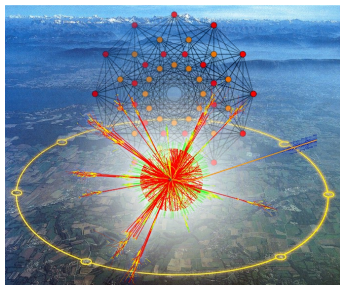


# Auf den Spuren exzeptioneller Grand Unification am LHC

Jürgen Reuter

DESY Hamburg



Seminar, Freiburg, 30.01.2012

# Das Standardmodell der Teilchenphysik

## 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

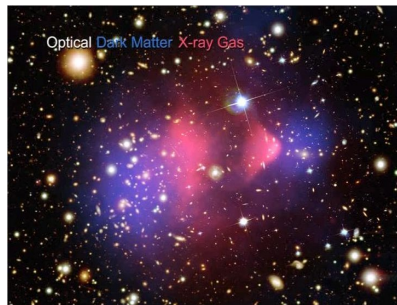
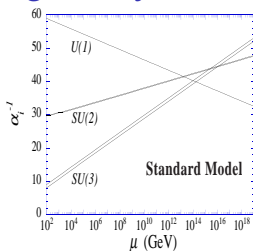
Source: AAAS

– beschreibt Mikrokosmos (zu gut?)



# Offene Fragen der Teilchen-/Hochenergie-Physik

- Vereinigung aller Wechselwirkungen (?)
- Baryonasymmetrie  $\Delta N_B - \Delta N_{\bar{B}} \sim 10^{-9}$   
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

# 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

# Grand Unification, z.B. $SU(5)$

$$SU(5) \xrightarrow{M_X} SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_Y \xrightarrow{M_Z} SU(3)_c \times U(1)_{em}$$

$SU(5)$  hat  $5^2 - 1 = 24$  Generatoren:

$$24 \rightarrow \underbrace{(8, 1)_0}_{G_\alpha^\beta} \oplus \underbrace{(1, 3)_0}_W \oplus \underbrace{(1, 1)_0}_B \oplus \underbrace{(3, 2)_{\frac{5}{3}}}_{X, Y} \oplus \underbrace{(\bar{3}, 2)_{-\frac{5}{3}}}_{\bar{X}, \bar{Y}}$$



# Grand Unification, z.B. $SU(5)$

$$SU(5) \xrightarrow{M_X} SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_Y \xrightarrow{M_Z} SU(3)_c \times U(1)_{em}$$

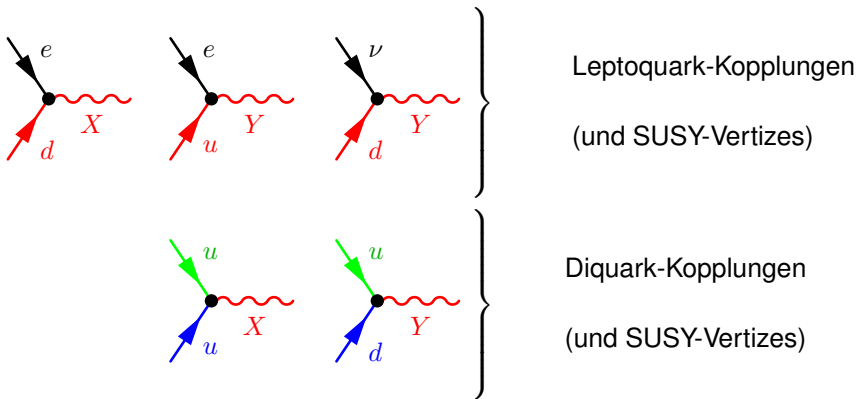
$SU(5)$  hat  $5^2 - 1 = 24$  Generatoren:

$$24 \rightarrow \underbrace{(8, 1)_0}_{G_\alpha^\beta} \oplus \underbrace{(1, 3)_0}_W \oplus \underbrace{(1, 1)_0}_B \oplus \underbrace{(3, 2)_{\frac{5}{3}}}_{X, Y} \oplus \underbrace{(\bar{3}, 2)_{-\frac{5}{3}}}_{\bar{X}, \bar{Y}}$$

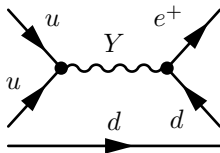
$$A = g \sum_{a=1}^{24} A^a \frac{\lambda^a}{2} = \frac{g}{\sqrt{2}} \left( \begin{array}{ccc|cc} \sqrt{2} G^a \frac{\lambda_{GM}^a}{2} & & & \bar{X} & \bar{Y} \\ & & & \bar{X} & \bar{Y} \\ & & & \bar{X} & \bar{Y} \\ \hline X & Y & X & & \\ Y & Y & Y & & \\ & & & \sqrt{2} W^a \frac{\sigma}{2} & \end{array} \right)$$

$$- \frac{g}{2\sqrt{15}} B \left( \begin{array}{ccc|cc} -2 & & & & \\ & -2 & & & 0 \\ & & -2 & & \\ \hline & & & 0 & +3 \\ & & & & +3 \end{array} \right)$$

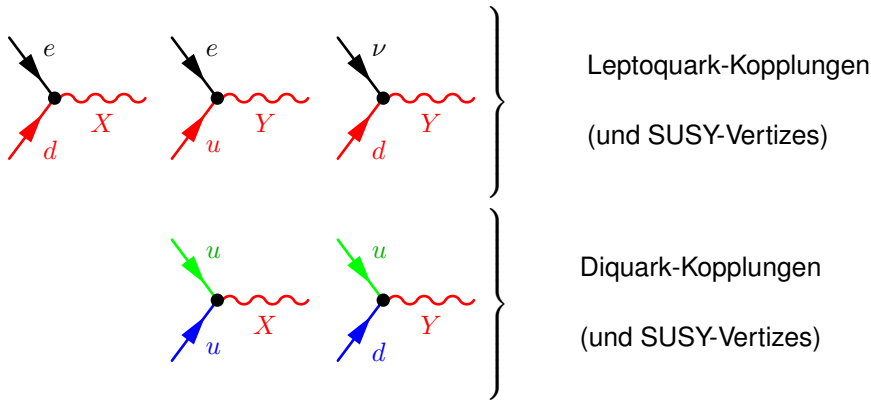
# Wechselwirkungen



Vektorbosonen induzieren z.B.  
Zerfall  $p \rightarrow e^+ \pi^0$



# Wechselwirkungen

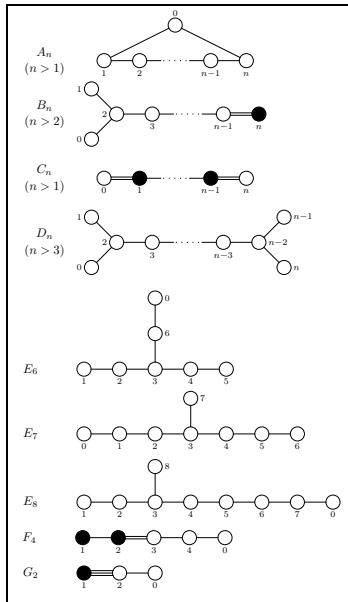


**Proton-Lebensdauer** mit  $\alpha(M_{GUT}) \sim \frac{1}{24}$  und  $M_{GUT} \sim 2 \times 10^{16}$  GeV:

$$\tau(p \rightarrow e^+ \pi^0) \sim \frac{M_{GUT}^4}{[\alpha(M_{GUT})]^2 m_p^5} \rightarrow 10^{31 \pm 1} \text{ Jahre}$$

# Exzeptionelle Lie-Algebren

Lie, 1881; Dynkin, 1957



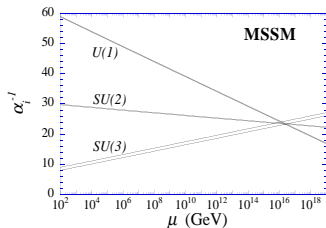
# $E_6$ SUSY Grand Unification

Kilian/JRR, PLB 2006

Supersymmetrie: erlaubt konsistente Extrapolation  
zu (sehr) hohen Skalen

- ⇒ Keine Split Multiplets
- ⇒ Chirale Exotika an der TeV-Skala
- ⇒ kein  $\mu$ -Problem

- ▶ Higgs-Materie-Vereinigung
- ▶ **Ansatz:** Alle neue Teilchen an der TeV-Skala



$E_6$ -Darstellung **27** :

$$Q_L = (\mathbf{3}, \mathbf{2})_{\frac{1}{6}, Q'_Q}$$

$$u^c = (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1})_{-\frac{2}{3}, Q'_u}$$

$$d^c = (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1})_{\frac{1}{3}, Q'_d}$$

$$H^u = (\mathbf{1}, \mathbf{2})_{\frac{1}{2}, Q'_{H^u}}$$

$$H^d = (\mathbf{1}, \mathbf{2})_{-\frac{1}{2}, Q'_{H^d}}$$

$$S = (\mathbf{1}, \mathbf{1})_{0, Q'_S} \neq 0$$

$$L_L = (\mathbf{1}, \mathbf{2})_{-\frac{1}{2}, Q'_L}$$

$$\nu^c = (\mathbf{1}, \mathbf{1})_{0, Q'_\nu=0}$$

$$e^c = (\mathbf{1}, \mathbf{1})_{1, Q'_e}$$

$$D = (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{-\frac{1}{3}, Q'_D}$$

$$D^c = (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1})_{\frac{1}{3}, -Q'_D}$$

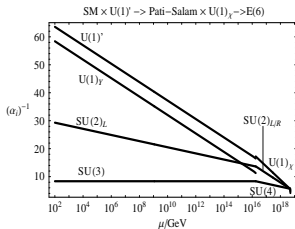
# $E_6$ SUSY Grand Unification

Kilian/JRR, PLB 2006

Supersymmetrie: erlaubt konsistente Extrapolation zu (sehr) hohen Skalen

- ⇒ Keine Split Multiplets
- ⇒ Chirale Exotika an der TeV-Skala
- ⇒ kein  $\mu$ -Problem

- ▶ Higgs-Materie-Vereinigung
- ▶ **Ansatz:** Alle neue Teilchen an der TeV-Skala



