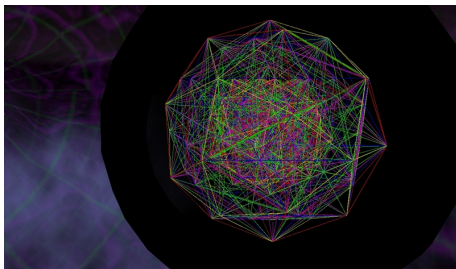


Auf den Spuren Exzeptioneller "Grand Unification" am LHC

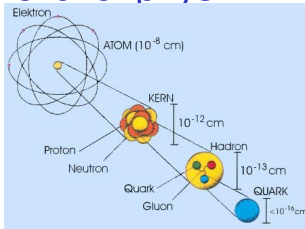
Jürgen R. Reuter

University of Edinburgh / Albert-Ludwigs-Universität Freiburg



Vortrag, Siegen, 22. Oktober 2010

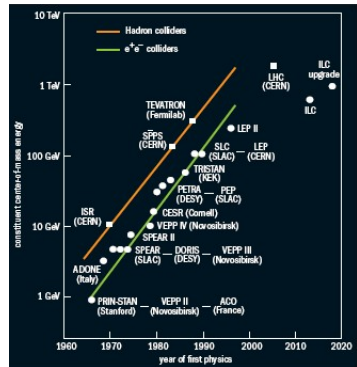
Teilchenphysik - "The High Energy Frontier"



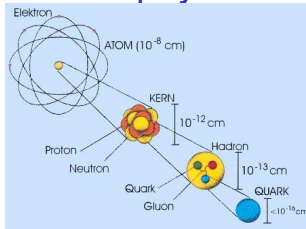
System	Größe	Energie
Moleküle	10^{-8} m	$\sim 10^{-1}$ eV
Atome	10^{-10} m	\sim eV keV
Kerne	10^{-14} m	~ 10 MeV
Nukleonen	10^{-15} m	$\lesssim 1$ GeV

Auflösungsvermögen: $\Delta x \sim (\Delta E)^{-1}$

\Rightarrow Hochenergie-Beschleuniger

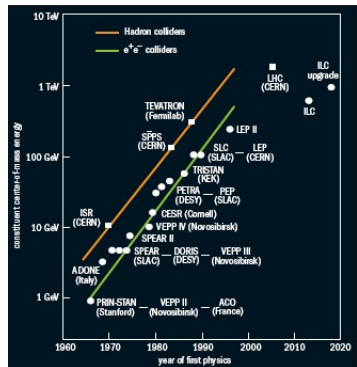


Teilchenphysik - "The High Energy Frontier"



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

Tevatron 1.96 TeV \rightarrow LHC 7 TeV







Das Standardmodell der Teilchenphysik – Erfolge

THE STANDARD MODEL

	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	
	Higgs boson*				

*Yet to be confirmed

Source: AAAS

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

- 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%

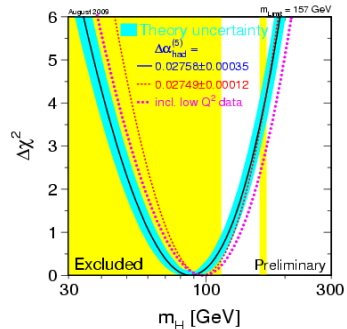
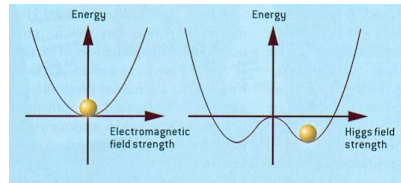
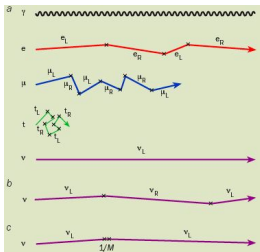
Das Higgs-Boson – A Long Expected Party

- Higgs: fundamentales Skalarfeld

Anderson, Nambu, Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Kibble, Higgs,

1961-1964

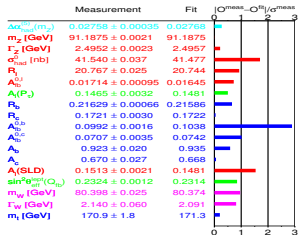
- Vakuum Erwartungswert $v = 246 \text{ GeV}$
- bricht elektroschwache Symmetrie zum Elektromagnetismus
- verleiht Elementarteilchen Masse
- koppelt proportional zur Masse



40 Jahre erfolglose Suche

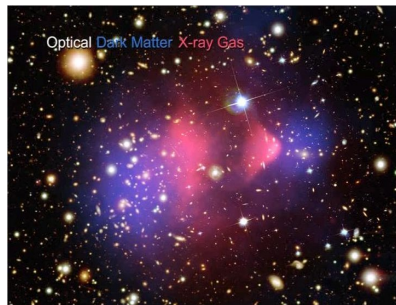
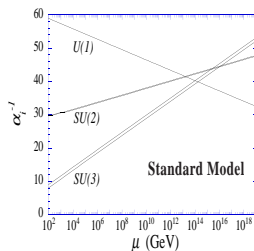
Das Standardmodell der Teilchenphysik – Zweifel

– beschreibt Mikrokosmos (zu gut?)



