

Channels & Challenges – Neue Physik am LHC

Jürgen Reuter

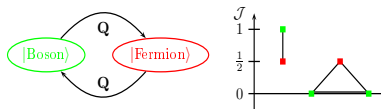
Carleton University, Ottawa
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Dresden, 24. März 2007

Supersymmetrie

Spin-Statistik: Korrekturen von Bosonen und Fermionen heben sich weg

verbinden Eich- und Raum-Zeit-Symmetrien



Fermion/Boson-Multipletts gleicher Masse $\Rightarrow$ SUSY gebrochen

M_H in allen Ordnungen geschützt

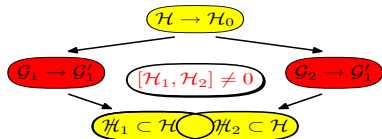
Große Vereinheitlichung

R -Parität: Dunkle Materie

Little Higgs

Globale Symmetrien: Korrekturen von Teilchen gleicher Statistik heben sich weg

Higgs: Goldstone-Boson spontan gebrochener globaler Symmetrie



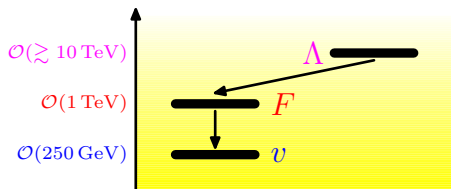
Kollektive Brechung globaler Symmetrien schützt Higgs-Masse

M_H geschützt in erster Ordnung

stark wechselwirkend @10 TeV

T -Parität: dunkle Materie

Charakteristika von Standard-Modell-Erweiterungen

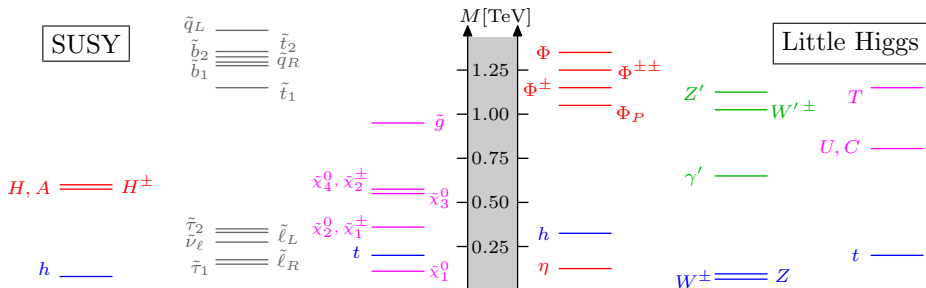


Skala Λ : “hidden sector”,
Symmetriebrechung

Skala F : neue Teilchen

Skala v : Higgs, W/Z , $\ell^\pm$, ...

Teraskala: Reiches Spektrum neuer Teilchen, komplizierte Zerfallsstrukturen



Schranken an neue Modelle?

Flavour-Struktur: Meson-Mischung & seltene Zerfälle, CP-Verletzung

Astrophysikalische Schranken: Dunkle-Materie-Verteilung

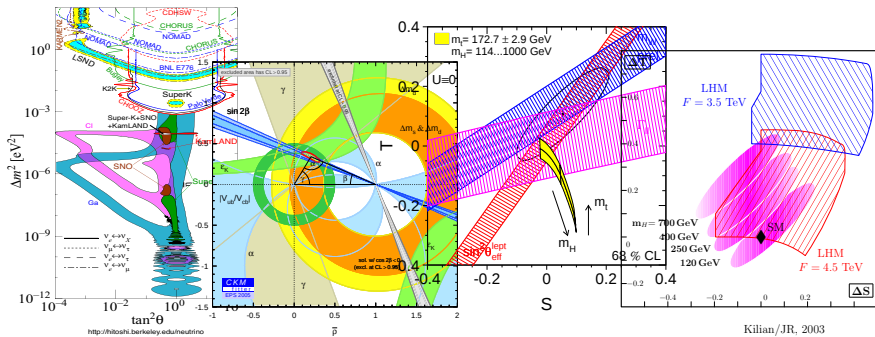
Eichstruktur: Elektroschwache Präzisionsobservablen

Schranken an neue Modelle?

