

# Channels & Challenges — Neue Physik am Large Hadron Collider

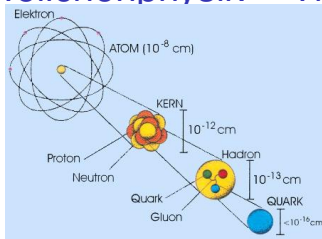
Jürgen Reuter

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg



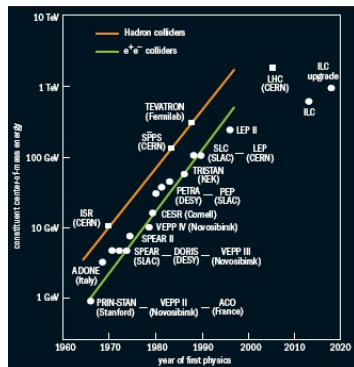
Vortrag, Göttingen, 17. Dezember 2007/Berlin, 14. Januar 2008

# Teilchenphysik - "The High Energy Frontier"



System	Größe	Energie
Moleküle	$10^{-8}$ m	$\sim 10^{-1}$ eV
Atome	$10^{-10}$ m	$\sim$ eV ..... keV
Kerne	$10^{-14}$ m	$\sim 10$ MeV
Nukleonen	$10^{-15}$ m	$\lesssim 1$ GeV

Auflösungsvermögen:  $\Delta x \sim (\Delta E)^{-1}$   
 $\Rightarrow$  **Hochenergie-Beschleuniger**







# Das Standardmodell der Teilchenphysik – Erfolge

THE STANDARD MODEL

	Fermions			Bosons	
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	$\gamma$ photon	Force carriers
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	$Z$ Z boson	
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$W$ W boson	
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$g$ gluon	
				Higgs boson*	

\*Yet to be confirmed

Source: AAAS

Wechselwirkung	Stärke	Reichweite	Eigenschaft
stark	1	$\sim 10^{-15}$ m	
elektromagnetisch	$10^{-2}$	$\infty$	
schwach	$10^{-12}$	$\lesssim 10^{-17}$ m	
Gravitation	$10^{-39}$	$\infty$	

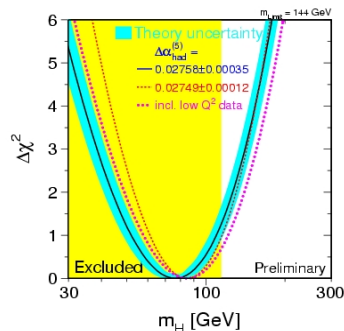
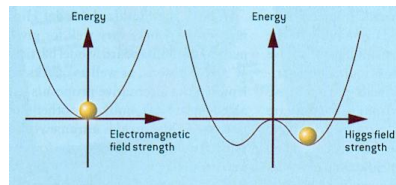
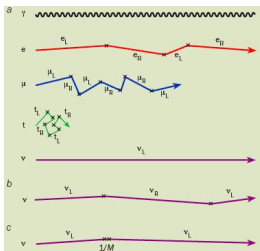
- Wechselwirkungen: relativistische Quantenfeldtheorien
- schwache WW: erklärt radioaktive Zerfälle Fermi, 1934
- elektroschwache Vereinigung Glashow, Salam, Weinberg, 1967-1969
- starke WW: asymptotische Freiheit Gross, Politzer, Wilczek, 1973
- Entdeckung des Gluons DESY 1979  $W, Z$  CERN, 1983
- Experimentelle Bestätigung: besser als 1%

# Das Higgs-Boson

- Higgs: fundamentales Skalarfeld

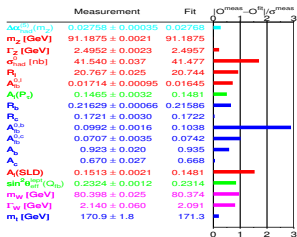
Brout, Englert, Higgs, 1964

- Vakuumerwartungswert  $v = 246 \text{ GeV}$
- bricht elektroschwache Symmetrie zum Elektromagnetismus
- verleiht Elementarteilchen Masse
- koppelt proportional zur Masse

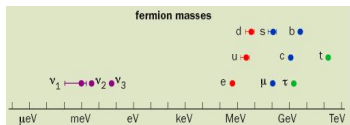


40 Jahre erfolglose Suche

# Das Standardmodell der Teilchenphysik – Zweifel



- beschreibt Mikrokosmos (zu gut?)
- 28 freie Parameter

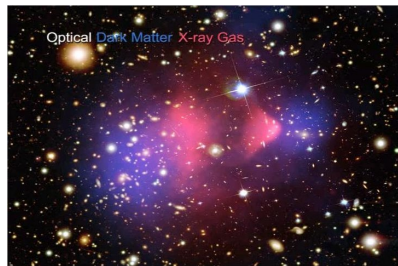
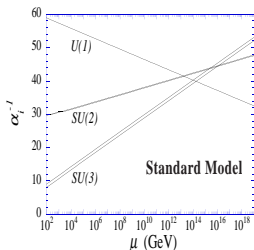


- Form des Higgs-Potentials ?