$E_6$ -Darstellung 27 :

$$Q_L = (\mathbf{3}, \mathbf{2})_{\frac{1}{6}, Q'_Q}$$

$$u^c = (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1})_{-\frac{2}{3}, Q'_u}$$

$$d^c = (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1})_{\frac{1}{3}, Q'_d}$$

$$H^u = (\mathbf{1}, \mathbf{2})_{\frac{1}{2}, Q'_{H^u}}$$

$$H^d = (\mathbf{1}, \mathbf{2})_{-\frac{1}{2}, Q'_{H^d}}$$

$$S = (\mathbf{1}, \mathbf{1})_{0, Q'_S} \neq 0$$

$$L_L = (\mathbf{1}, \mathbf{2})_{-\frac{1}{2}, Q'_L}$$

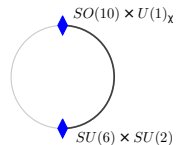
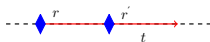
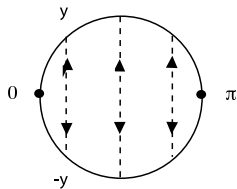
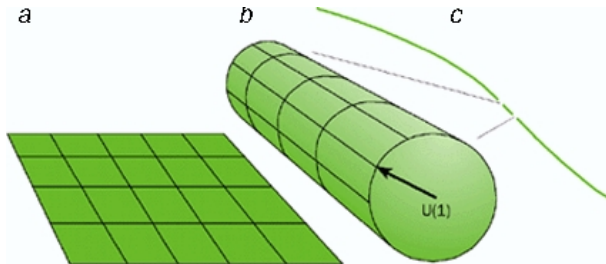
$$\nu^c = (\mathbf{1}, \mathbf{1})_{0, Q'_\nu=0}$$

$$e^c = (\mathbf{1}, \mathbf{1})_{1, Q'_e}$$

$$D = (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{-\frac{1}{3}, Q'_D}$$

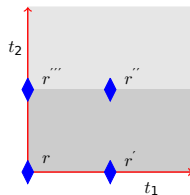
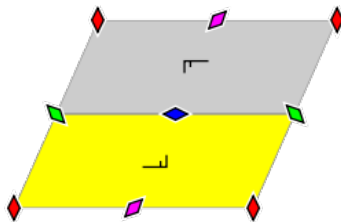
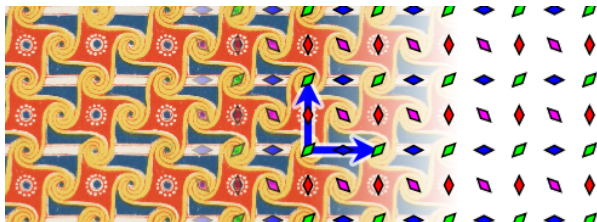
$$D^c = (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1})_{\frac{1}{3}, -Q'_D}$$

# Orbifold-Brechung in Extra-Dimensionen



# Orbifold-Brechung in Extra-Dimensionen

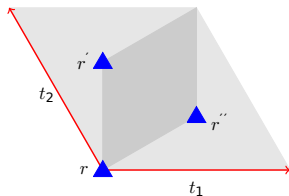
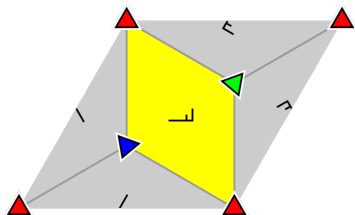
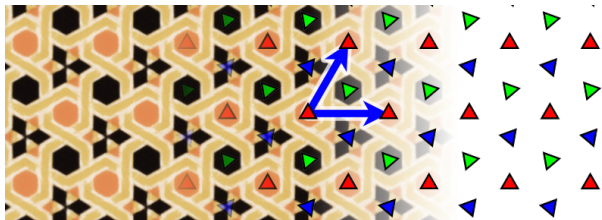
6D Orbifolds:  $\mathbb{R}^4 \times (\mathbb{R}^2/\Gamma)$ ,  $\Gamma$  eine der 17 kristallographischen Gruppen





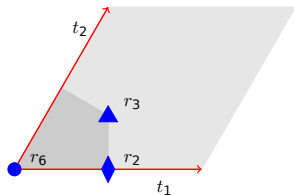
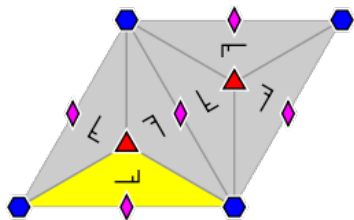
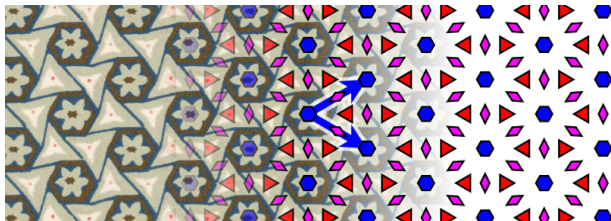
# Orbifold-Brechung in Extra-Dimensionen

6D Orbifolds:  $\mathbb{R}^4 \times (\mathbb{R}^2/\Gamma)$ ,  $\Gamma$  eine der 17 kristallographischen Gruppen



# Orbifold-Brechung in Extra-Dimensionen

6D Orbifolds:  $\mathbb{R}^4 \times (\mathbb{R}^2/\Gamma)$ ,  $\Gamma$  eine der 17 kristallographischen Gruppen



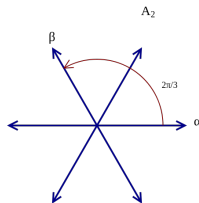
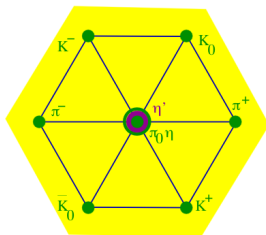
# Gauge Twists in Orbifolds

- ▶ Gauge Twist an den Fixpunkten bricht Eichgruppe

$$E_6 \rightarrow SU(3) \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_\chi$$

- ▶ Herausprojizieren durch "Gauge Twist Vectors" eliminiert bestimmte Wurzeln (Generatoren) aus dem Wurzelgitter

$$\Phi \rightarrow \exp [2\pi i \mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\alpha}]$$

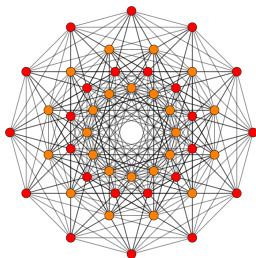


- ▶ Diskrete Wilson-Linie: diskrete interne Symmetrie, entspricht Shift des Wurzelgitters

# Gauge Twists in Orbifolds

- ▶ Gauge Twist an den Fixpunkten bricht Eichgruppe  
 $E_6 \rightarrow SU(3) \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_\chi$
- ▶ Herausprojizieren durch "Gauge Twist Vectors" eliminiert bestimmte Wurzeln (Generatoren) aus dem Wurzelgitter

$$\Phi \rightarrow \exp [2\pi i \mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\alpha}]$$



- ▶ Diskrete Wilson-Linie: diskrete interne Symmetrie, entspricht Shift des Wurzelgitters

# LR-Modelle aus 6D-Orbifolds

Braam/Knoche/JRR, JHEP 1006:013

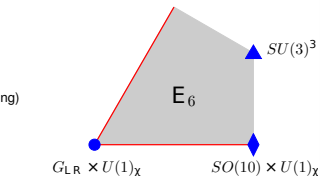
- $H$ -Parität: mindestens ein Fixpunkt **unterscheidet Higgs/Materie**
- mindestens ein Fixpunkt **unterscheidet LQ/DQ-Kopplungen**

- Benutze  $T^2/\mathbb{Z}_6$  (a.k.a.  $\mathbb{R}^2/632$  or  $p6$ )
- Twist-Vektor  $\vec{v}(r_6) = (\frac{1}{6}, -\frac{1}{6}, -\frac{1}{3}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{6}, 0)$  ( $\overline{Q}_{B-L}$ -Richtung)
- Keine diskreten Wilson-Linien erlaubt

► Anomalien auf Fixpunkten verschwinden!

► 3. Generation auf Trinification FP  $SU(3)^3$  unterscheidet LQ/DQ Kopplungen:

$SU(3)^3 \backslash SO(10)_{Q_X}$	$16_{\frac{1}{2}}$	$10_{-1}$	$1_2$
<b>A</b> = $(\overline{3}, 1, 3)$	$Q_R$	$D^c$	—
<b>B</b> = $(3, 3, 1)$	$Q_L$	$D$	—
<b>C</b> = $(1, \overline{3}, \overline{3})$	$L_L, L_R$	$(H_u, H_d)$	$S$



$$27^3 \rightarrow A^3 + B^3 + C^3 + ABC$$

► 1.+2. Generation auf LR Fixpunkt (erlaubt LQ-Kopplungen)

► LR-Symmetriebrechung durch Brane-lokalisierte Materie  $\langle \nu^c \rangle$  (Trinific./ $SO(10)$  FP.)

•  $\mathbb{Z}_n$  Orbifold bricht 4D  $\mathcal{N} = 1$  SUSY  $(\xi_1, \bar{\xi}_2) \xrightarrow{\theta} (e^{-i\pi/n}\xi_1, e^{i\pi/n}\bar{\xi}_2)$ , erhalten durch:

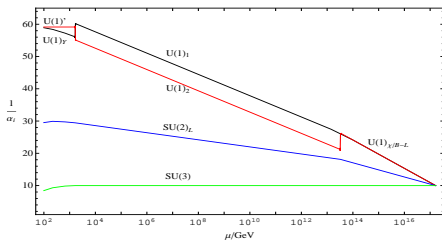
- 10D Lorentz-Phasen:  $\theta = \exp \left[ \frac{A}{4} [\Gamma^5, \Gamma^6] + \frac{B}{4} [\Gamma^7, \Gamma^8] + \frac{C}{4} [\Gamma^9, \Gamma^{10}] \right]$
- Nicht-triviale Einbettung der  $SU(2)$  R-Symmetrie  $\theta = \exp \left[ \frac{c}{4} ([\Gamma^5, \Gamma^6] + c_R i I^{3R}) \right]$

