

Channels & Challenges – Neue Physik am LHC

Jürgen Reuter

DESY, Hamburg

Freiburg, 29.Mai 2006

Ideen für Neue Physik seit 1970

(1) Neue Bausteine

- Technicolor: Higgs gebundener Zustand stark wechselwirkender Teilchen

(2) Symmetrie zur Eliminierung der Quantenkorrekturen

- **Supersymmetrie**: Spin-Statistik \Rightarrow Korrekturen von Bosonen und Fermionen heben sich weg
- **Little-Higgs-Modelle**: Globale Symmetrien \Rightarrow Korrekturen durch Teilchen gleicher Statistik heben sich weg

(3) Nichttriviale Raumzeitstruktur eliminiert Hierarchie

- Zusätzl. Raumdimensionen: Gravitation erscheint nur schwach
- Nichtkommutative Raumzeit: Körnigkeit der Raumzeit

(4) Ignorieren der Hierarchie

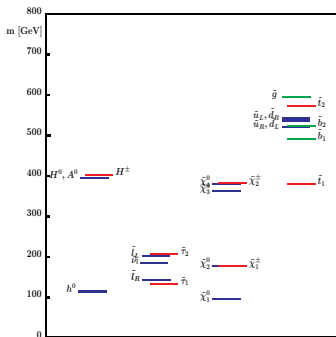
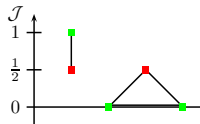
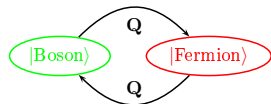
- Anthropisches Prinzip: Werte sind so, *weil* wir sie beobachten

Supersymmetrie

verknüpft Eich- und Raumzeit-Symmetrien

Multipletts mit Fermionen und Bosonen gleicher Masse

⇒ SUSY in der Natur gebrochen



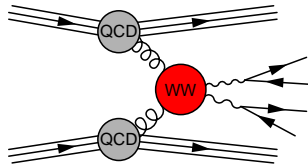
- Minimales Supersymmetrisches Standard-Modell (MSSM)
 - Vielfältiges Spektrum neuer Teilchen
 - LSP: Dunkle Materie
 - Komplizierte Zerfallsstrukturen
- ⇒ Reichhaltige Phänomenologie