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

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

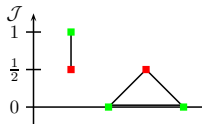
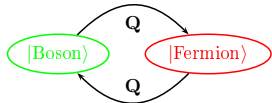
(4) Ignorieren der Hierarchie

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

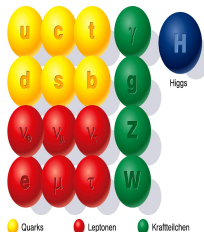
Supersymmetrie (SUSY)

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

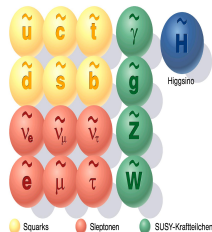
- verknüpft Eich- und Raumzeit-Symmetrien
 - Multipletts mit Fermionen und Bosonen gleicher Masse
- ⇒ SUSY in der Natur gebrochen



Standard-Teilchen



SUSY-Teilchen



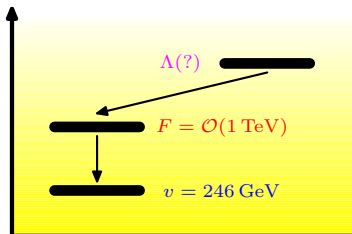
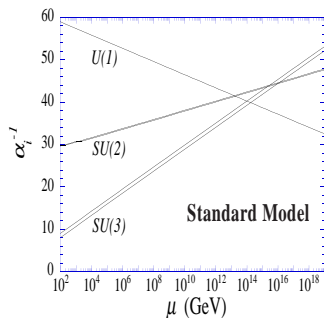
- Erweitere jedes Teilchen um einen Superpartner
- Minimales Supersymmetrisches Standard-Modell (MSSM)
- Masseneigenzustände:
Charginos: $\tilde{\chi}^{\pm} = \tilde{H}^{\pm}, \tilde{W}^{\pm}$
Neutralinos: $\tilde{\chi}^0 = \tilde{H}, \tilde{Z}, \tilde{\gamma}$

Hassliebe SUSY: Erfolge und Nebenwirkungen

spontane SUSY-Brechung im MSSM ⚡
(SUSY-Partner im MeV-Bereich)

Brechung in "hidden sector", induziert
100 freie Parameter

löst Hierarchieproblem:
 $\delta M_H \propto F \log(\Lambda^2)$



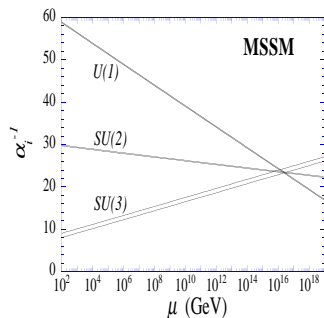
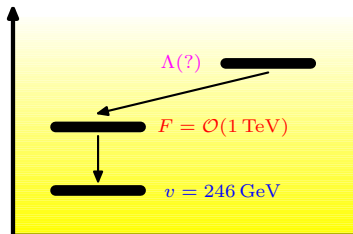
- ▶ Existenz fundamentaler Skalare
- ▶ Form des Higgs-Potentials
- ▶ leichtes Higgs ($M_H = 90 \pm 50 \text{ GeV}$)
- ▶ diskrete R -Parität
 - ▶ SM-Teilchen gerade, SUSY-Partner ungerade
 - ▶ verhindert zu schnellen Protonzerfall
 - ▶ leichtester SUSY-Partner (LSP) stabil
Dunkle Materie $\tilde{\chi}_1^0$
- ▶ Vereinigung der Kopplungskonstanten

Hassliebe SUSY: Erfolge und Nebenwirkungen

spontane SUSY-Brechung im MSSM ⚡
(SUSY-Partner im MeV-Bereich)

Brechung in "hidden sector", induziert
100 freie Parameter

löst Hierarchieproblem:
 $\delta M_H \propto F \log(\Lambda^2)$



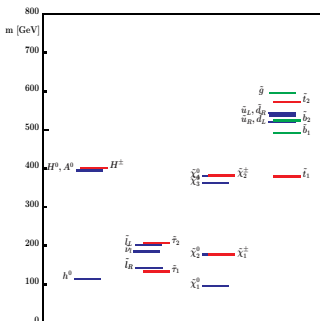
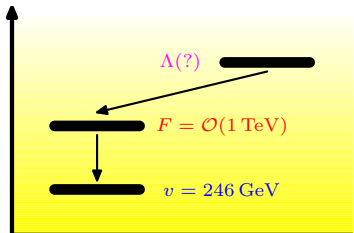
- ▶ Existenz fundamentaler Skalare
- ▶ Form des Higgs-Potentials
- ▶ leichtes Higgs ($M_H = 90 \pm 50 \text{ GeV}$)
- ▶ diskrete R -Parität
 - ▶ SM-Teilchen gerade, SUSY-Partner ungerade
 - ▶ verhindert zu schnellen Protonzerfall
 - ▶ leichtester SUSY-Partner (LSP) stabil
Dunkle Materie $\tilde{\chi}_1^0$
- ▶ Vereinigung der Kopplungskonstanten

Hassliebe SUSY: Erfolge und Nebenwirkungen

spontane SUSY-Brechung im MSSM ⚡
(SUSY-Partner im MeV-Bereich)

Brechung in "hidden sector", induziert
100 freie Parameter

löst Hierarchieproblem:
 $\delta M_H \propto F \log(\Lambda^2)$



- ▶ Existenz fundamentaler Skalare
- ▶ Form des Higgs-Potentials
- ▶ leichtes Higgs ($M_H = 90 \pm 50 \text{ GeV}$)
- ▶ diskrete R -Parität
 - ▶ SM-Teilchen gerade, SUSY-Partner ungerade
 - ▶ verhindert zu schnellen Protonzerfall
 - ▶ leichtester SUSY-Partner (LSP) stabil
Dunkle Materie $\tilde{\chi}_1^0$
- ▶ Vereinigung der Kopplungskonstanten