# Model Building $\Rightarrow$ Phänomenologie



# Allg. Eigenschaften

Braam/Knochel/JRR, JHEP 1006:013 + '12; Braam/JRR, EPJC 1107.2806



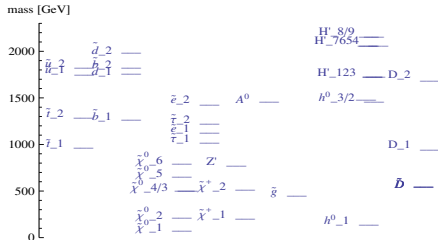
Superpot.: 
$$\mathcal{W} = Y^u u^c Q H_u + Y^d d^c Q H_d + Y^e e^c L H_d + Y^D D u^c e^c + Y^{D^c} D^c Q L$$

$$+ Y^{S_H} S H_u H_d + Y^{S_D} S D D^c$$

- Verschwindende 1-loop QCD  $\beta$ -Funktion  $\Rightarrow$  **Leichtes Gluino**
- Higgs-/Neutralino-Sektor versch. zu MSSM (Singlett-Beimischung)
- $U(1)'$   $D$ -Terme ergeben ausreichend  $S^4$ -Terme (und  $H^4$ -Terme)
- $D/\tilde{D}$ -Schleifen  $\Rightarrow$  negatives  $m_S^2$ ,  $t/\tilde{t}$ -Schleifen  $\Rightarrow$  negatives  $m_{H_u}^2$
- Konfiguration läuft in großen  $\langle S \rangle \sim 3 - 7$  TeV
- **Flavoured Higgs-Sektor: Unhiggses, Unhiggsinos**
- **Leptoquarks/Leptoquarkinos**

# Allg. Eigenschaften

Braam/Knochel/JRR, JHEP 1006:013 + '12; Braam/JRR, EPJC 1107.2806



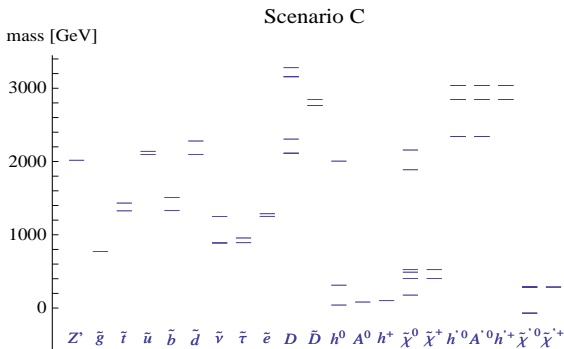
Superpot.:  $\mathcal{W} = Y^u u^c Q H_u + Y^d d^c Q H_d + Y^e e^c L H_d + Y^D D u^c e^c + Y^{D^c} D^c Q L$   
 $+ Y^{S_H} S H_u H_d + Y^{S_D} S D D^c$

- Verschwindende 1-loop QCD  $\beta$ -Funktion  $\Rightarrow$  Leichtes Gluino
- Higgs-/Neutralino-Sektor versch. zu MSSM (Singlett-Beimischung)
- $U(1)'$   $D$ -Terme ergeben ausreichend  $S^4$ -Terme (und  $H^4$ -Terme)
- $D/\tilde{D}$ -Schleifen  $\Rightarrow$  negatives  $m_S^2$ ,  $t/\tilde{t}$ -Schleifen  $\Rightarrow$  negatives  $m_{H_u}^2$
- Konfiguration läuft in großen  $\langle S \rangle \sim 3 - 7$  TeV
- Flavoured Higgs-Sektor: Unhiggses, Unhiggsinos
- Leptoquarks/Leptoquarkinos



# Allg. Eigenschaften; Spektren

Braam/Knochel/JRR/Wiesler, '12



- ▶ **Higgs-Boson:**  $m_h \approx 110 - 130 \text{ GeV}$
- ▶  **$Z'$ :**  $m_{Z'} \approx 2.0 - 2.5 \text{ TeV}$ ,  $\Gamma_{Z'} \approx 40 \text{ GeV}$  (**Asymmetrien!**)
- ▶  $\tan \beta \approx 40$  (top-bottom-Unification)
- ▶ **Dunkle Materie:** leichtestes Unhiggsino,  $m_{\tilde{\chi}^\pm} \sim \mathcal{O}(0.1 - 1 \text{ GeV})$   
( $R$ -ungerade **und**  $H$ -ungerade)



- ▶ Vielzweck-Eventgenerator für Teilchen- und Astroteilchenphysik
- ▶ Fokus: LHC, ILC, CLIC, SM, QCD, **BSM**
  - ▶ Schnelle adaptive Vielkanal-Monte Carlo-Integration
  - ▶ Sehr effiziente Phasenraum- und Ereigniserzeugung
  - ▶ Optimierte Matrix-Elemente
  - ▶ Aktuelle Version: 2.0.6 (07.12.2011)  
<http://projects.hepforge.org/whizard> und  
<http://whizard.event-generator.org>
  - ▶ Parton-Shower ( $k^\perp$ -geordnet und analytisch)
  - ▶ Underlying Event: vorläufig (für 2.1)
  - ▶ Beliebige Prozesse: Matrix-Elementgenerator (O'Mega)
  - ▶ Features: ME/PS-Matching, Kaskaden, omnipotente Steuersyntax
- ▶ Interface zu FeynRules Christensen/Duhr/Fuks/JRR/Speckner, 1010.3215
- ▶ SUSY-Jetstudien am LHC durch irreduzible ISR Hagiwara/.../JRR/..., PRD 2005

# WHIZARD

Kilian/Ohl/JRR: DESY/Freiburg/Siegen/Würzburg, hep-ph/0102195, 0708.4233



- ▶ Vielzweck-Eventgenerator für Teilchen- und Astroteilchenphysik
- ▶ Fokus: LHC, ILC, CLIC, SM, QCD, **BSM**

MODEL TYPE	mit CKM-Matrix	triviale CKM
QED mit $e, \mu, \tau, \gamma$	—	QED
QCD mit $d, u, s, c, b, t, g$	—	QCD
Standard model	SM_CKM	SM
SM mit anomalen Kopplungen	SM_ac_CKM	SM_ac
SM mit anomalens top couplings	—	SM_top
SM mit K matrix	—	SM_KM
MSSM	MSSM_CKM	MSSM
MSSM mit Gravitinos	—	MSSM_Grav
NMSSM	NMSSM_CKM	NMSSM
extended SUSY models	—	PSSSM
Littlest Higgs	—	Littlest
Littlest Higgs mit ungeeichter $U(1)$	—	Littlest_Eta
Littlest Higgs mit $T$ -Parität	—	Littlest_Tpar
Simplest Little Higgs (anomalie-frei)	—	Simplest
Simplest Little Higgs (universell)	—	Simplest_univ
UED	—	UED
3-Site Higgsless Model	—	Threshl
Nichtkommutatives SM (inoff.)	—	NCSM
SM mit $Z'$	—	Zprime
SM mit Gravitino und Photino	—	GravTest
Erweiterbares SM-Template	—	Template

leicht, neue  
Modelle zu implementieren

- ▶ Interface zu FeynRules
- ▶ SUSY-Jetstudien am LHC durch irreduzible ISR

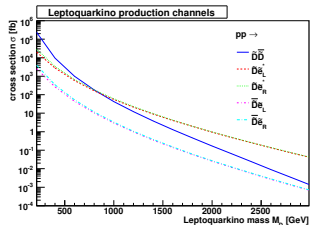
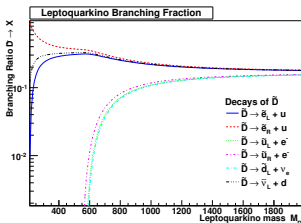
Christensen/Duhr/Fuks/JRR/Specner, 1010.3215

Hagiwara/.../JRR/..., PRD 2005

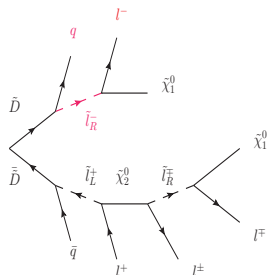
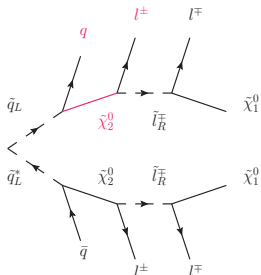
# Vorhersagen aus $E_6$ GUTs für LHC

JRR/Wiesler, PRD 2011

## ► Eigenschaften der Leptoquarkinos:



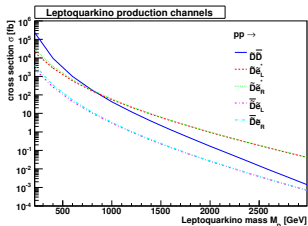
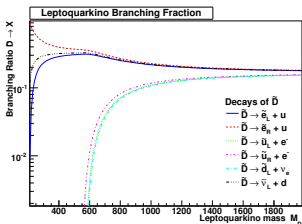
## ► Identische exklusive Endzustände:



# Vorhersagen aus $E_6$ GUTs für LHC

JRR/Wiesler, PRD 2011

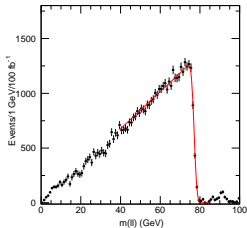
- Eigenschaften der Leptoquarkinos:



- Massenkanten in invarianten Verteilungen:

Diagram showing the production of a leptoquarkino  $\tilde{\chi}_1^0$  via the exchange of a leptoquarkino  $\tilde{q}$  between a gluino  $\tilde{g}$  and a quark  $q$ .

$$(m_{jj}^{\text{max.}})^2 = \frac{(m_{\tilde{g}}^2 - m_{\tilde{q}}^2)(m_{\tilde{q}}^2 - m_q^2)}{m_{\tilde{q}}^2}$$

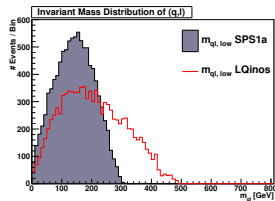
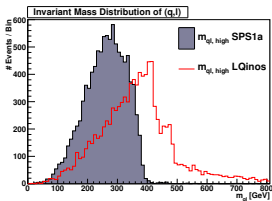


# Massenkanten für Leptoquarkinos

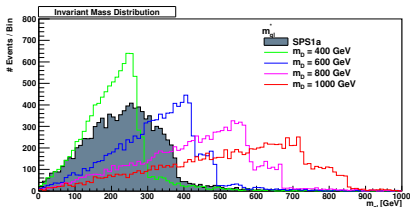
JRR/Wiesler, PRD 2011

- ▶ Massenkanten dominanter wegen fehlender Spinkorrelationen

$$m_{ql,high} = \max\{m_{ql+}, m_{ql-}\} \quad m_{ql,low} = \min\{m_{ql+}, m_{ql-}\}$$



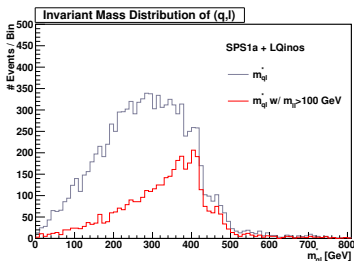
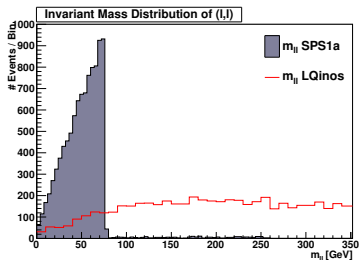
- ▶ Kombinatorische Untergründe: kombiniere weichsten Jet und härtestes Lepton:  $m_{ql}^* = m(\min_E \{q_1, q_2\}, \max_E \{l^+, l^-\})$