Flavour-Struktur: Meson-Mischung & seltene Zerfälle, CP-Verletzung

Astrophysikalische Schranken: Dunkle-Materie-Verteilung

Eichstruktur: Elektroschwache Präzisionsobservablen

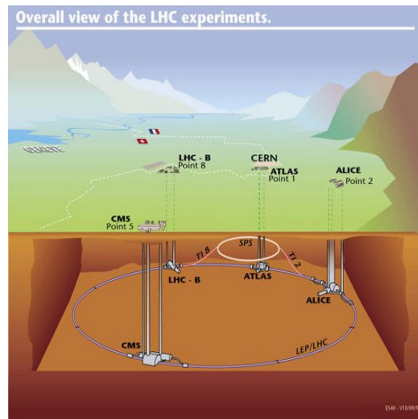
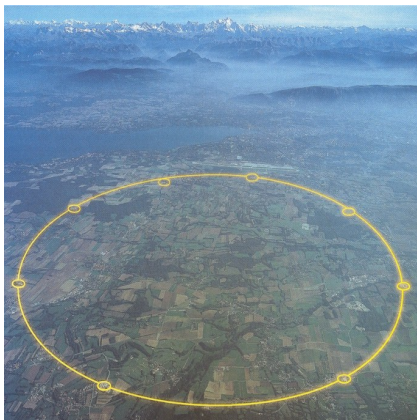


Neue Teilchen-Skala $F \gtrsim 1 - 3$ TeV

Direkte Suchen: Large Hadron Collider

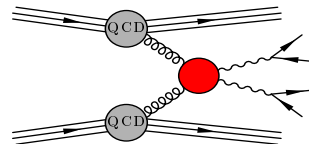
LHC @ CERN: 2007/08

pp -Collider $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$

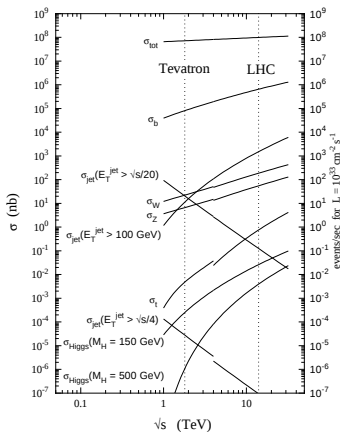


Die Herausforderung des LHC

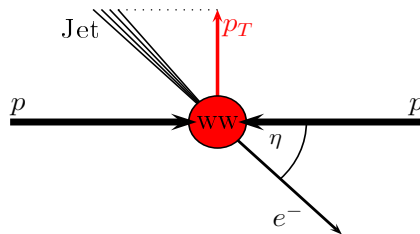
Partonische Subprozesse: qq, qg, gg
Keine feste partonische Energie



proton - (anti)proton cross sections

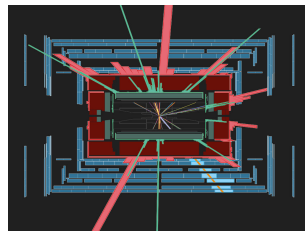
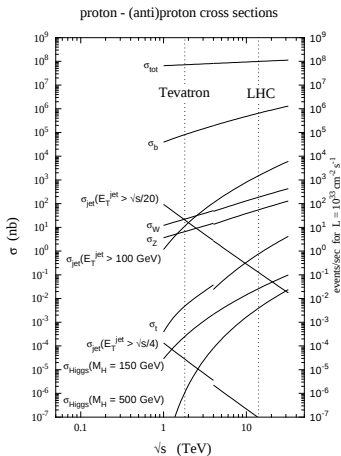


Hohe Ereignisraten für $t, W/Z, H$,
⇒ **riesige Untergründe**
Schnitte zur Untergrundreduktion

