightarrow WW,$ $W\pi_T, \pi_T\pi_T,$ $\gamma\pi_T, \text{hadrons}$
$p\bar{p} \rightarrow \rho_{T8}$	$260 < m_{\rho_{T8}} < 480$ GeV	$\rho_{T8} \rightarrow q\bar{q}, gg$
$p\bar{p} \rightarrow \rho_{T8}$ $\rightarrow \pi_{LQ}\pi_{LQ}$	$m_{\rho_{T8}} < 510$ GeV $m_{\rho_{T8}} < 600$ GeV $m_{\rho_{T8}} < 465$ GeV	$\pi_{LQ} \rightarrow c\nu$ $\pi_{LQ} \rightarrow b\nu$ $\pi_{LQ} \rightarrow \tau q$
$p\bar{p} \rightarrow g_t$	$0.3 < m_{g_t} < 0.6$ TeV for $0.3m_{g_t} < \Gamma < 0.7m_{g_t}$	$g_t \rightarrow b\bar{b}$
$p\bar{p} \rightarrow Z'$	$m_{Z'} < 480$ GeV for $\Gamma = 0.012m_{Z'}$ $m_{Z'} < 780$ GeV for $\Gamma = 0.04m_{Z'}$	$Z' \rightarrow t\bar{t}$

# Alternativen zum Higgs-Mechanismus

Die präzisen Untersuchungen der Experimente am LEP- $e^+e^-$ -Beschleuniger haben viele Varianten von Technicolours i.W. ausgeschlossen! (v.a. durch Beiträge von )  
 Technicolor Schleifen

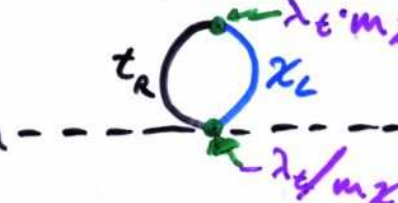
Viele weitere Modelle werden vorgeschlagen, die ähnlich wie TC an den Präzisionsmessungen von LEP scheitern.

Eines der neueren Modelle, das **little Higgs-Modell**, bezieht Ansätze aus höherdimensionalen Räumen ein, um das Problem der Higgs-Massenstabilität aufgrund von top-Schleifen (und Boson-Schleifen)



$$\approx - \frac{\lambda_t^2}{16\pi^2} \cdot \Lambda^2 \xrightarrow{\Lambda \rightarrow \infty} \infty$$

zu lösen. Ansatz ist die Vergrößerung von SU(2)<sub>L</sub> auf eine SU(3), d.h.  $\begin{pmatrix} t_L \\ b_L \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} t_L \\ b_L \\ \chi_L \end{pmatrix}$ , die spontan gebrochen wird, sodass die obige Schleife durch einen

Beitrag 

$$\approx + \frac{\lambda_t}{m_\chi} \cdot \frac{\lambda_\chi \cdot m_\chi}{16\pi^2} \Lambda^2$$

aufgehoben wird.  $\rightarrow$  neue farbgeladene Fermionen  $\chi$ ,  $O(1 \text{TeV})$   
 (dabei für skalare und Vektorbosonen.)