Supersymmetrische Große Vereinheitlichung



Standardbeispiel: (SUSY) $SU(5)$

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

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

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

Standardbeispiel: (SUSY) $SU(5)$

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

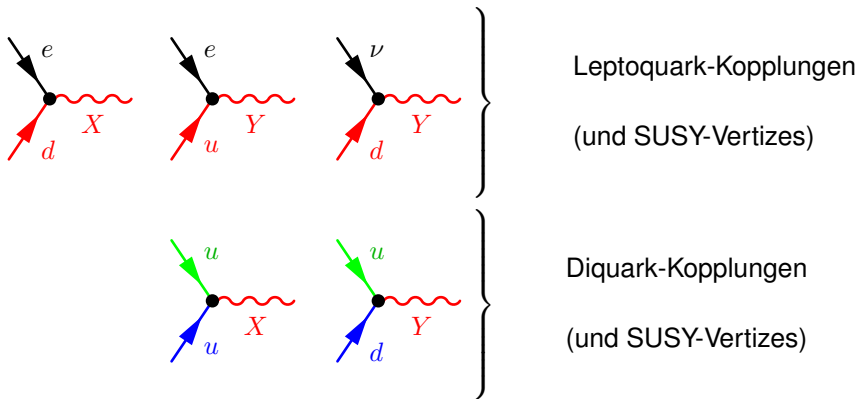
$SU(5)$ hat $5^2 - 1 = 24$ Generatoren:

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

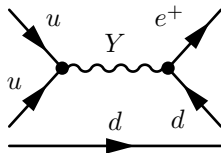
$$A = g \sum_{a=1}^{24} A^a \frac{\lambda^a}{2} = \frac{g}{\sqrt{2}} \left(\begin{array}{ccc|cc} \sqrt{2} G^a \frac{\lambda_{GM}^a}{2} & & & \bar{X} & \bar{Y} \\ & & & \bar{X} & \bar{Y} \\ & & & \bar{X} & \bar{Y} \\ \hline X & Y & X & & \\ Y & Y & Y & & \\ & & & \sqrt{2} W^a \frac{\sigma}{2} & \end{array}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

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

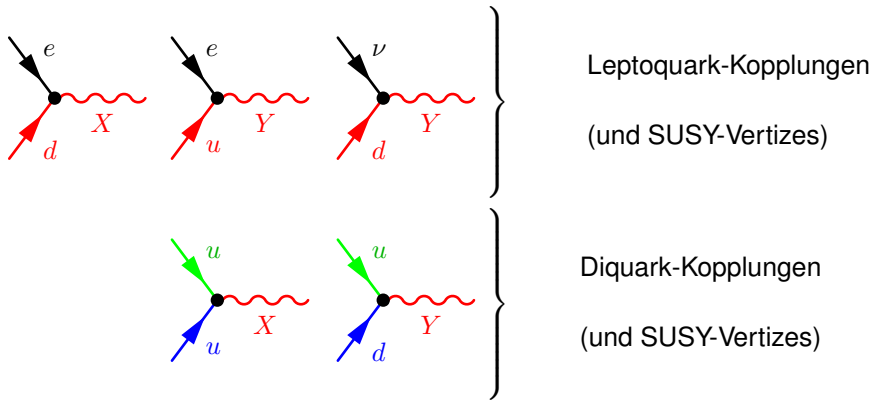
Wechselwirkungen



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:

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

Das Dublett-Triplett-Splitting

$SU(5)$ -Brechung: Higgs Σ in adjungierter 24 rep.

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

andere Brechungsmechanismen möglich (z.B. Orbifold)

Das Dublett-Triplett-Splitting

$SU(5)$ -Brechung: Higgs Σ in adjungierter **24** rep.

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

andere Brechungsmechanismen möglich (z.B. Orbifold)

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

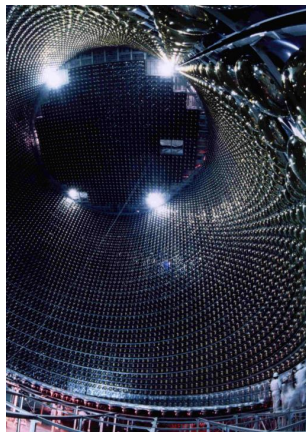
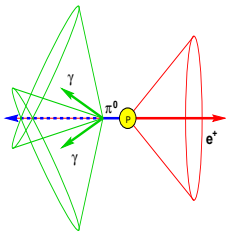
$$\mathbf{5} = \square : \begin{pmatrix} D \\ D \\ D \\ h^+ \\ h^0 \end{pmatrix} \quad \bar{\mathbf{5}} = \begin{matrix} \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{matrix} : \begin{pmatrix} D^c \\ D^c \\ D^c \\ h^- \\ -h^0 \end{pmatrix}$$

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

- ▶ D, D^c farbige Triplett-Higgse mit Ladungen $\pm \frac{1}{3}$
- ▶ induzieren auch **Proton-Zerfall** $m_H \sim 100 \text{ GeV}, m_D \sim 10^{16} \text{ GeV}$
- ▶ **Dublett-Triplett-Splitting Problem**

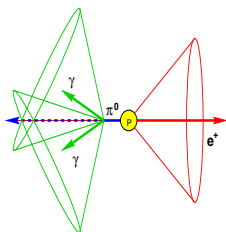
Proton-Zerfall experimentum crucis für GUTs

- ▶ Tracking-Kalorimeter (SOUDAN) oder RICH Cerenkov-Zähler
- ▶ Super-Kamiokande: 50 kt-Wasser-RICH
- ▶ Zur Rekonstruktion: Zeit + Ort messen