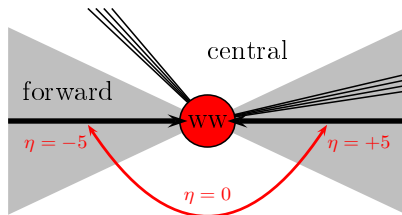


Die Herausforderung des LHC

Partonische Subprozesse: qq, qg, gg
Keine feste partonische Energie



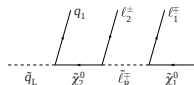
Hohe Ereignisraten für $t, W/Z, H$,
⇒ **riesige Untergründe**
Schnitte zur Untergrundreduktion



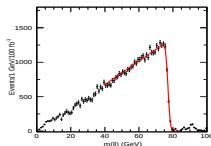
Neue Physik: Observablen/Präzisionsmessungen

Signale für Neue Physik:

$\cancel{E}_T$, high- p_T Jets, viele harte Leptonen,
aber: Welches Modell?



- Kaskadenzerfälle: Massendifferenzen aus den Endpunkten der Zerfallsspektren
- Spin neuer Teilchen: Winkelverteilungen, ...
- Modellbestimmung: Messung der Kopplungskonstanten



⇒ Präzise Vorhersagen für Signal und Untergrund

- ▶ Berücksichtigung von Cuts
Verteilungen: $d\sigma/dX$, $X = \cos\theta, \eta, p_T, \dots$
- ▶ Vielteilchen-Endzustände: $2 \rightarrow 4$ bis $2 \rightarrow 10$
- ▶ Quantenkorrekturen: reell und virtuell

Simulationen: Der Event-Generator-Generator

O'Mega Ω / Whizard

Matrix-Element-Generator O'Mega:

Ohl, 2000/01; M.Moretti/Ohl/JR, 2001

Optimierte Helizitätsamplituden: Vermeidung aller Redundanzen

Vielzweck-Event-Generator Whizard:

Ohl, 1996; Kilian, 2000; Kilian/Ohl/JR, 2007

- Adaptive Multikanal-Monte-Carlo-Integration
- sehr gut getestet
- Strukturfunktionen, Partonschauer/Hadronisierung
- Eventformate für Detektorsimulationen
- Virtuelle Korrekturen: NLO-Monte-Carlo

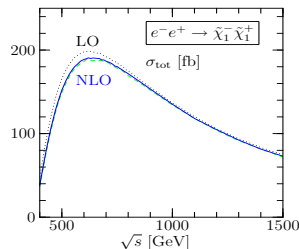
Kilian, 2001; JR, 2007

[STDHEP, HEPEVT, ATHENA, ...]

NLO-MC für $e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-$ Kilian/JR/Robens, 2006

Beliebige Verteilungen @ NLO

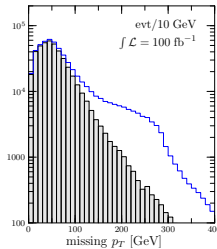
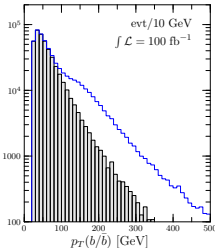
→ NLO-Signal-MC für LHC



Sbottom-Produktion am LHC

Hagiwara/.../JR/..., 2006

$\tilde{b}_1$ -Produktion mit anschließendem Zerfall $\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 b$



$$pp \rightarrow b\bar{b}\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0$$

Haupt-Untergrund:

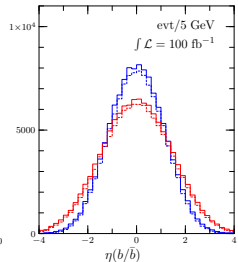
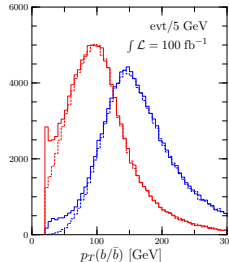
$$gg \rightarrow b\bar{b}\nu\bar{\nu}$$

Signaljets härter

PS: Härterer Jet zentraler

Off-Shell-Effekte ($b\bar{b}Z^*$): nur für niedriges $p_{T,b} \rightarrow$ wird weggeschnitten