# Offene Fragen

- Vereinigung aller Wechselwirkungen (?)
- Baryonasymmetry  $\Delta N_B - \Delta N_{\bar{B}} \sim 10^{-9}$   
fehlende CP-Verletzung
- Flavour: drei Generationen
- Winzige Neutrino-Massen:  $m_\nu \sim \frac{v^2}{M}$
- Dunkle Materie:
  - ▶ stabil
  - ▶ schwach wechselwirkend
  - ▶  $m_{DM} \sim 100 \text{ GeV}$
- Quantentheorie der Gravitation
- Kosmische Inflation
- Kosmologische Konstante



# Ideen für Neue Physik seit 1970

## (1) 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

## (2) Neue Bausteine, Sub-Struktur

- **Technicolor/Topcolor:** Higgs gebundener Zustand stark wechselwirkender Teilchen

## (3) Nichttriviale Raumzeitstruktur eliminiert Hierarchie

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

## (4) Ignorieren der Hierarchie

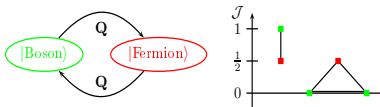
- **Anthropisches Prinzip:** Werte sind so, weil wir sie beobachten



## Supersymmetrie

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

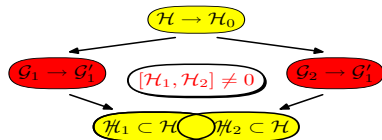
Große Vereinheitlichung

$R$ -Parität: Dunkle Materie

## Little Higgs

Globale Symmetrien: Korrekturen von Teilchen gleicher Statistik heben sich weg

Higgs: Goldstone-Boson spontan gebrochener globaler Symmetrie



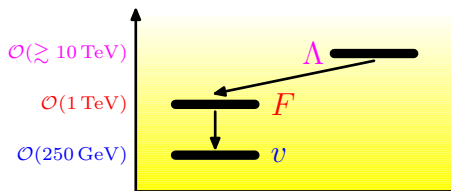
Kollektive Brechung globaler Symmetrien schützt Higgs-Masse

$M_H$  geschützt in erster Ordnung

stark wechselwirkend @10 TeV

$T$ -Parität: Dunkle Materie

# Charakteristika von Standard-Modell-Erweiterungen

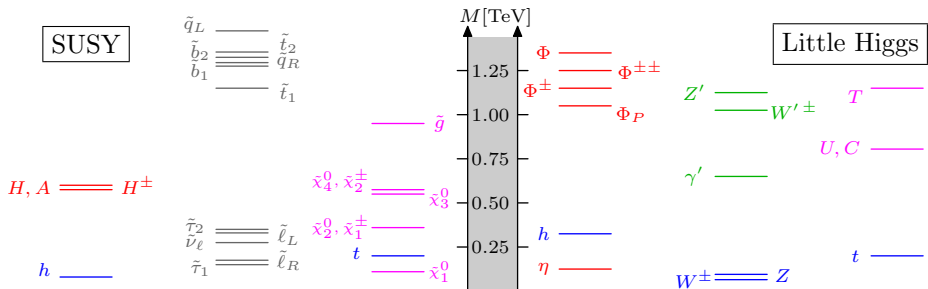


Skala  $\Lambda$ : “hidden sector”,  
Symmetriebrechung

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

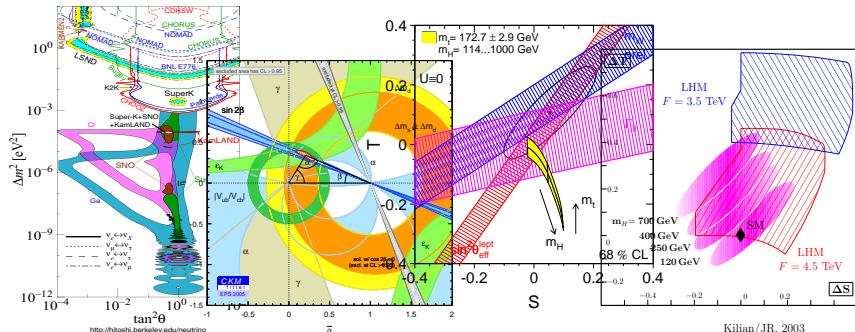
**Eichstruktur:** Elektroschwache Präzisionsobservablen