Die Herausforderung des LHC

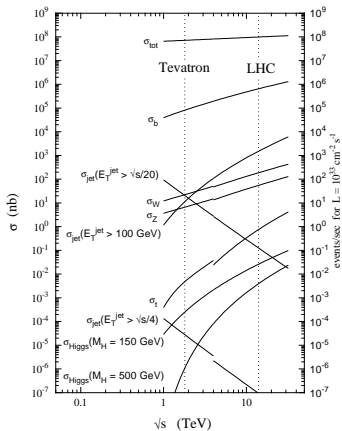
LHC @ CERN: ab 07/2007

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

Partonische Subprozesse: qq, qg, gg

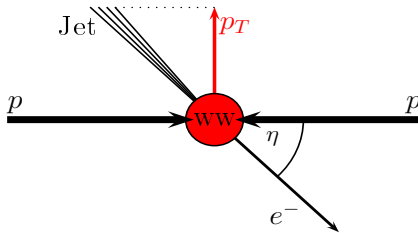


proton - (anti)proton cross sections



Hohe Eventraten für $t, W/Z, H,$
 \Rightarrow **große Untergründe**

Schnitte zur Untergrundreduktion

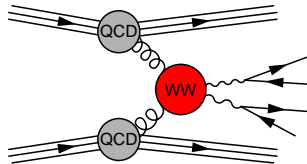


Die Herausforderung des LHC

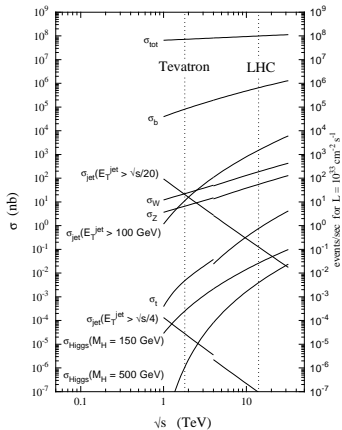
LHC @ CERN: ab 07/2007

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

Partonische Subprozesse: qq, qg, gg

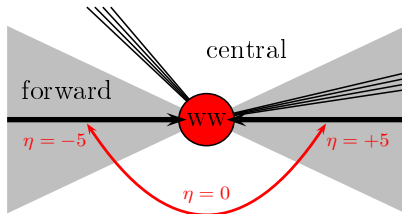


proton - (anti)proton cross sections



Hohe Eventraten für $t, W/Z, H,$
 \Rightarrow **große Untergründe**

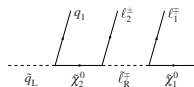
Schnitte zur Untergrundreduktion



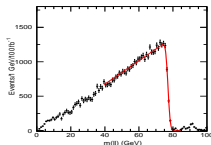
Neue Physik: Observablen und Präzisionsmessungen

Signale für Neue Physik:

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



- Kaskadenzerfälle: Massendifferenzen aus Endpunkten von Zerfallsspektren
- Spin neuer Teilchen: Winkelverteilungen, ...
- Modellbestimmung: Messung von Kopplungskonstanten
- ⇒ Präzise Vorhersagen für Signal und Untergründe
 - ▶ Berücksichtigung von Schnitten
Verteilungen: $d\sigma/dX$, $X = \cos\theta, \eta, p_T, \dots$
 - ▶ Exklusive Vielteilchen-Endzustände: $2 \rightarrow 4$ bis $2 \rightarrow 10$
 - ▶ Quantenkorrekturen: Reelle und virtuelle Korrekturen



Simulationen: O'Mega Ω / Whizard

Matrizelement-Generator O'Mega:

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

Optimierte Helizitätsamplituden: Vermeidung aller Redundanzen

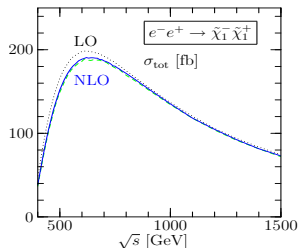
Vielzweck-Eventgenerator Whizard:

Ohl, 1996; Kilian, 2000; Kilian/Ohl/JR, 2006

- Viel-Kanal adaptive Monte-Carlo-Integration
- Breiten, Wirkungsquerschnitte und beliebige Verteilungen
- Strukturfunktionen, Interface zu Partonschauer/Hadronisierung [PYTHIA]
- Eventformate für Detektorsimulationen [STDHEP, HEPEVT, ...]
- **Virtuelle Korrekturen: NLO Monte Carlo**

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

Beliebige Verteilungen @ NLO



Tests und Checks: Beispiel MSSM

JR et al., 2005; K. Hagiwara/W. Kilian/F. Krauss/T. Ohl/T. Plehn/D. Rainwater/JR/S. Schumann, 2006

- MSSM: doppeltes Spektrum, 100 Parameter, 5000 Vertizes

⇒ Implementierung erfordert Tests und Konsistenzchecks

- Unitaritätscheck: $\sigma(2 \rightarrow 2, s), \sigma(2 \rightarrow 3, s) \sim const$ oder $1/s$ ✓
- Eichinvarianz: Ward- und Slavnov-Taylor-Identitäten ✓
- Supersymmetrie: Ward-/Slavnov-Taylor-Identitäten ✓ JR, 2002; Ohl/JR, 2002
- Vergleich unabh. Codes ($\mathcal{O}(600)$ Prozesse): JR et al., 2005; K. Hagiwara/.../JR/..., 2006