Nicht allg. garantiert



Reelle Korrekturen: Bottom-Jet-Strahlung

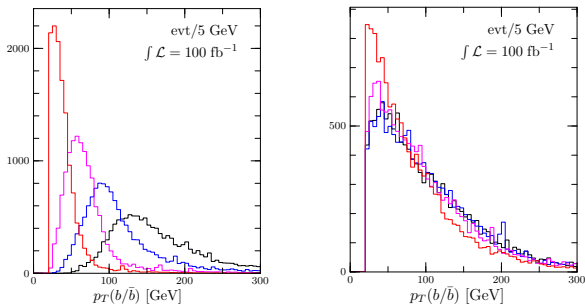
K. Hagiwara/.../JR/..., 2006

$g \rightarrow b\bar{b}$ -Splitting, b -ISR als kombinatorischer Untergrund

$pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0 b\bar{b}b\bar{b}$: 32112 Diagramme, 22 Farbflüsse, ~ 4000 PS-Kanäle

$$\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0) = 1177 \text{ fb} \longrightarrow \sigma(pp \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0) = 130.7 \text{ fb}$$

Vorwärts-Diskriminierung von ISR und Zerfalls- b -Jets schwierig:



Nur der äußerste Vorwärts- b -Jet deutlich weicher

Reelle Korrekturen: Bottom-Jet-Strahlung

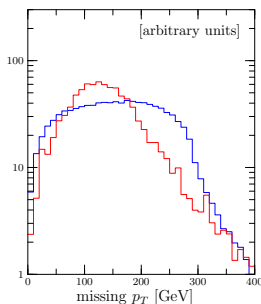
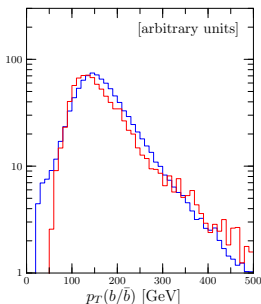
K. Hagiwara/.../JR/..., 2006

$g \rightarrow b\bar{b}$ -Splitting, b -ISR als kombinatorischer Untergrund

$pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0 b\bar{b}b\bar{b}$: 32112 Diagramme, 22 Farbflüsse, ~ 4000 PS-Kanäle

$$\sigma(pp \rightarrow b\bar{b}\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0) = 1177 \text{ fb} \longrightarrow \sigma(pp \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0) = 130.7 \text{ fb}$$

Nur geringe Unterschiede in $p_{T,b}$, PDF: Maximum bei kleinerem Wert



zu kleinerem p_T verschoben: leichte Teilchen balancieren Events aus

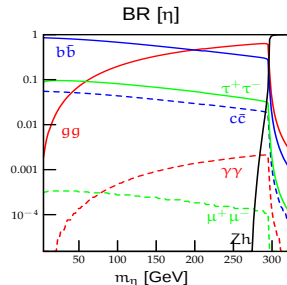
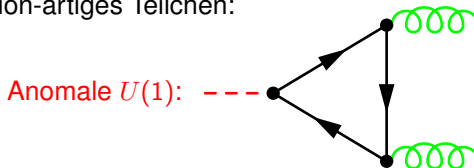


Und wenn nicht SUSY?

Pseudo-Axionen in Little Higgs

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006; JR, 2007

- $U(1)$ -Gruppe geeicht: Z' $\longleftrightarrow$ ungeeicht: η
- koppelt an Fermionen wie ein Pseudoskalar
- $m_\eta \lesssim 400 \text{ GeV}$
- SM-Singlett, Kopplungen an SM-Teilchen v/F **unterdrückt**
- η axion-artiges Teilchen:



$$\longrightarrow \frac{1}{F} \frac{\alpha_s}{8\pi^2} \eta F_{\mu\nu} F_{\rho\sigma} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}$$

- $U(1)$ explizit gebrochen $\Rightarrow$ Axionschranken aus Astroteilchenphysik nicht anwendbar

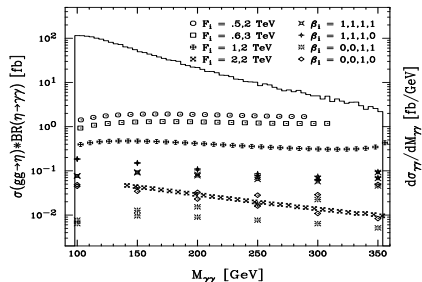
Im Angesicht einer Entdeckung

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

LHC: Gluon-Fusion,
Diphoton-Signal für
 $m_\eta \gtrsim 200 \text{ GeV}$, 7σ möglich