# Schranken an neue Modelle?

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

**Astrophysikalische Schranken:** Dunkle-Materie-Verteilung

**Eichstruktur:** Elektroschwache Präzisionsobservablen

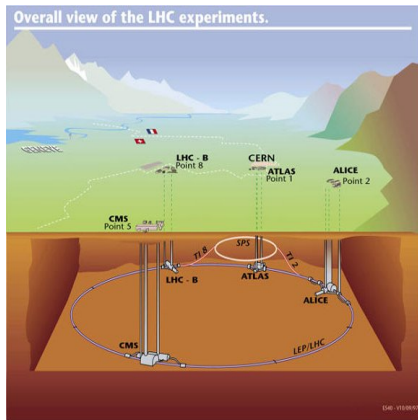
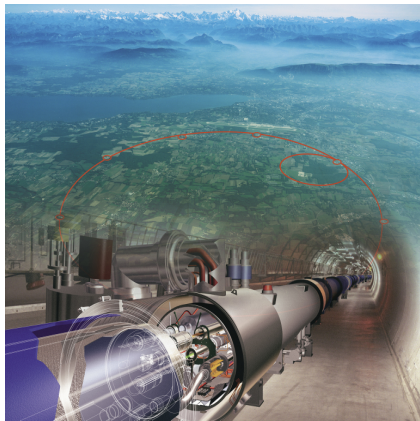


**Neue Teilchen-Skala  $F \gtrsim 1 - 3$  TeV**

# Direkte Suchen: Large Hadron Collider

LHC @ CERN: 2007/08

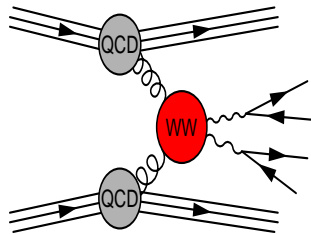
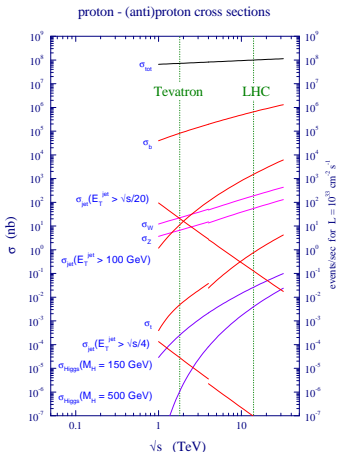
*pp*-Collider  $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$



# Die Herausforderung des LHC

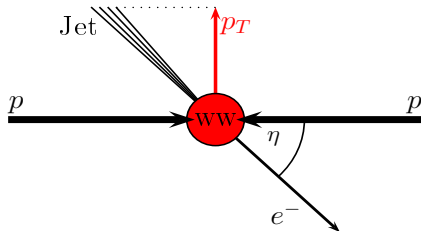
Partonische Subprozesse:  $qq, qg, gg$

Keine feste partonische Energie



Hohe Ereignisraten für  $t, W/Z, H$ ,  
 $\Rightarrow$  **riesige Untergründe**

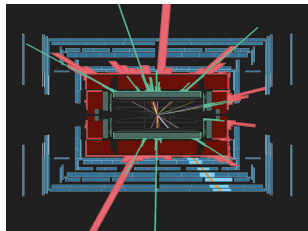
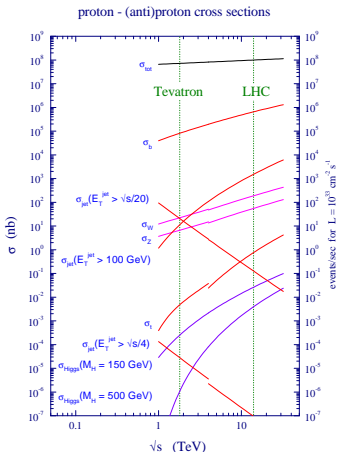
Schnitte zur Untergrundreduktion