# Unterscheidung von Standard-SUSY

JRR/Wiesler, PRD 2011

- Dilepton-Spektrum: Standard SUSY  $\Rightarrow$  selbe Kaskade, Leptoquarkinos  $\Rightarrow$  verschiedene Kaskaden
- Schnitt auf kinematische Kante in Standard-Dileptonspektren



- S/B-Abschätzung,  $100 \text{ fb}^{-1}$ , 2 OSSF, 2 harte Jets,  $\cancel{E}_T$

$m_{\tilde{D}}$	# N(LQino) & N(SUSY)	# $N_{cut}$	$S / \sqrt{S+B}$
400	8763	5061	54
600	1355	540	15
800	684	102	4
1000	594	24	1

# Massenkanten in inklusiven 4-Jet-Observablen

- ▶ kinematische Variable zur Massebestimmung in inklusiven Multijet-Endzuständen
- ▶ Benutze Liste  $p_T$ -geordneter Jets:

Pietsch/JRR/Sakurai/Wiesler, 2012

$$m_{\min}^{\text{low},1} = \min [m(j(1), j(-1)), m(j(2), j(-1))]$$

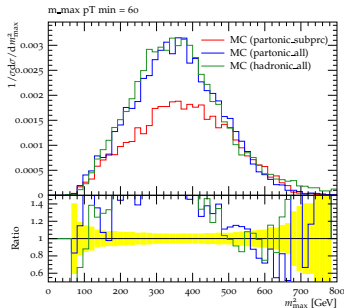
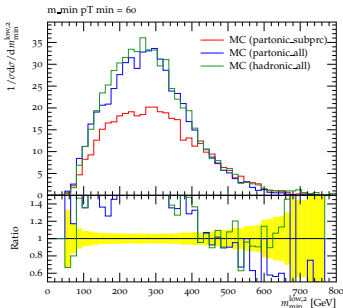
$$m_{\min}^{\text{low},2} = \min [m(j(1), j(4)), m(j(2), j(4))]$$

$$m_{\min}^{\text{high},1} = \min [m(j(1), j(-1)), m(j(1), j(-2))]$$

$$m_{\min}^{\text{high},2} = \min [m(j(1), j(4)), m(j(1), j(3))]$$

$$m_{\max}^{1/2} = \max [m_{\min}^{\text{low},1/2}, m_{\min}^{\text{high},1/2}]$$

$m_{\tilde{g}} = 797 \text{ GeV}$ ,  $m_{\tilde{\chi}_1^0} = 123 \text{ GeV}$ ,  $m_{\tilde{q}} = 1.3 - 1.6 \text{ TeV}$ , anti- $k_T$  mit 60 GeV



- ▶ Massenkante ist gegen irreduziblen Background und ISR stabil!

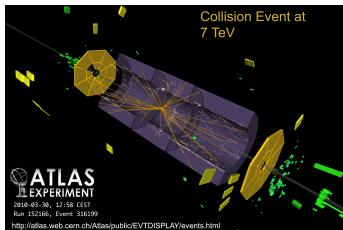


# Going Beyond...

- ▶ ... nicht nur BSM ... nicht nur SUSY ...
- ▶ Off-Shell-Interferenzeffekte in BSM-Suchen JRR/Wiesler, 2012
- ▶ Little Higgs-Modelle: Model Building (Large  $N$ -Limes), Schranken aus LHC Daten Kilian/JRR, 2004-2008; JRR, 2012; JRR/Tonini
- ▶ Elektroschwacher Sektor:  $WW$ -Streuung JRR et al., 2006; Alboteanu/Kilian/JRR, 2008; JRR et al., 2012
- ▶ Analytische Parton-Shower JRR/Schmidt/Wiesler, JHEP 2012
- ▶ Präzisionsrechnungen, Automatisierung NLO und Monte Carlo Binoth/.../JRR/..., 2009; Greiner/Guffanti/Reiter/JRR, 2011
- ▶ .... terra incognita ... (LHC-Daten!!!)
- ▶ Planung neuer Experimente: ILC, CLIC ILC DBD, Peskin/.../JRR et al., 2012

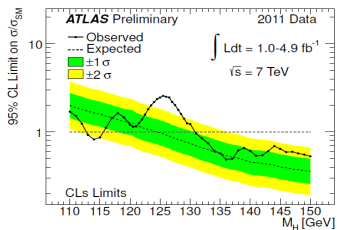
# Zusammenfassung/Ausblick

- **LHC: neue Ära der Physik**
- Neue Teilchen, neue Symmetrien, neue Wechselwirkungen, Dunkle Materie
- **Model Building, Phänomenologie, Tools**
- Spannende Zeiten!



# Zusammenfassung/Ausblick

- LHC: neue Ära der Physik
- Neue Teilchen, neue Symmetrien, neue Wechselwirkungen, Dunkle Materie
- Model Building, Phänomenologie, Tools
- Spannende Zeiten!



*"The undiscovered country...." (Hamlet, Act III, Scene I).*

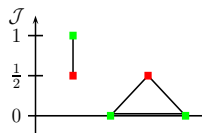
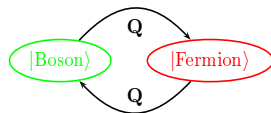
*"Though this be madness, yet there is method in 't." - (Hamlet, Act II, Scene II).*



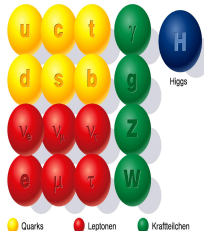
# Supersymmetrie (SUSY)

Gelfand/Likhtman, 1971; Akulov/Volkov, 1973; Wess/Zumino, 1974

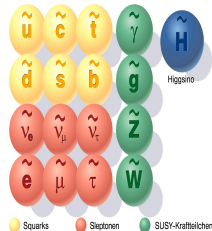
- ▶ verknüpft Eich- und Raumzeit-Symmetrien
  - ▶ Multipletts mit Fermionen und Bosonen gleicher Masse
- ⇒ SUSY in der Natur gebrochen
- ▶ Existenz fundamentaler Skalare
  - ▶ löst Hierarchieproblem:  $\delta M_H \propto F \log(\Lambda^2)$



Standard-Teilchen



SUSY-Teilchen

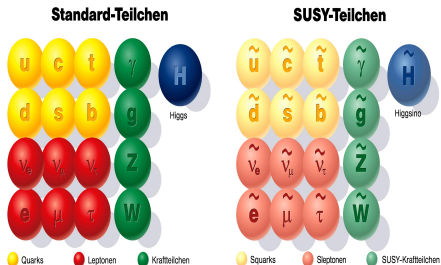
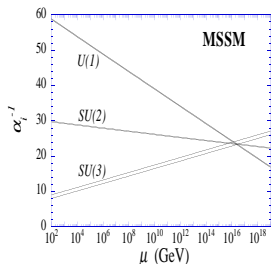


- ▶ Form des Higgs-Potentials
- ▶ leichtes Higgs ( $M_H = 90 \pm 50 \text{ GeV}$ )
- ▶ diskrete  $R$ -Parität
  - ▶ verhindert Protonzerfall
  - ▶ leichtester SUSY-Partner (LSP) stabil  $\Rightarrow$  Dunkle Materie
- ▶ Kopplungsvereinigung

# Supersymmetrie (SUSY)

Gelfand/Likhtman, 1971; Akulov/Volkov, 1973; Wess/Zumino, 1974

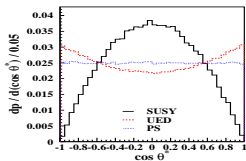
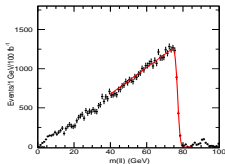
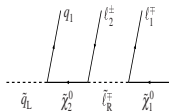
- ▶ verknüpft Eich- und Raumzeit-Symmetrien
- ▶ Multipletts mit Fermionen und Bosonen gleicher Masse
- ⇒ SUSY in der Natur gebrochen
- ▶ Existenz fundamentaler Skalare
- ▶ löst Hierarchieproblem:  $\delta M_H \propto F \log(\Lambda^2)$



- ▶ Form des Higgs-Potentials
- ▶ leichtes Higgs ( $M_H = 90 \pm 50 \text{ GeV}$ )
- ▶ diskrete  $R$ -Parität
  - ▶ verhindert Protonzerfall
  - ▶ leichtester SUSY-Partner (LSP) stabil  $\Rightarrow$  Dunkle Materie
- ▶ Kopplungsvereinigung

# Modell-Diskriminierung

- **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

# The Doublet-Triplet Splitting

$SU(5)$  breaking: Higgs  $\Sigma$  in adjoint **24** rep.

$$\langle \Sigma \rangle = w \times \text{diag}(1, 1, 1, -\frac{3}{2}, -\frac{3}{2}) \quad M_X = M_Y = \frac{5}{2\sqrt{2}} g w$$

other breaking mechanisms possible (e.g. orbifold)



# The Doublet-Triplet Splitting

$SU(5)$  breaking: Higgs  $\Sigma$  in adjoint **24** rep.

$$\langle \Sigma \rangle = w \times \text{diag}(1, 1, 1, -\frac{3}{2}, -\frac{3}{2}) \quad M_X = M_Y = \frac{5}{2\sqrt{2}} g w$$

other breaking mechanisms possible (e.g. orbifold)

(MS)SM Higgs(es) in  $\mathbf{5} \oplus \bar{\mathbf{5}}$

$$\mathbf{5} = \square : \begin{pmatrix} D \\ D \\ D \\ h^+ \\ h^0 \end{pmatrix} \quad \bar{\mathbf{5}} = \begin{matrix} \square \\ \square \\ \square \end{matrix} : \begin{pmatrix} D^c \\ D^c \\ D^c \\ h^- \\ -h^0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{5} = (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{-\frac{2}{3}} \oplus (\mathbf{1}, \mathbf{2})_1 \quad \bar{\mathbf{5}} = (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1})_{\frac{2}{3}} \oplus (\mathbf{1}, \mathbf{2})_{-1}$$

- ▶  $D, D^c$  coloured triplets with charges  $\pm \frac{1}{3}$
- ▶ induce proton decay, too  $m_H \sim 100 \text{ GeV}, m_D \sim 10^{16} \text{ GeV}$
- ▶ **Doublet-Triplet Splitting Problem**

# Klassifikation der Modelle

- $E_6 \supset H \supset SU(3) \times SU(2)^2 \times U(1)^2$  Brechung durch  $\mathbb{Z}_2, \mathbb{Z}_3, \mathbb{Z}_4$ .