LHC: $T \rightarrow t\eta$ Godfrey/Rainwater/JR

ILC: $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}\eta$



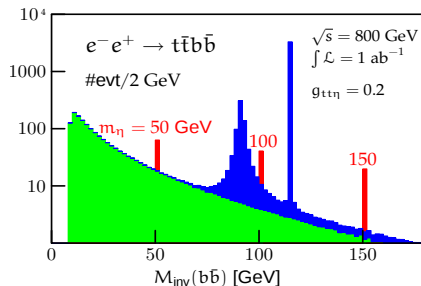
Im Angesicht einer Entdeckung

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

LHC: Gluon-Fusion,
Diphoton-Signal für
 $m_\eta \gtrsim 200 \text{ GeV}$, 7σ möglich

LHC: $T \rightarrow t\eta$ Godfrey/Rainwater/JR

ILC: $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}\eta$



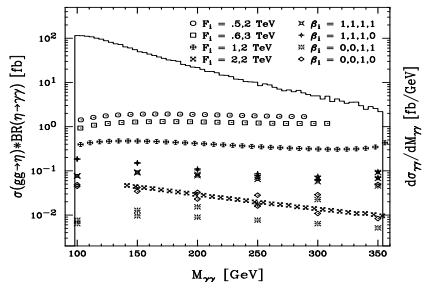
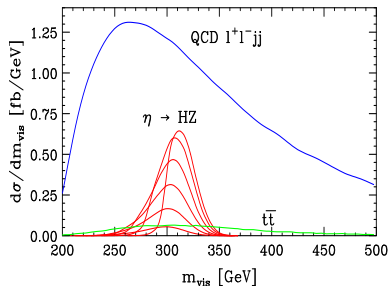
Im Angesicht einer Entdeckung

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

LHC: Gluon-Fusion,
Diphoton-Signal für
 $m_\eta \gtrsim 200 \text{ GeV}$, 7σ möglich

LHC: $T \rightarrow t\eta$ Godfrey/Rainwater/JR

ILC: $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}\eta$



$ZH\eta$ -Kopplung

verboten in
Produkt-Gruppen-Modellen

**Versch. Modellklassen
unterscheidbar**

$$gg \rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} H \rightarrow Z\eta & \rightarrow llbb \\ \eta \rightarrow ZH & \rightarrow llbb, llljj \end{array} \right\}$$

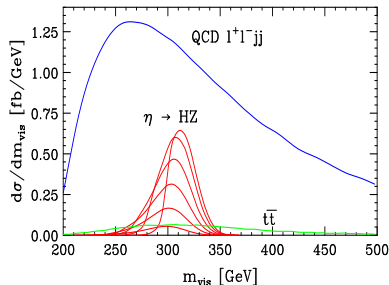
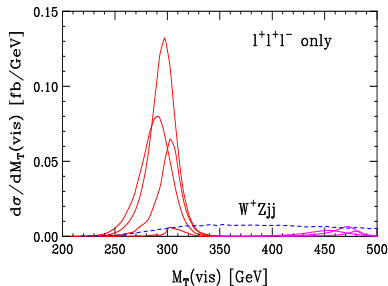
Im Angesicht einer Entdeckung

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

LHC: Gluon-Fusion,
Diphoton-Signal für
 $m_\eta \gtrsim 200 \text{ GeV}$, 7σ möglich

LHC: $T \rightarrow t\eta$ Godfrey/Rainwater/JR

ILC: $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}\eta$



ZHη-Kopplung

verboten in
Produkt-Gruppen-Modellen

**Versch. Modellklassen
unterscheidbar**

$$gg \rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} H \rightarrow Z\eta & \rightarrow \ell\ell b\bar{b} \\ \eta \rightarrow ZH & \rightarrow \ell\ell b\bar{b}, \ell\ell\ell\ell jj \end{array} \right\}$$