# Die Herausforderung des LHC

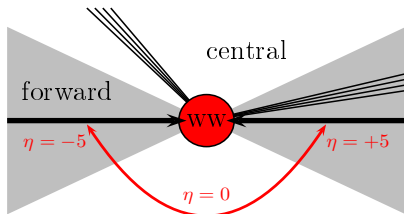
Partonische Subprozesse:  $qq, qg, gg$

Keine feste partonische Energie



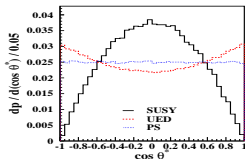
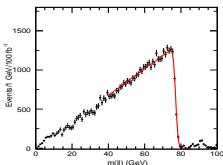
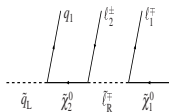
Hohe Ereignisraten für  $t, W/Z, H,$   
 $\Rightarrow$  **riesige Untergründe**

Schnitte zur Untergrundreduktion



# Modell-Diskriminierung – Präzisionsmessungen

- **Masse neuer Teilchen:** Endpunkte von Zerfallsspektren



- **Spin neuer Teilchen:** Spin neuer Teilchen: Winkelverteilungen, ...

- Modellbestimmung: **Messung von Kopplungskonstanten**

⇒ Präzise Vorhersagen für Signal und Untergründe

- Berücksichtigung von kinematischen Schnitten
- Exklusive Vielteilchen-Endzustände:  $2 \rightarrow 4$  bis  $2 \rightarrow 10$
- Quantenkorrekturen: Reelle und virtuelle Korrekturen



# Simulationen: Der Event-Generator WHIZARD



<http://whizard.event-generator.org>

## 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**

JR et al., 2006; Hagiwara/.../JR..., 2006

Kilian, 2001; JR, 2007

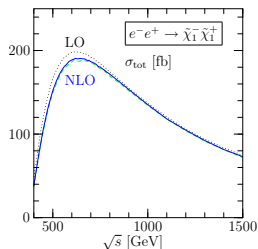
[STDHEP, HEPEVT, ATHENA, ...]

NLO-MC für  $e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-$

Kilian/JR/Robens, 2006

Beliebige Verteilungen @ NLO

⇒ BSM-MC für LHC



# Simulationen: Der Event-Generator WHIZARD



<http://whizard.event-generator.org>

## 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

JR et al., 2006; Hagiwara/.../JR..., 2006

Kilian, 2001; JR, 2007

[STDHEP, HEPEVT, ATHENA, ...]

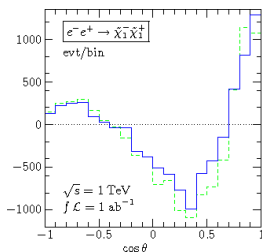
## – Virtuelle Korrekturen: NLO-Monte-Carlo

NLO-MC für  $e^+e^- \rightarrow \tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-$

Kilian/JR/Robens, 2006

Beliebige Verteilungen @ NLO

⇒ BSM-MC für LHC



# WHIZARD: Komplexität und Vielseitigkeit

Erlaubt höchsten Grad an Komplexität:

- ▶  $e^+e^- \rightarrow t\bar{t}H \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}jj\ell\nu$  (110.000 Diagramme)
- ▶  $e^+e^- \rightarrow ZHH \rightarrow ZWWWW \rightarrow bb + 8j$  (12.000.000 Diagramme)
- ▶  $pp \rightarrow \ell\ell + nj, n = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$  (2.100.000 Diagramme mit 4 Jets + Flavors)
- ▶  $pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 \tilde{\chi}_1^0 bbbb$  (32.000 Diagramme, 22 Farbflüsse,  $\sim 10,000$  PS-Kanäle)
- ▶  $pp \rightarrow VVjj \rightarrow jj\ell\ell\nu\nu$  einschl. anomaler TGC/QGC
- ▶ Test case  $gg \rightarrow 9g$  (224.000.000 Diagramme)

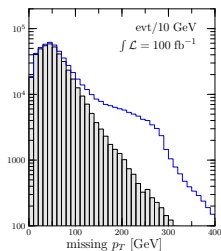
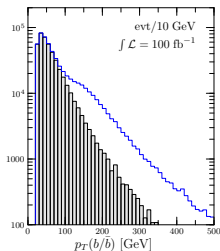
## Unterstützte Physik-Modelle:

- ▶ Test-Modelle: QED, QCD
- ▶ Standard-Modell
- ▶ Littlest/Simplest Little Higgs, Little-Higgs-Modelle mit  $T$ -Parität
- ▶ Moose-Modelle, Deconstructed dimensions
- ▶ MSSM, NMSSM, erweiterte SUSY-Modelle, Gravitinos (SLHA/SLHA2)
- ▶ Graviton-Resonanzen, Universelle Extra Dimensionen, Randall-Sundrum
- ▶ Nichtkommutatives Standard-Modell
- ▶ Höherdimensionale Operatoren, effektive Feldtheorien
- ▶ Anomale trilineare und quartische Eichkopplungen
- ▶ K-matrix/Padé-Unitarisierung, unitarisierte Resonanzen

# 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

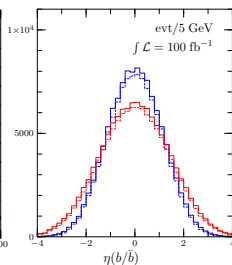
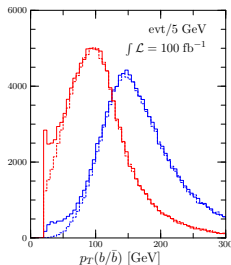
PS: Härterer Jet zentraler

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

Nicht allg. garantiert:

LHC-SUSY-Kaskaden

Alwall/Plehn/JR/Schumann



# Reelle Korrekturen: Bottom-Jet-Strahlung

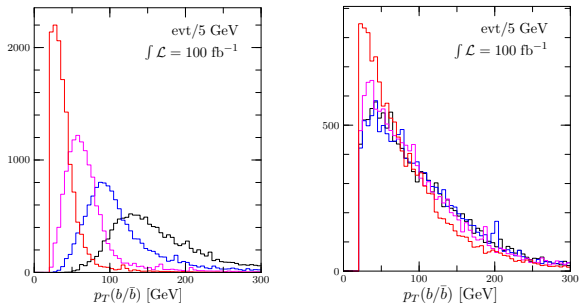
K. Hagiwara/.../JR/..., 2006

$g \rightarrow b\bar{b}$ -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,  $\sim 4000$  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

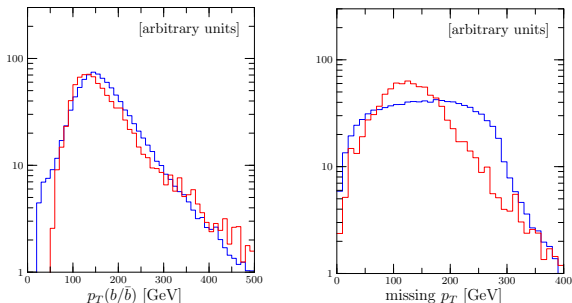
K. Hagiwara/.../JR/..., 2006

$g \rightarrow b\bar{b}$ -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,  $\sim 4000$  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

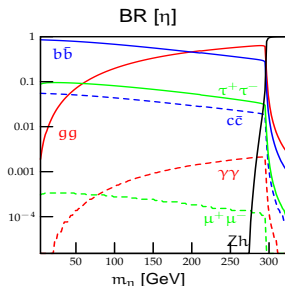
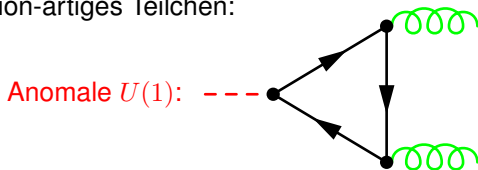


**Und wenn nicht SUSY?**

# Pseudo-Axionen in Little Higgs

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

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



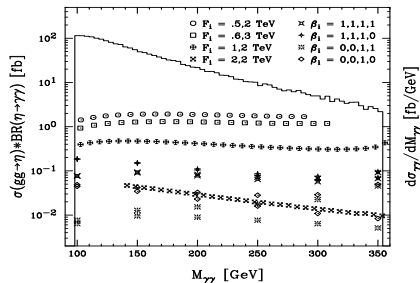
# Im Angesicht einer Entdeckung

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

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

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

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



# Im Angesicht einer Entdeckung

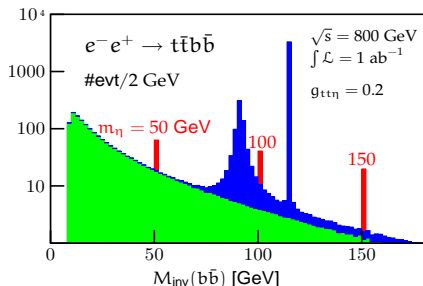
Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