$\mathbb{Z}_2$	Subgroup $H$	Shift $2\vec{V}$
	$SO(10) \times U(1)_X$	$(1, 1, 0, 1, 1, 0)$
	$SU(6) \times SU(2)_R$	$(0, 0, 1, 0, 0, 0)$
	$SU(6) \times SU(2)_L$	$(1, 1, 1, 1, 1, 0)$
$\mathbb{Z}_3$	Subgroup $H$	Shift $3\vec{V}$
	$SU(3)_C \times SU(3)_L \times SU(3)_R$	$(0, 0, 1, -1, 0, 0)$
$\mathbb{Z}_4$	Subgroup $H$	Shift $4\vec{V}$
	$SU(3)_C \times SU(3)_L \times SU(2)_R \times U(1)$	$(0, 0, 1, 2, 0, 0)$
	$SU(3)_C \times SU(3)_R \times SU(2)_L \times U(1)$	$(-1, 1, 1, 1, 1, 0)$

- nicht-triviale  $(H_i \not\subseteq H_j)$  gemeinsame invariante Untergruppen  $H_i \cap H_j$  unter zwei kombinierten Shifts

$\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$	$SU(4)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_X$
$\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_3$	$SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L} \times U(1)_X$
	$SU(3)_C \times SU(3)_L \times SU(2)_R \times U(1)$
	$SU(3)_C \times SU(3)_R \times SU(2)_L \times U(1)$
$\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_4$	$SU(4)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_X$
	$SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L} \times U(1)_X$
$\mathbb{Z}_3 \times \mathbb{Z}_4$	$SU(3)_C \times SU(3)_L \times SU(2)_R \times U(1)$
	$SU(3)_C \times SU(3)_R \times SU(2)_L \times U(1)$
$\mathbb{Z}_4 \times \mathbb{Z}_4$	$SU(3)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L} \times U(1)_X$

# Fermionen (Materie-Superfelder)

Einzig möglicher Weg für Materie:

$$\bar{\mathbf{5}} = \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square \\ \hline \square \\ \hline \end{array} : \begin{pmatrix} d^c \\ d^c \\ d^c \\ l \\ -\nu_l \end{pmatrix} \quad \mathbf{10} = \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \square \\ \hline \end{array} : \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \begin{array}{ccc|cc} 0 & u^c & -u^c & -u & -d \\ -u^c & 0 & u^c & -u & -d \\ u^c & -u^c & 0 & -u & -d \\ \hline u & u & u & 0 & -e^c \\ d & d & d & e^c & 0 \end{array} \right)$$

$$\bar{\mathbf{5}} = (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1})_{\frac{2}{3}} \oplus (\mathbf{1}, \mathbf{2})_{-1} \quad \mathbf{10} = (\mathbf{3}, \mathbf{2})_{\frac{1}{3}} \oplus (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1})_{-\frac{4}{3}} \oplus (\mathbf{1}, \mathbf{1})_2$$

Bemerkungen

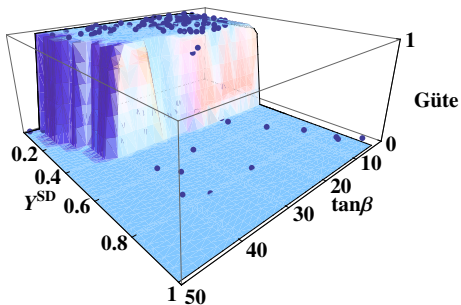
- ▶  $\mathbf{2} = \square = \bar{\mathbf{2}}$ ,  $(\mathbf{5} \otimes \mathbf{5})_a = \mathbf{10}$ ,  $(\mathbf{3} \otimes \mathbf{3})_a = \bar{\mathbf{3}}$ ,  $(\square \otimes \square)_a = \begin{array}{|c|} \hline \square \\ \hline \end{array}$
- ▶ Quarks und Leptonen im selben Multipllett
- ▶ Bedingung der Spurfreiheit  $\Rightarrow$  (Farbe!)
- ▶  $\bar{\mathbf{5}}$  und  $\mathbf{10}$  haben gleiche und entgegengesetzte Anomalien
- ▶  $\nu^c$  muss ein  $SU(5)$ -Singlett sein

# Analyse des Parameterraums

Braam/JRR/Wiesler, 0909.3081; JRR et al., 2012

- ▶ # free parameters  $\sim \mathcal{O}(100)$ , additional assumptions:
  - Unified Soft-Breaking terms
  - Flavour structure
 ⇒ Restriction to 14 parameters
- ▶ Constraints:
  - (1) Experimental search limits for new particles
  - (2) Running couplings perturbative up to  $\Lambda_{E_6}$
  - (3) Scalar (non-Higgs) mass terms positive  
( $\Leftrightarrow$  No false vacua)

- ▶ 14-dim. parameter space
  - ⇒ Grid Scan:  $\rightarrow 10^{28}$  points
  - ▶ Investigation per point (RGE, Higgs potential minimisation, Calculation of masses)  $\sim 10 - 100$  ms
- Lsg.: Monte-Carlo Markov chain through parameter space
- ⇒ Effective search for relevant parameter tuples



# Why chiral exotics?

JRR/Kilian, PLB 642 (2006), 81, JRR 0709.4202

## Proof of Unification only with megatons? What about colliders?

- SPA: Super precision accurately
- Alternative: Search for chiral exotics
- Physics beyond the MSSM as lever-arm to GUT scale

### $\mu$ problem

- NMSSM trick
- Singlett Superfield with TeV-scale vacuum expectation value

### Doublet-Triplet Splitting Problem; Longevity of the Proton

- Keep  $D, D^c$  superfields at the TeV scale
- New mechanism against proton decay
- Different unification scenario

### Proton Decay

- ▶ Flavour symmetry can save the proton
- ▶ Discrete parity eliminates either LQ/DQ couplings

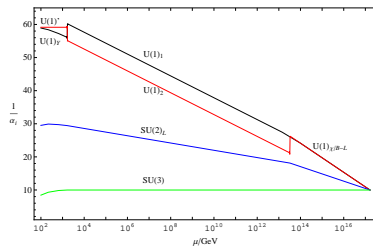
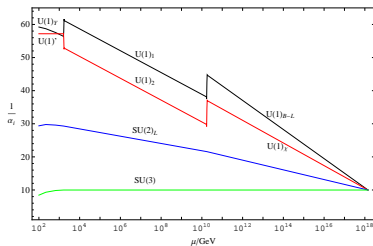
# $U(1)$ Mixing

Braam/Knochel/JRR, JHEP 1006:013; King et al., 2009, Braam/JRR, EPJC 1107.2806

- Two  $U(1)$  factors below the intermediate scale
- Kinetic mixing: non-rational coefficients (gauge couplings)

$$\mathcal{L} = i g_i Q_i^a A_i^\mu \bar{\psi}^\alpha \gamma_\mu \psi^\alpha - \frac{1}{4} F_i^{\mu\nu} \delta_{ij} F_{\mu\nu,j} - \frac{1}{4} F_i^{\mu\nu} \Delta Z_{ij} F_{\mu\nu,j}.$$

- Effects for the running:



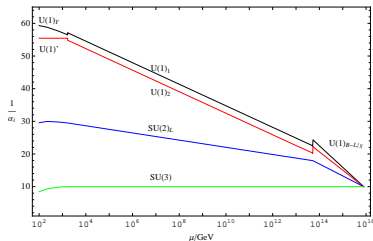
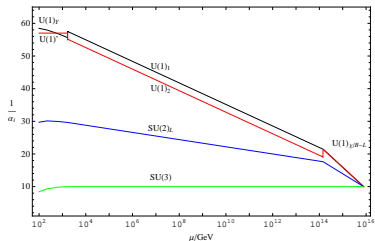
# $U(1)$ Mixing

Braam/Knochel/JRR, JHEP 1006:013; King et al., 2009, Braam/JRR, EPJC 1107.2806

- Two  $U(1)$  factors below the intermediate scale
- Kinetic mixing: non-rational coefficients (gauge couplings)

$$\mathcal{L} = i g_i Q_i^\alpha A_i^\mu \bar{\psi}^\alpha \gamma_\mu \psi^\alpha - \frac{1}{4} F_i^{\mu\nu} \delta_{ij} F_{\mu\nu,j} - \frac{1}{4} F_i^{\mu\nu} \Delta Z_{ij} F_{\mu\nu,j}.$$

- Effects for the running:



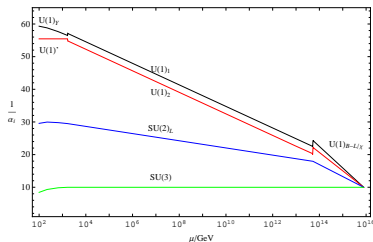
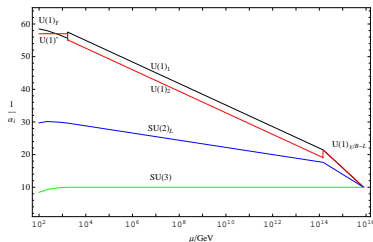
# $U(1)$ Mixing

Braam/Knochel/JRR, JHEP 1006:013; King et al., 2009, Braam/JRR, EPJC 1107.2806

- Two  $U(1)$  factors below the intermediate scale
- Kinetic mixing: non-rational coefficients (gauge couplings)

$$\mathcal{L} = i g_i Q_i^a A_i^\mu \bar{\psi}^a \gamma_\mu \psi^a - \frac{1}{4} F_i^{\mu\nu} \delta_{ij} F_{\mu\nu,j} - \frac{1}{4} F_i^{\mu\nu} \Delta Z_{ij} F_{\mu\nu,j}.$$

- Effects for the running:



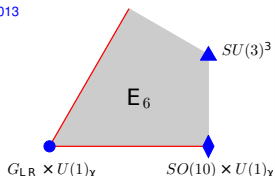
- Same effect for soft-breaking terms: **interesting singlino mixing**



# Ein konkretes Modell

Braam/Knoche/JRR, JHEP 1006:013

- Benutze  $T^2/\mathbb{Z}_6$  (a.k.a.  $\mathbb{R}^2/632$  or p6)
- Twist-Vektor  $\vec{\nu}(r_6) = (\frac{1}{6}, -\frac{1}{6}, -\frac{1}{3}, -\frac{1}{2}, -\frac{1}{6}, 0)$  ( $\overline{Q}_{B-L}$ -Richtung)
- Keine diskreten Wilson-Linien erlaubt