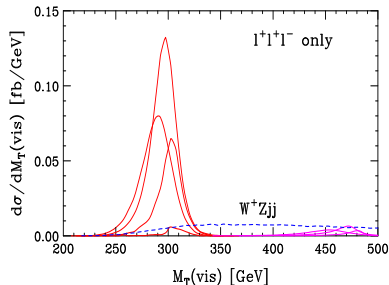
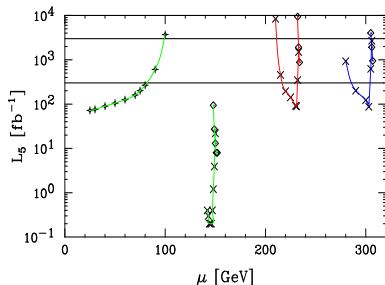
Im Angesicht einer Entdeckung

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

LHC: Gluon-Fusion,
Diphoton-Signal für
 $m_\eta \gtrsim 200 \text{ GeV}$, 7σ möglich

LHC: $T \rightarrow t\eta$ Godfrey/Rainwater/JR

ILC: $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}\eta$



$ZH\eta$ -Kopplung

verboten in
Produkt-Gruppen-Modellen

**Versch. Modellklassen
unterscheidbar**

$$gg \rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} H \rightarrow Z\eta & \rightarrow \ell\ell b\bar{b} \\ \eta \rightarrow ZH & \rightarrow \ell\ell b\bar{b}, \ell\ell\ell j\bar{j} \end{array} \right\}$$

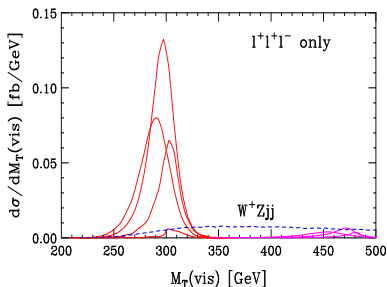
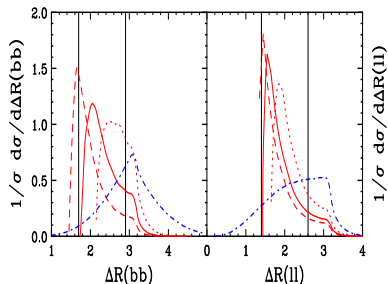
Im Angesicht einer Entdeckung

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

LHC: Gluon-Fusion,
Diphoton-Signal für
 $m_\eta \gtrsim 200 \text{ GeV}$, 7σ möglich

LHC: $T \rightarrow t\eta$ Godfrey/Rainwater/JR

ILC: $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}\eta$



$ZH\eta$ -Kopplung

verboten in
Produkt-Gruppen-Modellen

**Versch. Modellklassen
unterscheidbar**

$$gg \rightarrow \left\{ \begin{array}{ll} H \rightarrow Z\eta & \rightarrow \ell\ell b\bar{b} \\ \eta \rightarrow ZH & \rightarrow \ell\ell b\bar{b}, \ell\ell\ell\bar{\ell}jj \end{array} \right\}$$

Präzisionsmaschine LHC – Anomale Eichkopplungen

ILC: Beyer/Kilian/Krstonošić/Mönig/JR/Schröder/Schmidt, 2006

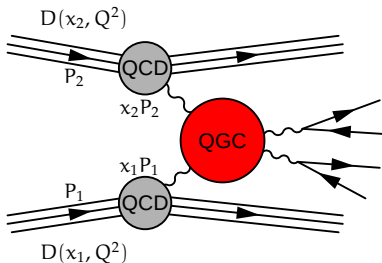
LHC: Kilian/Mertens/JR/Schumacher

Anomale quartische Eichkopplungen, durch chiralen EW Lagrangian:

$$\mathcal{L}_4 = \alpha_4 \frac{g^2}{2} \left\{ [(W^+ W^+)(W^- W^-) + (W^+ W^-)^2] + \frac{2}{c_W^2} (W^+ Z)(W^- Z) + \frac{1}{2c_W^4} (ZZ)^2 \right\}$$

$$\mathcal{L}_5 = \alpha_5 \frac{g^2}{2} \left\{ (W^+ W^-)^2 + \frac{2}{c_W^2} (W^+ W^-)(ZZ) + \frac{1}{2c_W^4} (ZZ)^2 \right\}$$