Referenz:

http://www-ttp.physik.uni-karlsruhe.de/~reuter/susy_comparison.html

$ff \rightarrow X$							
Process	stat.	Madgraph/Helas		Whizard/O'Mega		Sherpa/A'Megic	
		0.5 TeV	2 TeV	0.5 TeV	2 TeV	0.5 TeV	2 TeV
$uu \rightarrow \tilde{u}_L \tilde{u}_L$	●	—	716.9(1)	—	716.973(4)	—	716.99(4)
$uu \rightarrow \tilde{u}_R \tilde{u}_R$	●	—	679.6(1)	—	679.627(4)	—	679.54(4)
$uu \rightarrow \tilde{u}_L \tilde{u}_R$	●	—	1212.52(6)	—	1212.52(5)	—	1212.60(6)
$dd \rightarrow \tilde{d}_L \tilde{d}_L$	●	—	712.6(1)	—	712.668(4)	—	712.68(4)
$dd \rightarrow \tilde{d}_R \tilde{d}_R$	●	—	667.4(1)	—	667.448(4)	—	667.38(3)
$dd \rightarrow \tilde{d}_L \tilde{d}_R$	●	—	1206.22(6)	—	1206.22(5)	—	1206.30(7)

Sbottom-Produktion am LHC

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

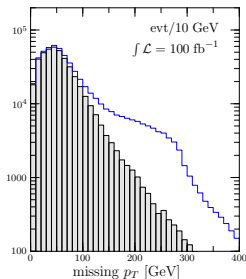
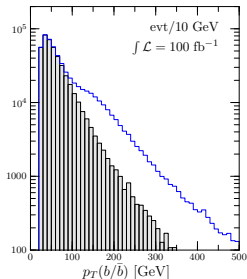
 \tilde{b}_1 -Produktion mit anschließendem Zerfall $\tilde{b}_1 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 b$

Prozeß $A_1 A_2 \rightarrow P^{(*)} \rightarrow F_1 F_2$, 3 verschiedene Stufen:

Narrow Width $\sigma(A_1 A_2 \rightarrow P) \times \text{BR}(P \rightarrow F_1 F_2)$

Breit-Wigner $\sigma(A_1 A_2 \rightarrow P) \times \frac{M_P^2 \Gamma_P^2}{(s - M_P^2)^2 + \Gamma_P^2 M_P^2} \times \text{BR}(P \rightarrow F_1 F_2)$

Volles Matrixelement $\sigma(A_1 A_2 \rightarrow F_1 F_2)$


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

Haupt-Untergrund:

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

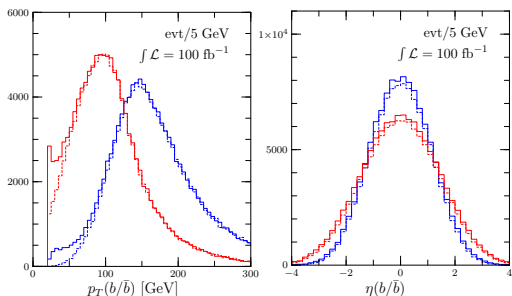
Signaljets härter

Off-Shell-Effekte am LHC:

PS: Härterer Jet zentraler

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

Nicht allg. garantiert



Prozeß	$\sigma \times \text{BR}$ [fb]	σ_{BW} [fb]	$\sigma_{\text{BW}}^{\text{cut}}$ [fb]
Zh	1.342	1.335	0.009
HA	0.320	0.314	0.003
$\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_2^0$	13.078	13.954	0.458
$\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_3^0$	3.675	4.828	0.454
$\tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_4^0$	0.061	0.938	0.937
$\tilde{b}_1 \tilde{b}_1^*$	0.759	0.757	0.451
Sum	19.238	22.129	2.314
Exact		19.624	0.487