- ▶ Anomalien der Bulk-78 chiralen Moden nach Projektion  
( $\mathbf{16}_{-3/2} + \overline{\mathbf{16}}_{3/2}, (\overline{\mathbf{3}}, \mathbf{2}, \mathbf{1}) + (\overline{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \mathbf{2}), (\mathbf{3}, \mathbf{3}, \overline{\mathbf{3}})$ ) heben 78-Bulk-Hypermultiplett weg
- ▶ 3 Generationen  $\mathbf{27}$  als Brane-lokalisierte Materie

$SU(3)^3 \setminus SO(10)_{Q_X}$	$\mathbf{16}_{\frac{1}{2}}$	$\mathbf{10}_{-1}$	$\mathbf{1}_2$
$\mathbf{A} = (\overline{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \mathbf{3})$	$(\overline{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \mathbf{2})_{(-\frac{1}{3}, \frac{1}{2})}$	$(\overline{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_{(\frac{2}{3}, -1)}$	×
$\mathbf{B} = (\mathbf{3}, \mathbf{3}, \mathbf{1})$	$(\mathbf{3}, \mathbf{2}, \mathbf{1})_{(\frac{1}{3}, \frac{1}{2})}$	$(\mathbf{3}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_{(-\frac{2}{3}, -1)}$	×
$\mathbf{C} = (\mathbf{1}, \overline{\mathbf{3}}, \overline{\mathbf{3}})$	$(\mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{1})_{(-1, \frac{1}{2})}$ $(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{2})_{(1, \frac{1}{2})}$	$(\mathbf{1}, \mathbf{2}, \mathbf{2})_{(0, -1)}$	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, \mathbf{1})_{(0, 2)}$

- ▶ Trinification FP  $SU(3)^3$  unterscheidet LQ/DQ Kopplungen:

$$\mathbf{27}^3 \rightarrow (\overline{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \mathbf{3})^3 + (\mathbf{3}, \mathbf{3}, \mathbf{1})^3 + (\mathbf{1}, \overline{\mathbf{3}}, \overline{\mathbf{3}})^3 + (\overline{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \mathbf{3})(\mathbf{3}, \mathbf{3}, \mathbf{1})(\mathbf{1}, \overline{\mathbf{3}}, \overline{\mathbf{3}})$$

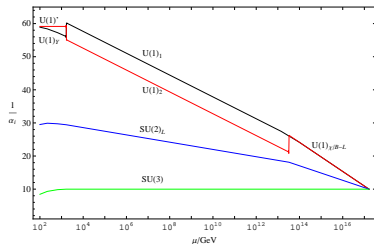
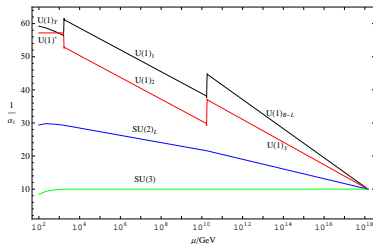
- ▶ 1.+2. Generation auf LR Fixpunkt (erlaubt LQ-Kopplungen)
- ▶ LR-Symmetriebrechung durch Brane-lokalisierte Materie:

$$i) \quad L, l^c, \langle \nu^c \rangle + c.c. \sim (\mathbf{1}, \overline{\mathbf{3}}, \overline{\mathbf{3}}) \cap \mathbf{16} + c.c.$$

$$ii) \quad L, l^c, \langle \nu^c \rangle, H_u, H_d, S + c.c. \sim (\mathbf{1}, \overline{\mathbf{3}}, \overline{\mathbf{3}}) + c.c.$$

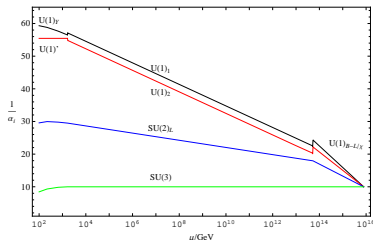
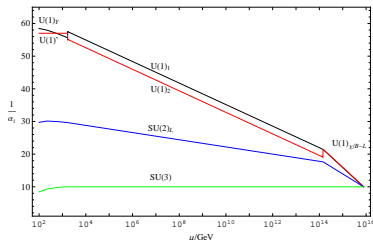
# Beispiel-Spektren

$H_{\text{int}}, \bar{H}_{\text{int}}$	$i)$	$ii)$	$3ii)$	$i) + 2ii)$
$\Lambda_{\text{int}}/\text{GeV}$	$1.6 \times 10^{10}$	$3.0 \times 10^{13}$	$1.3 \times 10^{14}$	$4.9 \times 10^{13}$
$\Lambda_{\text{GUT}}/\text{GeV}$	$1.3 \times 10^{18}$	$1.5 \times 10^{17}$	$7.2 \times 10^{15}$	$7.2 \times 10^{15}$
$g'   M_{Z'}$	0.471	0.467	0.476	0.482
$Q'   X$				
$Q$	0.224	0.231	0.234	0.232
$u^c$	0.283	0.261	0.250	0.257
$d^c$	0.055	0.067	0.073	0.069
$D$	-0.449	-0.462	-0.468	-0.464
$D^c$	-0.339	-0.328	-0.322	-0.326
$L$	0.114	0.097	0.089	0.094
$e^c$	0.165	0.201	0.218	0.208
$H^u$	-0.508	-0.492	-0.484	-0.489
$H^d$	-0.279	-0.298	-0.307	-0.301
$S$	0.787	0.790	0.790	0.790



# Beispiel-Spektren

$H_{\text{int}} \cdot \bar{H}_{\text{int}}$	$i)$	$ii)$	$3ii)$	$i) + 2ii)$
$\Lambda_{\text{int}}/\text{GeV}$	$1.6 \times 10^{10}$	$3.0 \times 10^{13}$	$1.3 \times 10^{14}$	$4.9 \times 10^{13}$
$\Lambda_{\text{GUT}}/\text{GeV}$	$1.3 \times 10^{18}$	$1.5 \times 10^{17}$	$7.2 \times 10^{15}$	$7.2 \times 10^{15}$
$g   M_{Z'}$	0.471	0.467	0.476	0.482
$Q/X$				
$Q$	0.224	0.231	0.234	0.232
$u^c$	0.283	0.261	0.250	0.257
$d^c$	0.055	0.067	0.073	0.069
$D$	-0.449	-0.462	-0.468	-0.464
$D^c$	-0.339	-0.328	-0.322	-0.326
$L$	0.114	0.097	0.089	0.094
$e^c$	0.165	0.201	0.218	0.208
$H^u$	-0.508	-0.492	-0.484	-0.489
$H^d$	-0.279	-0.298	-0.307	-0.301
$S$	0.787	0.790	0.790	0.790



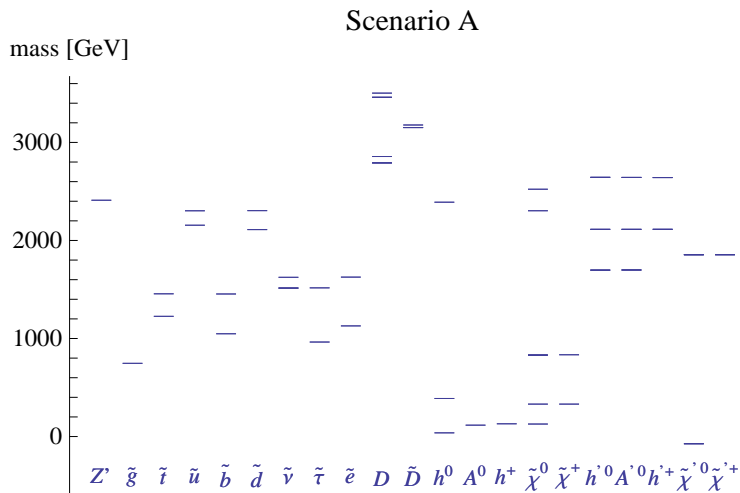
# Beispiel-Spektren

	Szenario A	Szenario B	Szenario C
y_lq	0.106	0.145	0.210
y_lqc	0.082	0.075	0.230
y_sd	0.397	0.856	0.655
y_sh	0.214	0.321	0.052
y_nmssm	0.173	0.145	0.150
M_g	1105	-1452	-1359
M_gluino	-820	-875	-841

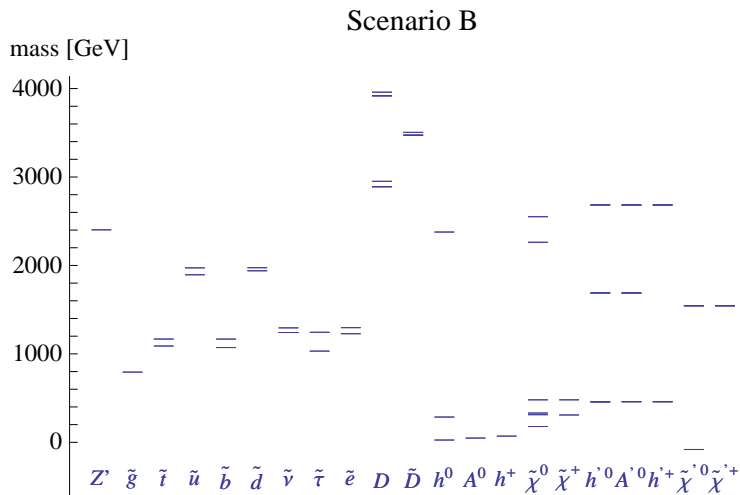
h_sm	-764	-1261	-749
h_lq	372	-446	-376
h_lqc	-224	-0.9	-897
h_sd	-264	500	307
h_sh	351	-767	19
h_nmssm	22.5	-185	73
m_sfer	1689	814	1690
m_dh	1234	1154	1936
m_H	1959	1921	1465
m_D	816	805	826
m_S	1201	1921	1357
m_int	-1459	-1050	-845

- ▶ **Higgs-Boson:**  $m_h \approx 110 - 130 \text{ GeV}$
- ▶ **Z':**  $m_{Z'} \approx 2.0 - 2.5 \text{ TeV}$      $\Gamma_{Z'} 40 \text{ GeV}$
- ▶ **Dunkle Materie:** leichtestes Unhiggsino,  $m_{\chi^\pm} \sim \mathcal{O}(0.1 - 1 \text{ GeV})$   
(*R*-ungerade **und** *H*-ungerade)