(alle Leptonen, einschl. τ):



$$pp \rightarrow jj(ZZ/WW) \rightarrow jj \ell^- \ell^+ \nu_e \bar{\nu}_e$$

$$\sigma \approx 40 \text{ fb}$$

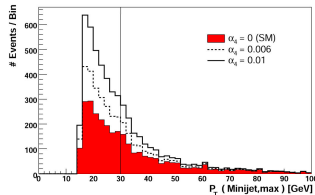
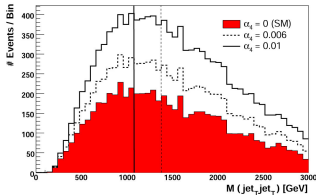
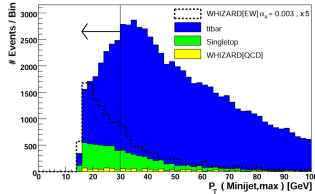
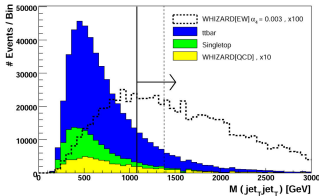
Untergrund:

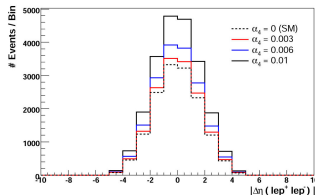
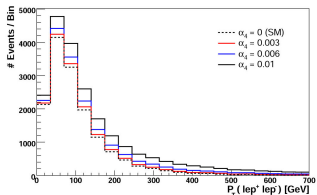
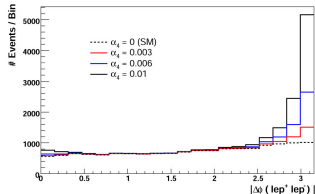
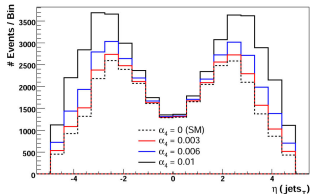
- ▶ $t\bar{t} \rightarrow WbWb$, $\sigma \approx 52 \text{ pb}$
- ▶ Single t , misrek. Jet: $\sigma \approx 4.8 \text{ pb}$
- ▶ QCD: $\sigma \approx 0.21 \text{ pb}$

Tagging und Schnitte:

- ▶ $\ell\ell jj$ -Tag, $\eta_{tag}^{min} < \eta_\ell < \eta_{tag}^{max}$, b -Veto
- ▶ $|\Delta\eta_{jj}| > 4.4$, $M_{jj} > 1080$ GeV
- ▶ Minijet-Veto: $p_{T,j} < 30$ GeV
- ▶ $E_j > 600, 400$ GeV, $p_{T,j}^1 > 60, 24$ GeV

Verbessert $S/\sqrt{B}$ von 3.3 auf 29.7





Ergebnisse: (1σ Sensitivität auf α_s)

Coupl.	ILC (1 ab^{-1})	LHC (100 fb^{-1})
α_4	0.0088	0.00160
α_5	0.0071	0.00098

Schranken auf Λ [TeV]:

Spin	$I = 0$	$I = 1$	$I = 2$
0	1.39	1.55	1.95
1	1.74	2.67	—
2	3.00	3.01	5.84

Ausblick

- ▶ LHC: neue Ära der Physik
- ▶ Higgs-Mechanismus
- ▶ Neue Teilchen, Symmetrien: SUSY, Little Higgs
- ▶ Pheno:
präzise Berechnungen/Simulationen von Vielteilchen-Endzuständen
- ▶ Spannende Zeiten!

Ausblick

- ▶ LHC: neue Ära der Physik
- ▶ Higgs-Mechanismus
- ▶ Neue Teilchen, Symmetrien: SUSY, Little Higgs
- ▶ Pheno:
präzise Berechnungen/Simulationen von Vielteilchen-Endzuständen
- ▶ Spannende Zeiten!
- ▶ Es ist Licht
am Ende des Tunnels!