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

LHC:  $T \rightarrow t\eta$

Boersma/Godfrey/JR

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



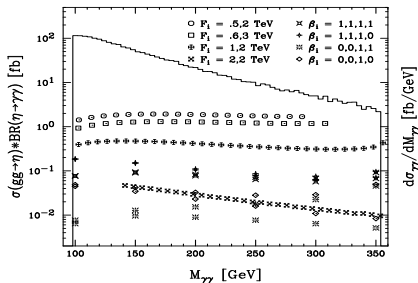
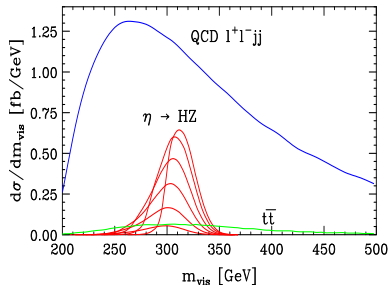
# Im Angesicht einer Entdeckung

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

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

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

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



**ZHη-Kopplung**

verboten in  
Produkt-Gruppen-Modellen

**Versch. Modellklassen  
unterscheidbar**

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

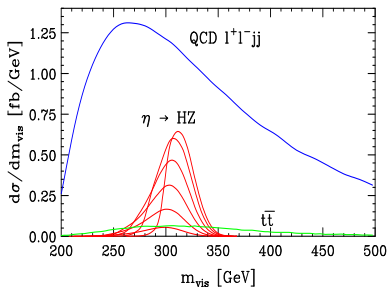
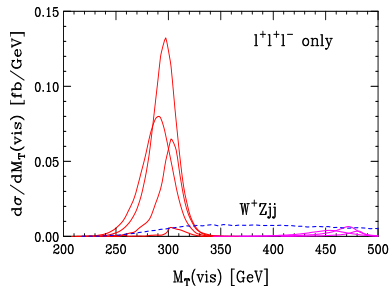
# Im Angesicht einer Entdeckung

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

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

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

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



**ZHη-Kopplung**

verboten in  
Produkt-Gruppen-Modellen

**Versch. Modellklassen  
unterscheidbar**

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

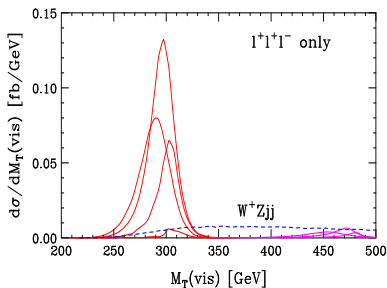
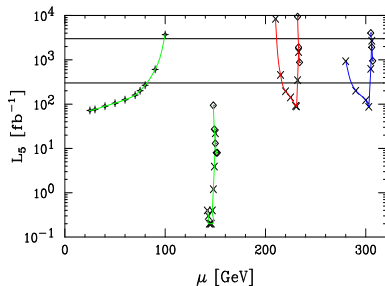
# Im Angesicht einer Entdeckung

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

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

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

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



**ZHη-Kopplung**

verboten in  
Produkt-Gruppen-Modellen

**Versch. Modellklassen  
unterscheidbar**

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

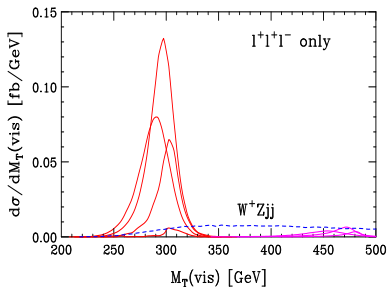
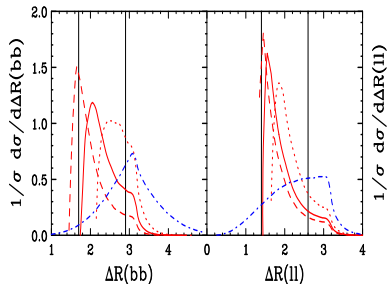
# Im Angesicht einer Entdeckung