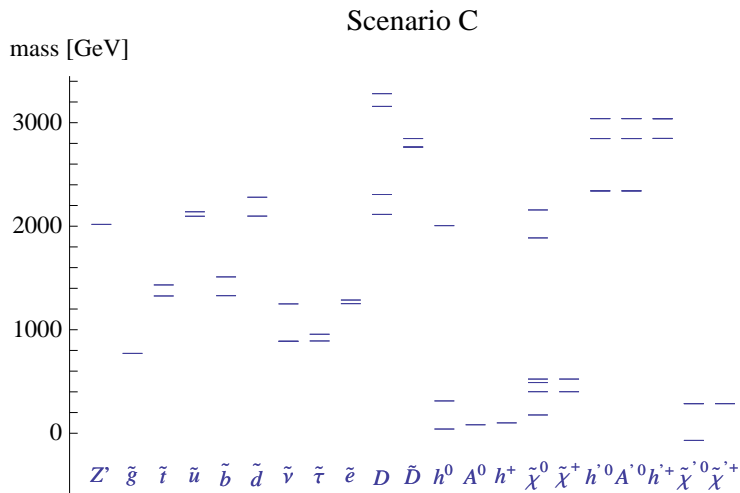
# Beispiel-Spektren



# Beispiel-Spektren

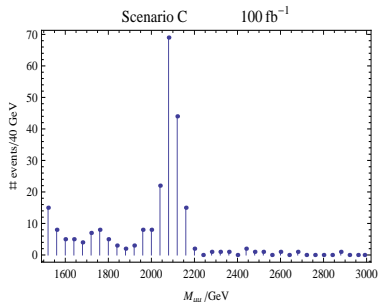
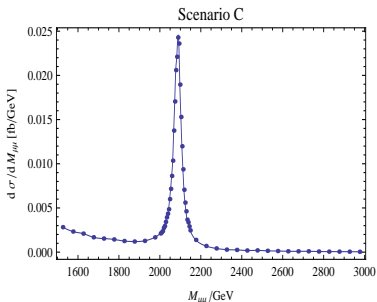


# Beispiel-Spektren



## $Z'$ : Drell-Yan und Asymmetrie

- ▶  $Z'$ , typische Masse: 2-2.5 TeV, typische Breite:  $\sim 40$  GeV
- ▶ Drell-Yan Wirkungsquerschn.:  $\sigma(pp \rightarrow Z' \rightarrow \mu\mu; 14 \text{ TeV}) = 1.5 - 2.5 \text{ fb}$
- Cuts:  $|\eta| < 2.5$  (Akzeptanz),  $p_T(\mu) > 50 \text{ GeV}$ ,  $M_{\mu\mu} > 1.5 \text{ TeV}$
- $Z'$  Lineshape; Simulation mit WHIZARD für  $100 \text{ fb}^{-1}$ :



- ▶ Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie:

$$A_{FB} \equiv \frac{\sigma_F - \sigma_B}{\sigma_F + \sigma_B}$$

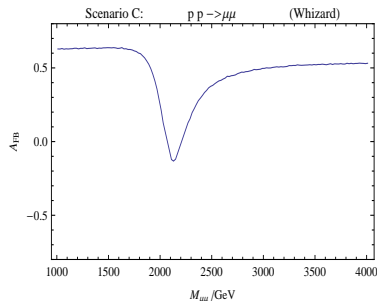
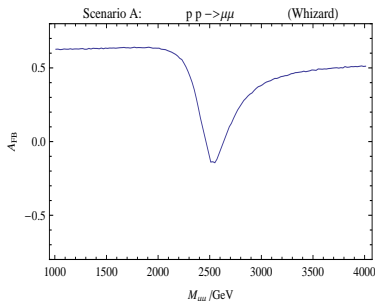
$$\sigma_F \equiv \int_0^1 \frac{d\sigma(q\bar{q} \rightarrow \mu^+\mu^-)}{d\cos\theta^*} d\cos\theta^*$$

$$\sigma_B \equiv \int_{-1}^0 \frac{d\sigma(q\bar{q} \rightarrow \mu^+\mu^-)}{d\cos\theta^*} d\cos\theta^*$$



## $Z'$ : Drell-Yan und Asymmetrie

- ▶  $Z'$ , typische Masse: 2-2.5 TeV, typische Breite:  $\sim 40$  GeV
- ▶ Drell-Yan Wirkungsquerschn.:  $\sigma(pp \rightarrow Z' \rightarrow \mu\mu; 14 \text{ TeV}) = 1.5 - 2.5 \text{ fb}$
- Cuts:  $|\eta| < 2.5$  (Akzeptanz),  $p_T(\mu) > 50 \text{ GeV}$ ,  $M_{\mu\mu} > 1.5 \text{ TeV}$
- $Z'$  Lineshape; Simulation mit WHIZARD für  $100 \text{ fb}^{-1}$ :



- ▶ Vorwärts-Rückwärts-Asymmetrie:

$$A_{FB} \equiv \frac{\sigma_F - \sigma_B}{\sigma_F + \sigma_B}$$

$$\sigma_F \equiv \int_0^1 \frac{d\sigma(q\bar{q} \rightarrow \mu^+\mu^-)}{d \cos \theta^*} d \cos \theta^*$$

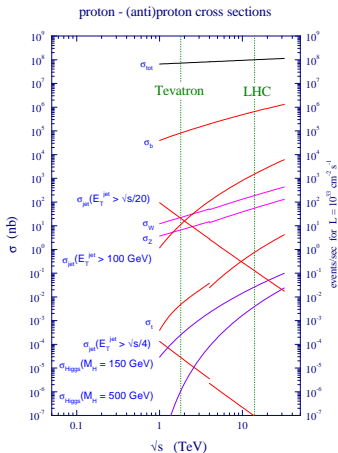
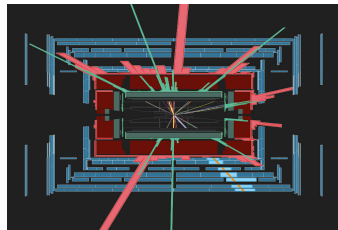
$$\sigma_B \equiv \int_{-1}^0 \frac{d\sigma(q\bar{q} \rightarrow \mu^+\mu^-)}{d \cos \theta^*} d \cos \theta^*$$



# Die Herausforderung des LHC

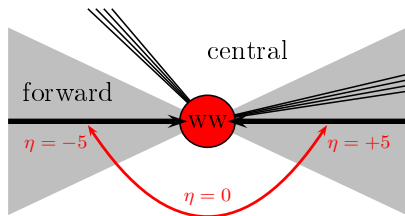
Partonische Subprozesse:  $qq, qg, gg$

Keine feste partonische Energie



$$R = \sigma \mathcal{L} \quad \mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

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



# Suche nach neuen Teilchen

Zerfallsprodukte schwerer Teilchen:

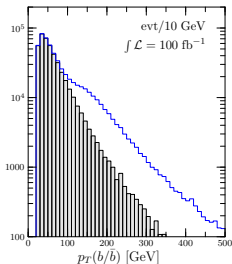
- ▶ high- $p_T$  Jets
- ▶ viele harte Leptonen

Produktion farbiger Teilchen

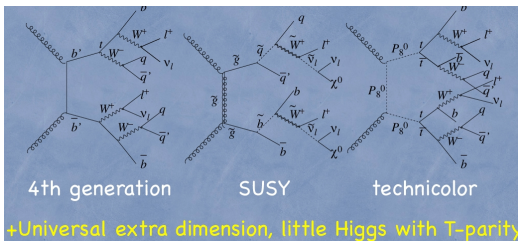
schwach ww. Teilchen nur in Zerfällen

**Dunkle Materie**  $\Leftrightarrow$  **diskrete Parität** ( $R, T, KK$ )

- ▶ nur Paare neuer Teilchen  $\Rightarrow$  hohe Energien, lange Zerfallsketten
- ▶ Dunkle Materie  $\Rightarrow$  große fehlende Energie im Detektor ( $E_{\cancel{T}}$ )



## Unterschiedliche Modelle/Zerfallsketten — gleiche Signaturen



# Suche nach neuen Teilchen

Zerfallsprodukte schwerer Teilchen:

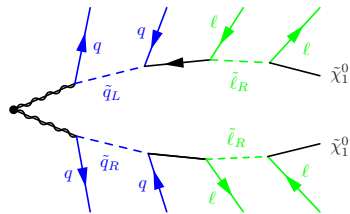
- ▶ high- $p_T$  Jets
- ▶ viele harte Leptonen

Produktion farbiger Teilchen

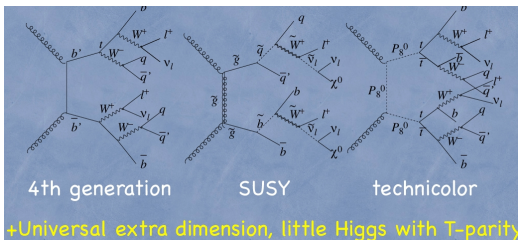
schwach ww. Teilchen nur in Zerfällen

**Dunkle Materie**  $\Leftrightarrow$  **diskrete Parität** ( $R, T, KK$ )

- ▶ nur Paare neuer Teilchen  $\Rightarrow$  hohe Energien, lange Zerfallsketten
- ▶ Dunkle Materie  $\Rightarrow$  große fehlende Energie im Detektor ( $\cancel{E}_T$ )



## Unterschiedliche Modelle/Zerfallsketten — gleiche Signaturen

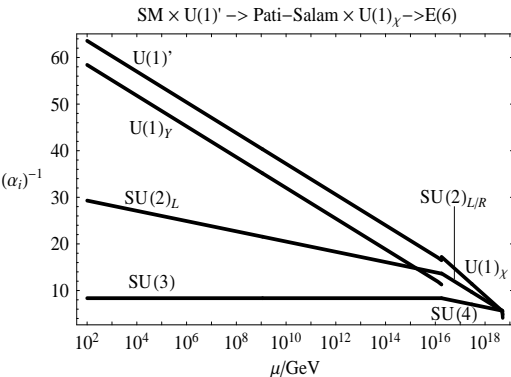


# Intermediäre Pati-Salam-Symmetrie

Kilian/JRR, PLB 2006

- ▶ Zusätzliche Teilchen zerstören Additional particles destroy MSSM unification
- ▶ Vereinigung unterhalb  $\Lambda_{Planck}$  mit intermediärer

$SU(4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R [\times U(1)_X]$  Pati-Salam symmetrie bei  $\sim 10^{15-16}$  GeV