ILC:

$$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0 \text{ [800 GeV]}$$

Schnitte auf $M_{b\bar{b}}$ eliminieren andere Resonanzen

Reelle Korrekturen: Bottom-Jet-Strahlung

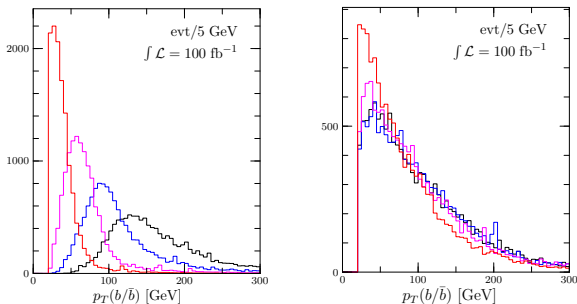
K. Hagiwara/.../JR/..., 2006

$g \rightarrow b\bar{b}$ -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

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

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



Nur der äußerste Vorwärts- b -Jet deutlich weicher

Reelle Korrekturen: Bottom-Jet-Strahlung

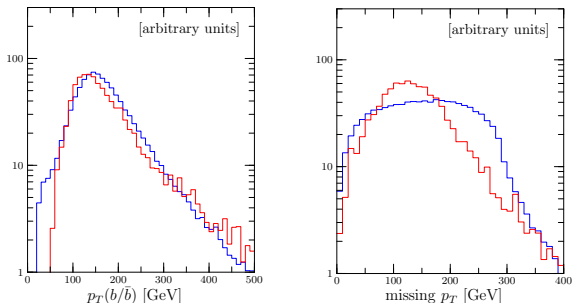
K. Hagiwara/.../JR/..., 2006

$g \rightarrow b\bar{b}$ -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

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

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?

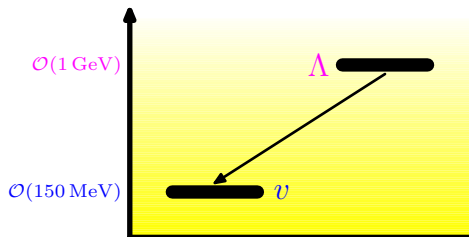
Higgs als Pseudo-Goldstone-Boson

Nambu-Goldstone-Theorem: Spontane Brechung einer globalen Symmetrie: masselosen (Goldstone)-Bosonen im Spektrum

Alte Idee:

Georgi/Pais, 1974; Georgi/Dimopoulos/Kaplan, 1984

Leichtes Higgs als (Pseudo)-Goldstone-Boson einer spontan gebrochenen globalen Symmetrie



Analog: QCD

Skala Λ : chirale
Symmetriebrechung, Quarks,
 $SU(3)_c$

Skala v : Pionen, Kaonen, ...

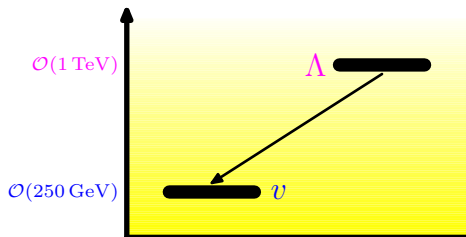
Higgs als Pseudo-Goldstone-Boson

Nambu-Goldstone-Theorem: Spontane Brechung einer globalen Symmetrie: masselosen (Goldstone)-Bosonen im Spektrum

Alte Idee:

Georgi/Pais, 1974; Georgi/Dimopoulos/Kaplan, 1984

Leichtes Higgs als (Pseudo)-Goldstone-Boson einer spontan gebrochenen globalen Symmetrie



Skala Λ : globale Symmetriebrechung, neue Teilchen, neue (Eich-)WW

Skala v : Higgs, W/Z , ℓ^\pm , ...

Ohne Fine-Tuning: experimentell ausgeschlossen

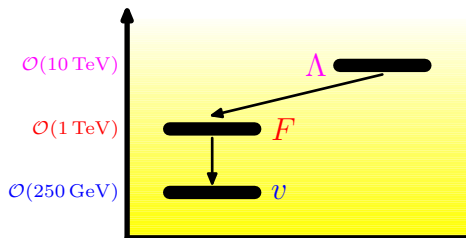
Kollektive Symmetriebrechung und 3-Skalen-Modelle

Kollektive Symmetriebrechung: Arkani-Hamed/Cohen/Georgi/Nelson/..., 2001

2 verschiedene globale Symmetrie; eine davon ungebrochen \Rightarrow
Higgs *exaktes* Goldstone-Boson