Kilian/Rainwater/JR, 2004, 2006

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

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

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



**ZH $\eta$ -Kopplung**

verboten in  
Produkt-Gruppen-Modellen

**Versch. Modellklassen  
unterscheidbar**

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

# Präzisionsmaschine LHC – Anomale Eichkopplungen

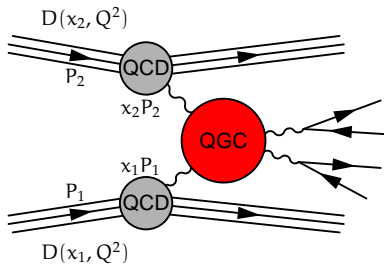
ILC: Beyer/Kilian/Krstonošić/Mönig/JR/Schröder/Schmidt, 2006  
 LHC: Aboteanu/Kilian/JR; Kilian/Kobel/Mader/JR/Schumacher

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.  $\tau$ ):



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

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

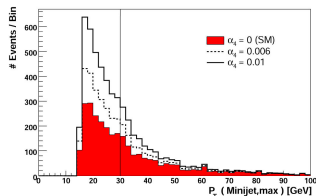
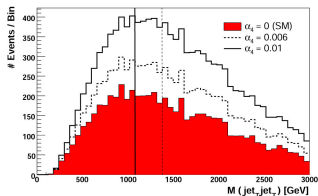
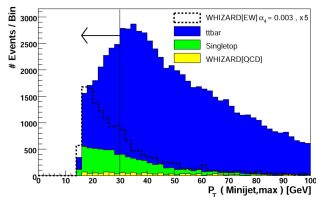
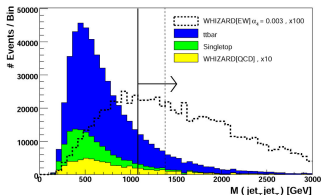
Untergrund:

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

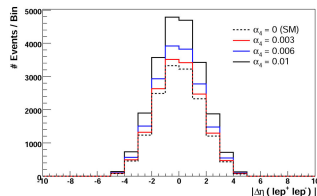
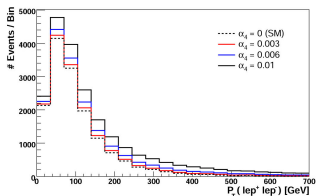
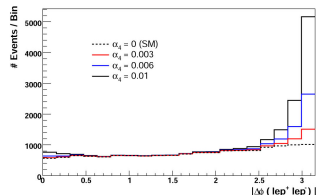
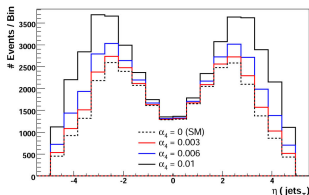
# Tagging und Schnitte:

- ▶  $\ell\ell jj$ -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:** ( $1\sigma$  Sensitivität auf  $\alpha_s$ )

Coupl.	ILC ( $1 \text{ ab}^{-1}$ )	LHC ( $100 \text{ fb}^{-1}$ )
$\alpha_4$	0.0088	0.00160
$\alpha_5$	0.0071	0.00098

Schranken auf  $\Lambda$  [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



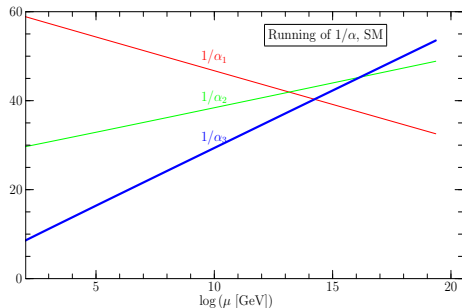
# DARK MATTER

Most of the universe can't even be bothered to interact with you.

# Modelle für Dunkle Materie

Kilian/JR, 2006; Deppisch/Kilian/JR

Eichkopplungen laufen:  $\frac{dg_a}{d \log \mu} = \frac{g_a^3}{16\pi^2} B_a$ ,  $B_a$  hängt vom Teilchenspektrum ab



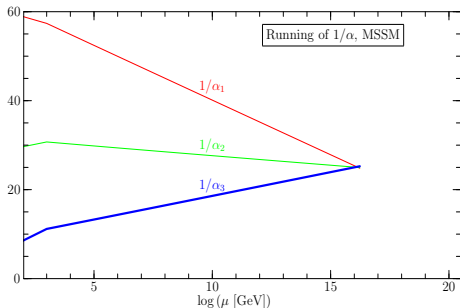
# Modelle für Dunkle Materie

Kilian/JR, 2006; Deppisch/Kilian/JR

Eichkopplungen laufen:  $\frac{dg_a}{d \log \mu} = \frac{g_a^3}{16\pi^2} B_a$ ,  $B_a$  hängt vom Teilchenspektrum ab

Sparticles ermöglichen Vereinigung

z.B.:  $SU(5) \rightarrow SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_Y$