- ▶  $SU(2)_R$  and  $SU(2)_L$ :  
identischer content/running
- ▶ Vereinigung von  $SU(4)$  und  $SU(2)_{L/R}$  bestimmt  $E_6$ -Skala
- ▶ Leptonzahl: 4. Farbe
- ▶  $T_{SU(4)}^{15} \propto \frac{B-L}{2}$
- ▶  $Y = \frac{B-L}{2} + T_R^3$
- ▶  $U(1)$  Matching-Bedingung  
 $\frac{1}{g_Y^2} = \frac{2}{5} \frac{1}{g_{B-L}^2} + \frac{3}{5} \frac{1}{g_R^2}$
- ▶ Integriere  $\nu^c$  aus:  
(See-Saw)

$\Rightarrow$  korrekte Brechung

# Probleme und $E_6$ /Pati-Salam-Brechung

JRR et al., 2012

- $E_6$ -Superpotential verschwindet  $\Rightarrow E_6$ -Operatoren erzeugen PS-Superpotential Power Suppression: top Yukawa?
- diskrete Symmetrie zur Diskriminierung von Lepto-/Diquark Kopplungen/ $H$ -Parität verletzt GUT-Multiplettstruktur
- Starke Schranken von Perturbativität oberhalb  $\Lambda_{PS}$
- Kompliziert, Darstellungen für PS-Brechung zu finden
  - ▶ **27, 351, und 351'** brechen  $E_6$  zu Rang 5  
 $U(1)_X$  gebrochen, kein quartisches Singlett-Potential
  - ▶ Keine Rang-Reduktion: **adjungierte Brechung**
  - ▶ Brechung durch  $\langle (27)(\overline{27}) \rangle$  oder  $\langle 27 \rangle \langle \overline{27} \rangle$       $27 \times \overline{27} = 1 + 78 + 650$
  - ▶ **650** kleinste Darstellung für  $E_6 \rightarrow G_{PS} \times U(1)$
  - ▶ Superpotential für korrekte Brechung, das LQ-Kopplungen erlaubt, ist möglich

# Probleme und $E_6$ /Pati-Salam-Brechung

JRR et al., 2012

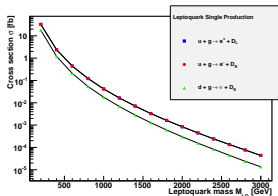
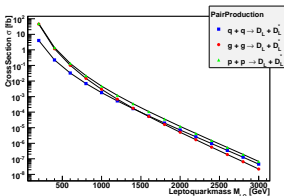
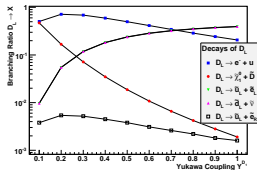
- $E_6$ -Superpotential verschwindet  $\Rightarrow E_6$ -Operatoren erzeugen PS-Superpotential Power Suppression: top Yukawa?
- diskrete Symmetrie zur Diskriminierung von Lepto-/Diquark Kopplungen/ $H$ -Parität verletzt GUT-Multiplettstruktur
- Starke Schranken von Perturbativität oberhalb  $\Lambda_{PS}$
- Kompliziert, Darstellungen für PS-Brechung zu finden
  - ▶ **27, 351, und 351'** brechen  $E_6$  zu Rang 5  
 $U(1)_X$  gebrochen, kein quartisches Singlett-Potential
  - ▶ Keine Rang-Reduktion: **adjungierte Brechung**
  - ▶ Brechung durch  $\langle(27)(\overline{27})\rangle$  oder  $\langle 27 \rangle \langle \overline{27} \rangle$       $27 \times \overline{27} = 1 + 78 + 650$
  - ▶ **650** kleinste Darstellung für  $E_6 \rightarrow G_{PS} \times U(1)$
  - ▶ **Superpotential für korrekte Brechung, das LQ-Kopplungen erlaubt, ist möglich**



# Vorhersagen aus $E_6$ GUTs für LHC

Braum/JRR/Wiesler, 0909.3081; 2012

- ▶ Simulationen für das  $E_6$ -Modell mit WHIZARD
- ▶ Vollständige Implementierung mit FeynRules
- ▶ **Analysen:** BRs, Wirkungsquerschnitte für skalare Leptoquarks, S/B
- ▶ Leptoquarkino-Phänomenologie

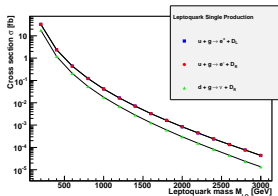
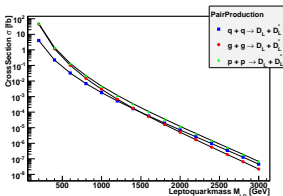
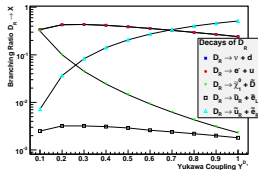


Schnitte		Untergrund $N_{BG}$	$m_D = 0.6 \text{ TeV}$		$m_D = 0.8 \text{ TeV}$		$m_D = 1.0 \text{ TeV}$	
$p_T$	$M_{\ell\ell}$		$N_1$	$S_1/\sqrt{B}$	$N_2$	$S_2/\sqrt{B}$	$N_3$	$S_3/\sqrt{B}$
50	10	413274	64553	<b>93</b>	14823	<b>23</b>	4819	<b>7</b>
100	150	3272	40749	<b>194</b>	10891	<b>92</b>	3767	<b>45</b>
200	150	198	12986	<b>113</b>	5678	<b>74</b>	2405	<b>47</b>

# Vorhersagen aus $E_6$ GUTs für LHC

Braum/JRR/Wiesler, 0909.3081; 2012

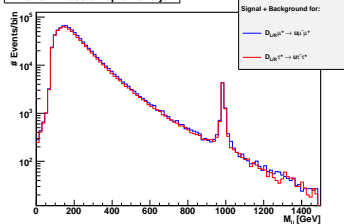
- ▶ Simulationen für das  $E_6$ -Modell mit WHIZARD
- ▶ Vollständige Implementierung mit FeynRules
- ▶ **Analysen:** BRs, Wirkungsquerschnitte für skalare Leptoquarks, S/B
- ▶ Leptoquarkino-Phänomenologie



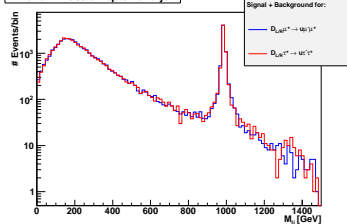
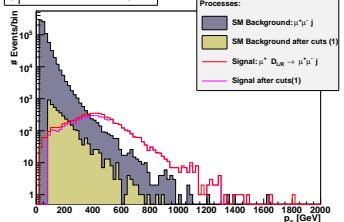
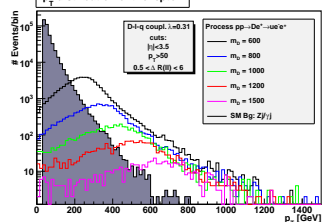
Schnitte		Untergrund	$m_D = 0.6 \text{ TeV}$		$m_D = 0.8 \text{ TeV}$		$m_D = 1.0 \text{ TeV}$	
$p_T$	$M_{\ell\ell}$	$N_{BG}$	$N_1$	$S_1/\sqrt{B}$	$N_2$	$S_2/\sqrt{B}$	$N_3$	$S_3/\sqrt{B}$
50	10	413274	64553	<b>93</b>	14823	<b>23</b>	4819	<b>7</b>
100	150	3272	40749	<b>194</b>	10891	<b>92</b>	3767	<b>45</b>
200	150	198	12986	<b>113</b>	5678	<b>74</b>	2405	<b>47</b>

Braum/JRR/Wiesler, 0909.3081; Braam/Horst/Knochel/JRR/Wiesler, 2012

Invariant mass of lepton and jet



Invariant mass of lepton and jet

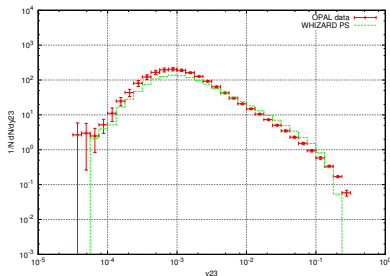
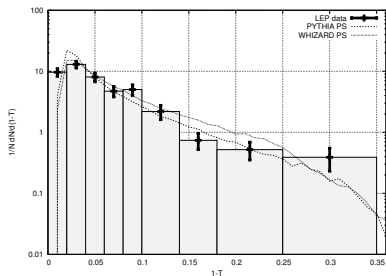
 $p_T$  distribution of the lepton $p_T$  distribution of the lepton

- Untergründe:  $tt + nj$ ,  $W/Z + nj$
- Schnitte:  $p_T > 150$  GeV,  $-1.0 < \cos \theta_{lj} < 0.7$

# Analytische Parton-Shower

JRR/Schmidt/Wiesler, JHEP 2012

- ▶ **Analytischer Parton-Shower:**
  - kein Shower-Veto: Shower-Gewichte exakt bekannt
  - erlaubt Reweighting und verlässlichere Fehlerabschätzung
  
- ▶ Neuer Algorithmus für Initial State Radiation



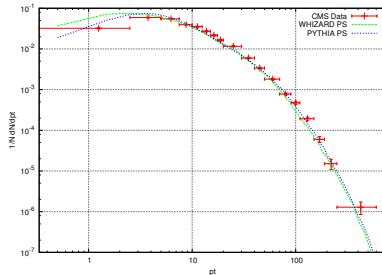
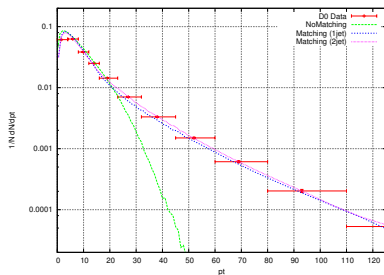
- ▶ Matching mit harten Matrixelementen, kein Power-Shower
- ▶ Verknüpfung mit Multiple Interactions:

Boschmann/Kilian/JRR/Schmidt, 2012

# Analytische Parton-Shower

JRR/Schmidt/Wiesler, JHEP 2012

- ▶ **Analytischer Parton-Shower:**
  - kein Shower-Veto: Shower-Gewichte exakt bekannt
  - erlaubt Reweighting und verlässlichere Fehlerabschätzung
  
- ▶ Neuer Algorithmus für Initial State Radiation



- ▶ Matching mit harten Matrixelementen, kein Power-Shower
- ▶ Verknüpfung mit Multiple Interactions:

Boschmann/Kilian/JRR/Schmidt, 2012