Proton-Zerfall experimentum crucis für GUTs

- ▶ Tracking-Kalorimeter (SOUDAN) oder RICH Cerenkov-Zähler
- ▶ Super-Kamiokande: 50 kt-Wasser-RICH
- ▶ Zur Rekonstruktion: Zeit + Ort messen



Kanal	$\tau_p (10^{30} \text{ years})$
$p \rightarrow \text{invisible}$	0.21
$p \rightarrow e^+ \pi^0$	1600
$p \rightarrow \mu^+ \pi^0$	473
$p \rightarrow \nu \pi^+$	25
$p \rightarrow \nu K^+$	670
$p \rightarrow e^+ \eta^0$	312
$p \rightarrow \mu^+ \eta^0$	126
$p \rightarrow e^+ \rho^0$	75
$p \rightarrow \mu^+ \rho^0$	110
$p \rightarrow \nu \rho^+$	162
$p \rightarrow e^+ \omega^0$	1000
$p \rightarrow \mu^+ \omega^0$	117
$p \rightarrow e^+ K^0$	150
$p \rightarrow \mu^+ K^0$	1300
$p \rightarrow \nu K^+$	2300
$p \rightarrow e^+ \gamma$	670
$p \rightarrow \mu^+ \gamma$	478

Neue Experimente:

HyperK (1 Mt), UNO (650 kt), Europäisches Projekt Fréjus (1 Mt)

Präzision: 10 Jahre Laufzeit $\implies 10^{34} - 10^{35}$ Jahre

Warum chirale Exotica?

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

Beweis der Vereinigung nur mit Mega-Tonnen? Was ist mit Collidern?

- SPA: Super-Präzision akkurat
- Alternative: **Suche nach chiralen Exotica**
- Physik jenseits des MSSM als Hebel zur GUT-Skala

μ -Problem

- NMSSM-Trick
- Singlett-Superfeld mit TeV-Skala Vakuumerwartungswert

Dublett-Triplett-Splitting-Problem, Langlebigkeit des Protons

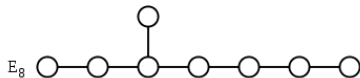
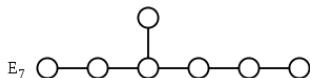
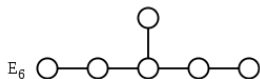
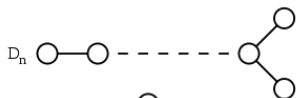
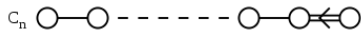
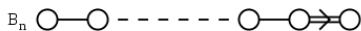
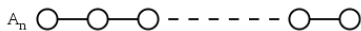
- Halte D, D^c Superfelder an der TeV-Skala
- Neuer Mechanismus gegen Proton-Zerfall
- Vereinigung muss anders sein

Proton-Zerfall

- ▶ Flavour-Symmetrie kann das Proton schützen
- ▶ Diskrete Parität diskriminiert LQ/DQ-Kopplungen

Exzeptionelle Lie-Gruppen/-Algebren

Lie, 1881; Dynkin, 1957



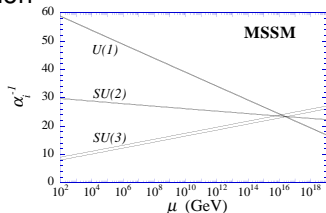
E_6 SUSY Grand Unification

Supersymmetrie: erlaubt konsistente Extrapolation zu hohen Skalen

- ⇒ zwei Higgs Dubletts H^u, H^d
- ⇒ SM-Superpartner an der TeV-Skala

Bottom-Up-Ansatz: nur MSSM

- ▶ Vereinigt Higgs und Materiefelder
- ▶ **Ansatz:** alle neuen Teilchen im Spektrum an der TeV-Skala



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

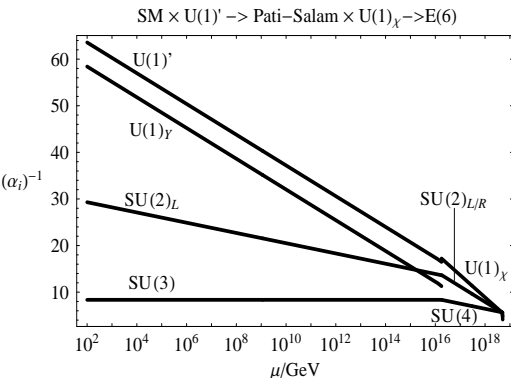
$$D^c = (\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1})_{\frac{1}{3}, -Q'_D}$$

Intermediäre Pati-Salam-Symmetrie

JRR et al. 2006-9, King et al. 2008

- ▶ Zusätzliche Teilchen zerstören MSSM-Vereinigung
- ▶ Vereinigung unterhalb von Λ_{Planck} mit interdiärer

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



- ▶ $SU(2)_R$ und $SU(2)_L$:
identischer Inhalt/Running
 - ▶ Schneiden $SU(4)$ der
 $SU(2)_{L/R}$ -Kopplungen
bestimmt E_6 -Skala
 - ▶ Lepton-Zahl: 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 ν^c aus: (see-saw)
- \Rightarrow korrekte Brechung

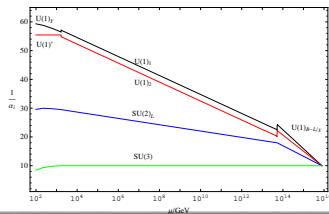
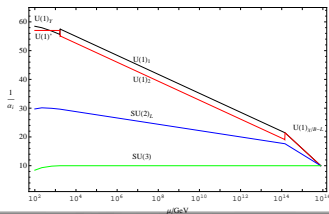
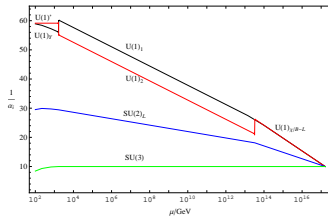
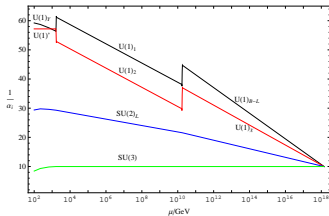
$U(1)$ -Mischung