# Modelle für Dunkle Materie

Kilian/JR, 2006; Deppisch/Kilian/JR

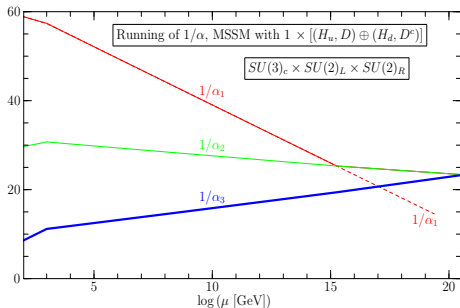
Eichkopplungen laufen:  $\frac{dg_a}{d \log \mu} = \frac{g_a^3}{16\pi^2} B_a$ ,  $B_a$  hängt vom Teilchenspektrum ab

Sparticles ermöglichen Vereinigung

z.B.:  $SU(5) \rightarrow SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_Y$

**Doublet-Triplet-Splitting-Problem:**  
Higgs-Partner  $D$ : Proton-Zerfall

$Dqq, D\ell q$



# Modelle für Dunkle Materie

Kilian/JR, 2006; Deppisch/Kilian/JR

Eichkopplungen laufen:  $\frac{dg_a}{d \log \mu} = \frac{g_a^3}{16\pi^2} B_a$ ,  $B_a$  hängt vom Teilchenspektrum ab

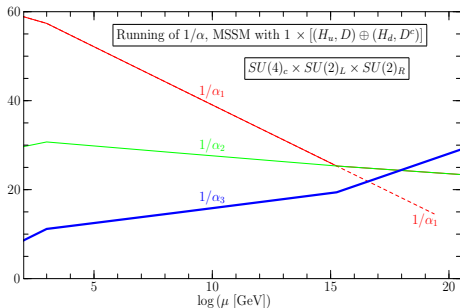
Sparticles ermöglichen Vereinigung

z.B.:  $SU(5) \rightarrow SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_Y$

**Doublet-Triplet-Splitting-Problem:**  
Higgs-Partner  $D$ : Proton-Zerfall

$D\bar{q}q, D\bar{l}q$

Kilian/JR, 2006



## Erweiterter MSSM Higgs-Sektor

- ▶ lockerere Higgs-Schranke (leichte Pseudoskalare)
- ▶ große unsichtbare Zerfallsrate möglich
- ▶ leichtestes Unhiggs: Dunkle Materie ( $H$ -Parität)
- ▶ Dunkler Materie-Cocktail: interessante Reliktdichte (Neutralino-Bounds nicht anwendbar!)
- ▶ Paar-Produktion von Unhiggses/Unhiggsinos, Kaskadenzerfälle

Floßdorf/JR

Floßdorf/JR

Braam/JR

Braam/JR

# Modelle für Dunkle Materie

Kilian/JR, 2006; Deppisch/Kilian/JR

Eichkopplungen laufen:  $\frac{dg_a}{d \log \mu} = \frac{g_a^3}{16\pi^2} B_a$ ,  $B_a$  hängt vom Teilchenspektrum ab

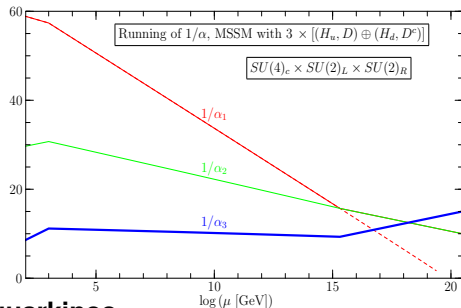
Sparticles ermöglichen Vereinigung

z.B.:  $SU(5) \rightarrow SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_Y$

**Doublet-Triplet-Splitting-Problem:**  
Higgs-Partner  $D$ : Proton-Zerfall

$D\bar{q}q, D\bar{l}q$

Kilian/JR, 2006



(Down-type) **Leptoquarks, Leptoquarkinos**

- ▶ 3 Generationen an der TeV-Skala
- ▶ Gluonfusion, single production
- ▶ Endzustände:  $t\tau, b\nu_\tau, \tilde{t}\tau, \dots$
- ▶ falls TeV-Flavorsymmetrie:  $gq \rightarrow D\ell$  verstärkt, Zerfälle  $t\mu, te$

Braam/JR/Wiesler

Erweiterter Neutralino-Sektor wie im NMSSM

# Ausblick

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



# Ausblick

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