Coleman-Weinberg: Boson-Massen durch Strahlungskorrekturen, aber: m_H erst auf 2-Loop-Niveau

$$m_H \sim \frac{g_1}{4\pi} \frac{g_2}{4\pi} \Lambda$$



Skala Λ : globale SB, neue WW

Skala F :

Pseudo-Goldstone-Bosonen,
neue Vektoren/Fermionen

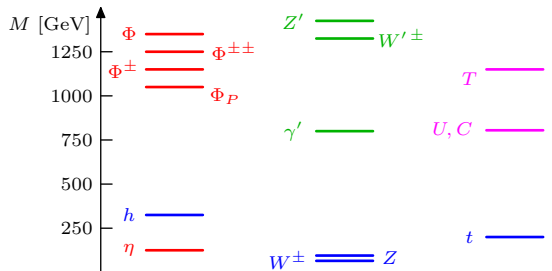
Skala v : Higgs, W/Z , ℓ^\pm , ...

Eigenschaften von Little-Higgs-Modellen

- Erweiterte Globale Symmetrie
- **Spezifische funktionale Form des Higgs-Potentials**
- Erweiterte Eichsymmetrie: γ', Z', W'^{\pm}
- Neue schwere Fermionen: T , aber auch U, C, \dots

Beispiel: Littlest Higgs

Arkani-Hamed/Cohen/Katz/Nelson, 2002



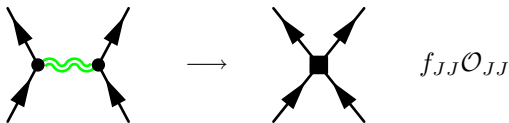
Kontaktterme/Elektroschwache Präzisionsobservablen

Little Higgs Effektive Feldtheorie: Ausintegrieren schwerer Teilchen im Pfadintegral, Power-Counting: v^2/F^2 Kilian/JR, 2003

Exp. Präzision im ‰-Bereich: Entwicklung nur bis Ordnung v^2/F^2

$$\mathcal{L}_{eff.} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_i f_{\mathcal{O}_i} \frac{v^2}{F^2} \mathcal{O}_i$$

$f_{\mathcal{O}_i}$: Abweichungen vom SM

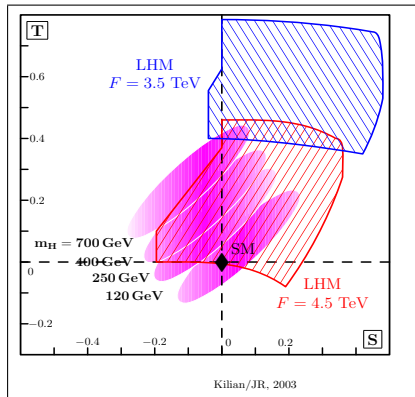


Schranken aus Kontaktwechselwirkungen (f_{JJ}): $F \gtrsim c^2 \cdot 4.5 \text{ TeV}$

Schranken verringert $\iff c \ll 1$

B', Z', W'^{\pm} superschwer, fermiophobisch

Schranken aus dem Elektroschwachen Fit



Tree-Level-Mischung Z, Z'
induziert große Korrekturen

Skala $F \gtrsim 1 - 3 \text{ TeV}$

Higgs kompensiert Z'

Schweres Higgs natürlich in LHM

Kilian/JR, 2003

Rekonstruktion von Little-Higgs-Modellen

Kilian/JR, 2003; Han et al., 2005

- ◇ Goldstone-Boson-Natur des Higgs-Bosons (nichtlineare Darstellung)
- ◇ Mechanismus zur Eliminierung der Quantenkorrekturen zu m_H

STRATEGIE:

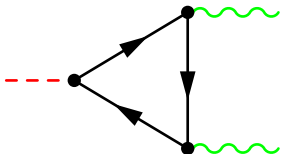
Kilian/JR, 2003

- ▶ LHC: $Z', W' \Rightarrow M_{Z'}, M_{W'}$ bis zu 5 – 6 TeV
ILC: Kontaktterme $\Rightarrow M_{Z'}, M_{W'}$ bis zu 10 – 20 TeV
Extraktion von F und $c \equiv \cos \phi$
- ▶ LHC: $T \Rightarrow M_T$ und Mischungsparameter
- ▶ ILC: Higgsstrahlung und WW -Fusion
(Winkelverteilungen/Energiespektren) \Rightarrow Higgskopplungen/-potential
- ▶ ILC/ $\gamma\gamma$: Higgszerfälle \Rightarrow Goldstone-Boson-Struktur
- ▶ ILC/GigaZ: Messung von $\Delta T \Rightarrow$ Beiträge schwerer Skalare
- ▶ Globaler Fit an LHC/ILC-Daten

Pseudo-Axionen in LHM

Kilian/Rainwater/JR, 2004

- $U(1)$ -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:

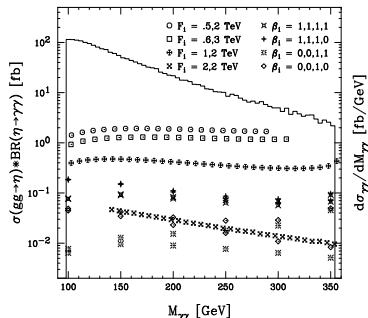
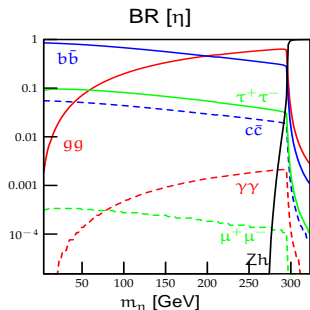
Anomale $U(1)$: 

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

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

Phänomenologie der Pseudo-Axionen

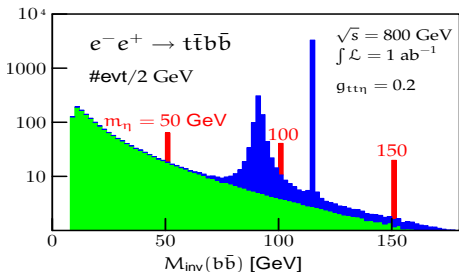
Kilian/Rainwater/JR, 2004



LHC: Gluon-Fusion,
Diphotonsignal für
 $m_\eta \gtrsim 200$ GeV, 7σ möglich

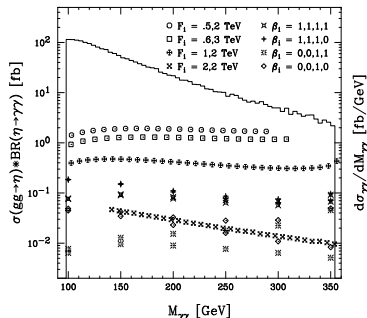
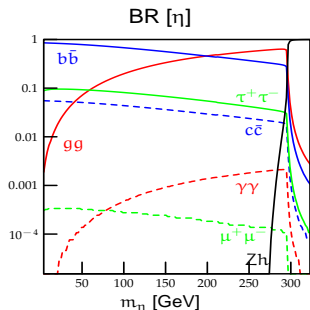
LHC: $T \rightarrow t\eta$

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



Phänomenologie der Pseudo-Axionen

Kilian/Rainwater/JR, 2004



LHC: Gluon-Fusion,
Diphotonsignal für
 $m_\eta \gtrsim 200$ GeV, 7σ möglich

LHC: $T \rightarrow t\eta$

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

$ZH\eta$ -Kopplung **diskriminiert**
unterschiedliche Little Higgs
Modelle

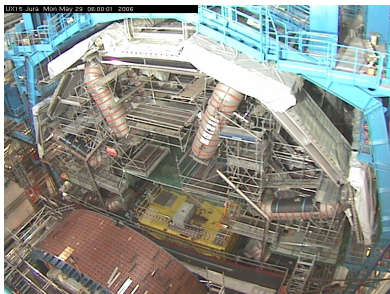
Rainwater/JR, 2006

Ausblick

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

Ausblick

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



Ausblick

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