Braam/Knochel/JRR, JHEP 1006:013; King et al., 2009, JRR et al., 2010

- Zwei $U(1)$ -Faktoren unterhalb der intermediären Skala
- Kinetische Mischung: nicht-rationale Koeffizienten (Eichkopplungen)

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

- Effekte durch das Running:



Probleme und E_6 /Pati-Salam-Brechung

JRR et al., 2010

- E_6 -Superpotential verschwindet identisch $\Rightarrow E_6$ -Operatoren erzeugen PS-Superpotential Power-Unterdrückung: top-Yukawa ?
- diskrete Symmetrie, um Lepto- und Diquark-Kopplungen zu diskriminieren/ H -Parität verletzen GUT-Multiplett-Struktur
- starke Schranken durch Perturbativität oberhalb Λ_{PS}
- Schwierigkeiten, Darstellungen für PS-Brechung zu finden
 - ▶ **27, 351, and 351'** brechen E_6 zu Rang 5
 $U(1)_X$ gebrochen, kein quartisches Singlett-Potential
 - ▶ Keine Rang-Erniedrigung: **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 $E_6 \rightarrow G_{PS} \times U(1)$
 - ▶ Es ist möglich, Superpotential zu erzeugen, das die Brechung macht und Leptoquark-Kopplungen erlaubt

Probleme und E_6 /Pati-Salam-Brechung

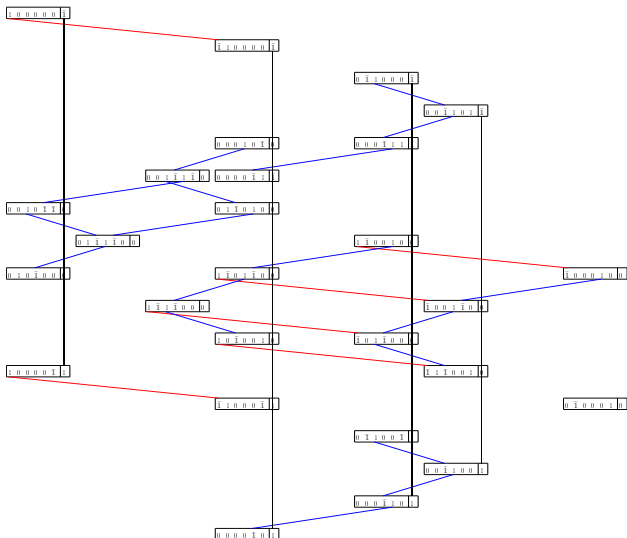
JRR et al., 2010

- E_6 -Superpotential verschwindet identisch $\Rightarrow E_6$ -Operatoren erzeugen PS-Superpotential Power-Unterdrückung: top-Yukawa ?
- diskrete Symmetrie, um Lepto- und Diquark-Kopplungen zu diskriminieren/ H -Parität verletzen GUT-Multiplett-Struktur
- starke Schranken durch Perturbativität oberhalb Λ_{PS}
- Schwierigkeiten, Darstellungen für PS-Brechung zu finden
 - ▶ **27, 351, and 351'** brechen E_6 zu Rang 5
 $U(1)_X$ gebrochen, kein quartisches Singlett-Potential
 - ▶ Keine Rang-Erniedrigung: **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 $E_6 \rightarrow G_{PS} \times U(1)$
 - ▶ **Es ist möglich, Superpotential zu erzeugen, das die Brechung macht und Leptoquark-Kopplungen erlaubt**

Automatische Zerlegung von Irreps

Mallot/JRR; Horst/JRR: CleGo, 2010

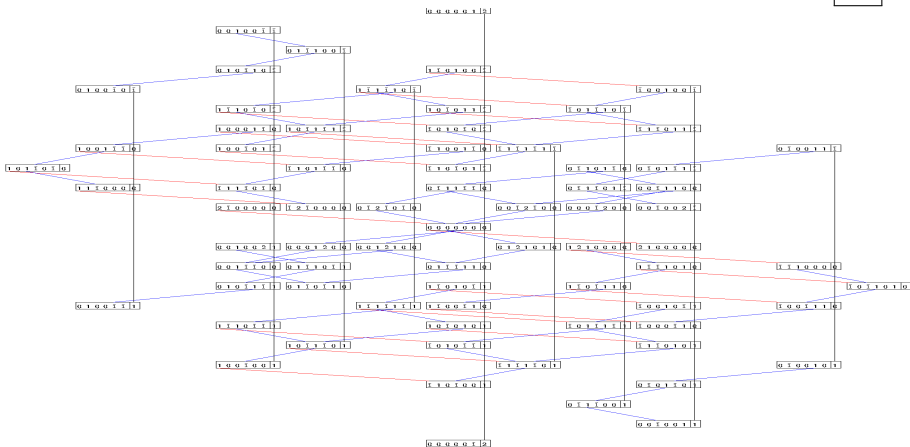
27



Automatische Zerlegung von Irreps

Mallot/JRR; Horst/JRR: CleGo, 2010

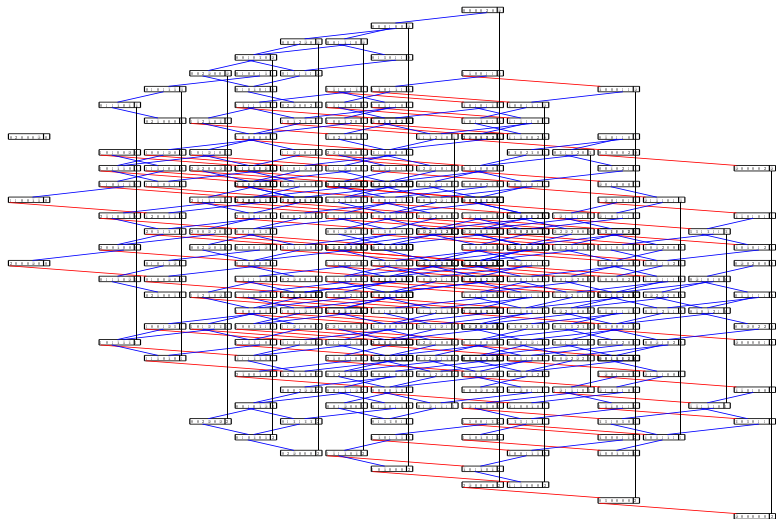
78



Automatische Zerlegung von Irreps

Mallot/JRR; Horst/JRR; CleGo, 2010

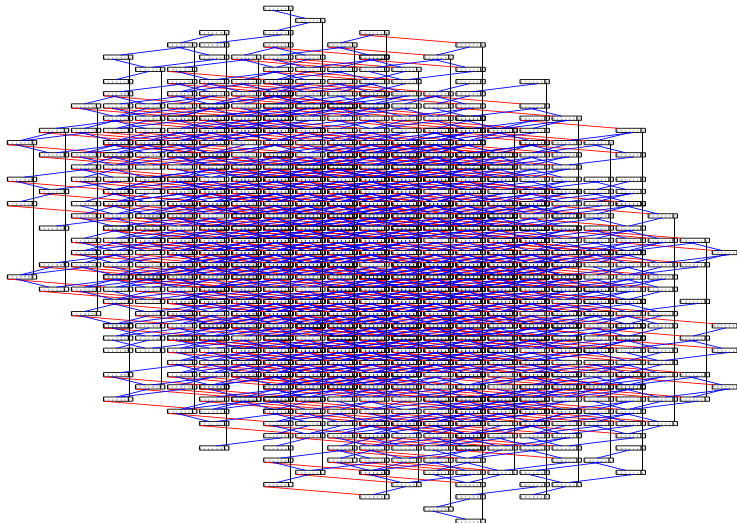
351'



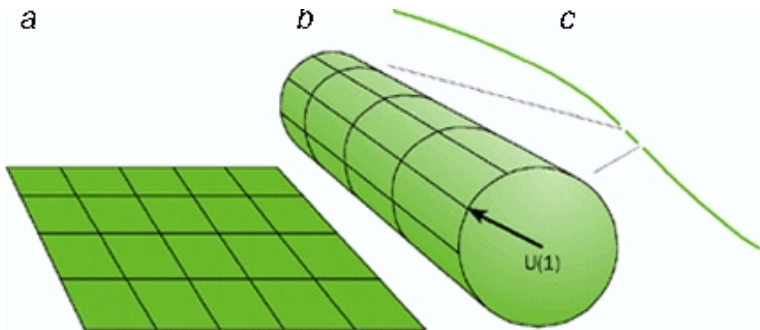
Automatische Zerlegung von Irreps

Mallot/JRR; Horst/JRR: CleGo, 2010

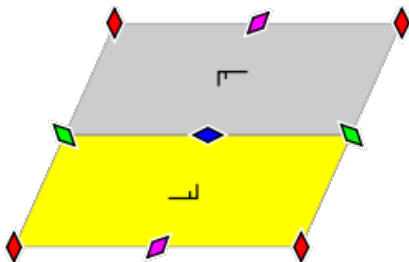
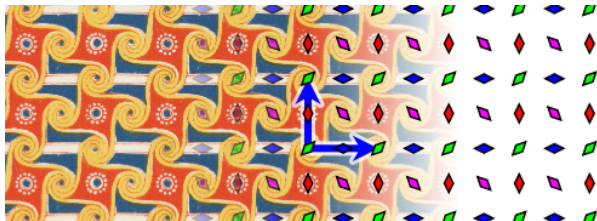
2925



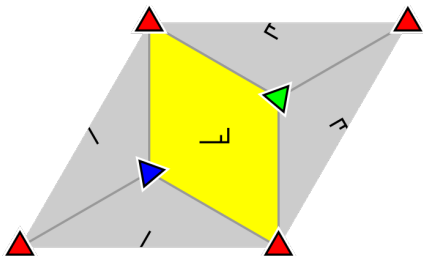
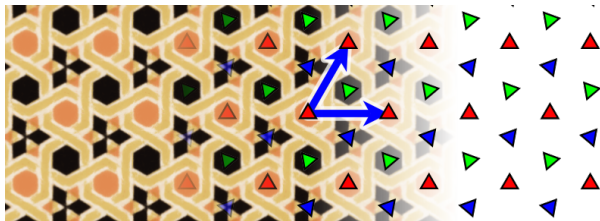
Alternative: Orbifold-Brechung in Extra-Dimensionen



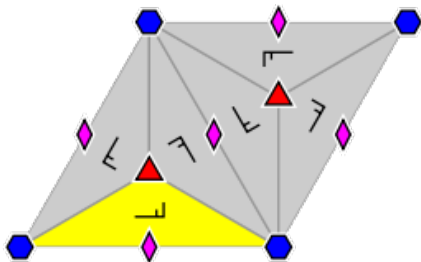
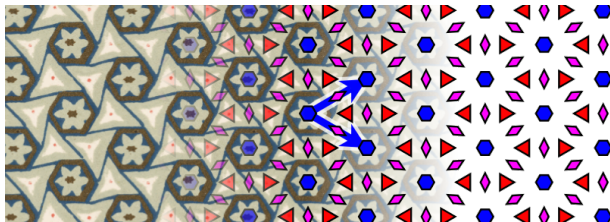
Alternative: Orbifold-Brechung in Extra-Dimensionen



Alternative: Orbifold-Brechung in Extra-Dimensionen



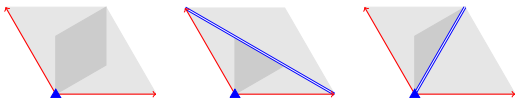
Alternative: Orbifold-Brechung in Extra-Dimensionen



Alternative: Orbifold-Brechung

Braam/Knochel/JRR, JHEP 1006:013

- 5D-Orbifolds nicht möglich:
 - ▶ entweder Dublett-Triplett-Splitting oder keine LQ Phänomenologie
 - ▶ oder kein Mechanismus gegen Proton-Zerfall \Rightarrow **6D-Orbifolds**
- Betrachte: $\mathbb{R}^4 \times (\mathbb{R}^2/\Gamma)$, Γ eine der 17 kristallographischen Gruppen
- Benutze Shifts des Wurzel-Gitters der Bulk- E_6 und diskrete Wilson-Linien auf den Tori
- $E_6 \supset SU(3) \times SU(2)^2 \times U(1)^2$ Brechungen durch $\mathbb{Z}_2, \mathbb{Z}_3, \mathbb{Z}_4$.
- H -Parität: mindestens ein Fix-Punkt, der Higgs/Materie unterscheidet
- ▶ Benutze \mathbb{Z}_3 -Symmetrien: einfachste Beispiele



- mindestens ein Fix-Punkt ($SU(3)^3$), der Lepto-/Diquarkkopplungen trennt
- SUSY erhalten durch nichttriviale Einbettung der $SU(2)$ R-Symmetrie

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

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

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

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

- ▶ Benutze den Trinification-Fixpunkt $SU(3)^3$, um Lepto-/Diquark-Kopplungen zu unterscheiden:

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

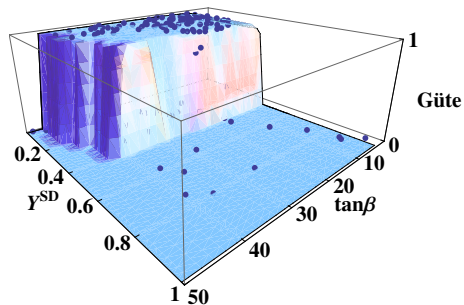
Model Building \Rightarrow Phänomenologie



Scan des Parameter-Raums

Braam/JRR/Wiesler, 0909.3081; JRR et al., 2010

- ▶ # freie Parameter $\sim \mathcal{O}(100)$, zusätzliche Annahmen:
 - Einheitliche Soft-Breaking-Terme
 - Flavour-Struktur
 ⇒ Beschränkung auf 14 Parameter
- ▶ Einschränkungen (mehr gleich):
 - (1) Experimentelle Suchlimits an neue Teilchen
 - (2) Laufende Kopplungen perturbativ bis Λ_{E_6}
 - (3) Skalare (nicht-Higgs) Massenterme bleiben positiv
(⇔ Keine falsche Symmetriebrechung)

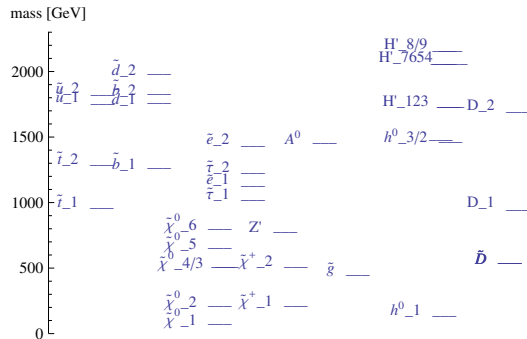


- ▶ 14-dim. Parameterraum
- ⇒ Grid-Scan: $\rightarrow 10^{28}$ Punkte
- ▶ Untersuchung pro Punkt (RGE, Higgs-Potential-Minimierung, Berechnung der Massen) ~ 5 s

Lsg.: Monte-Carlo Markov-Kette durch den Parameter-Raum

- ⇒ Effektive Suche für relevante Parameter-Tupel

Generische Eigenschaften der Spektren

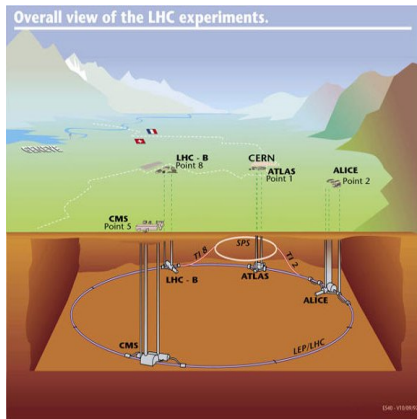
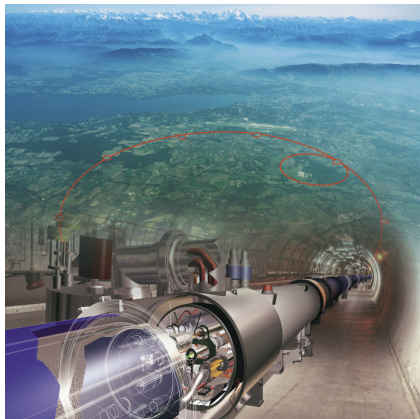


- Verschwindende 1-Loop QCD β -Funktion \Rightarrow **Gluino**
- Higgs und Neutralino-Sektor verschieden durch Beimischung des Singlett-Superfeldes
- leichtes Z'
- Higgs-Sektor mit Flavour: Unhiggses, Unhiggsinos
- Leptoquarks/Leptoquarkinos

Neue Teilchen am Large Hadron Collider

LHC @ CERN: ab März 2010 7 TeV

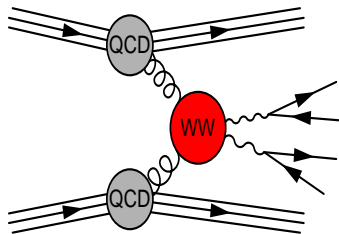
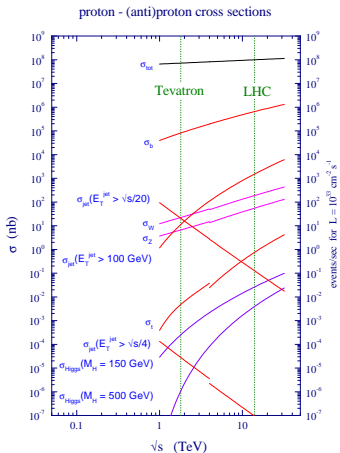
pp-Collider $\sqrt{s} = 14$ TeV



Die Herausforderung des LHC

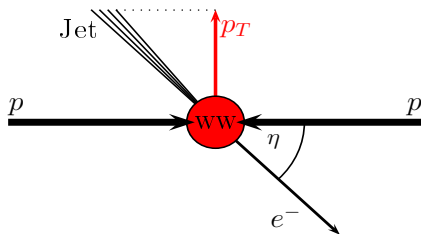
Partonische Subprozesse: qq, qg, gg

Keine feste partonische Energie



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

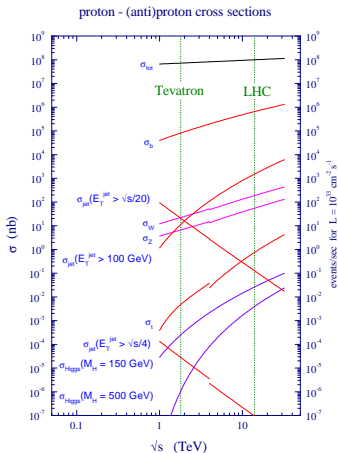
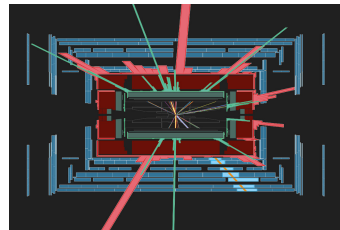
Hohe Raten für $t, W/Z, H, \Rightarrow$
große Untergründe



Die Herausforderung des LHC

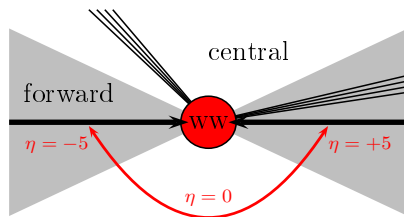
Partonische Subprozesse: qq, qg, gg

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 & Modell-Diskriminierung

Zerfallsprodukte schwerer Teilchen:

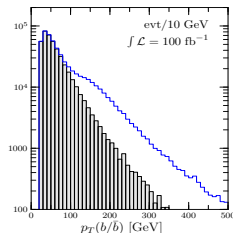
- ▶ high- p_T Jets, viele harte Leptonen

Produktion farbiger Teilchen

schwach ww. Teilchen nur in Zerfällen

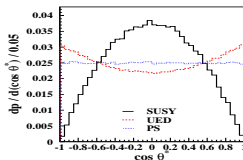
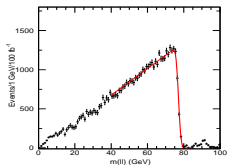
Dunkle Materie \Leftrightarrow **diskrete Parität** (R, T, KK)

- ▶ 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

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



- **Spin neuer Teilchen:** Winkelverteilungen, Asymmetrien, ...
- **Modellbestimmung:** **Messung von Kopplungskonstanten**

Suche & Modell-Diskriminierung

Zerfallsprodukte schwerer Teilchen:

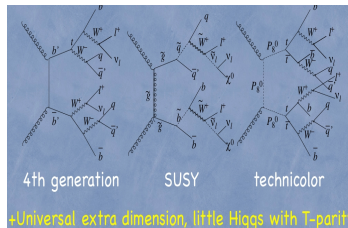
- ▶ high- p_T Jets, viele harte Leptonen

Produktion farbiger Teilchen

schwach ww. Teilchen nur in Zerfällen

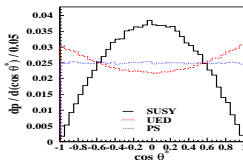
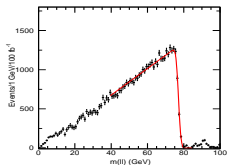
Dunkle Materie \Leftrightarrow **diskrete Parität** (R, T, KK)

- ▶ 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

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



- **Spin neuer Teilchen:** Winkelverteilungen, Asymmetrien, ...
- **Modellbestimmung:** **Messung von Kopplungskonstanten**



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

MODELLTYP	mit CKM-Matrix	triviale CKM
QED mit e, μ, τ, γ	—	QED
QCD mit d, u, s, c, b, t, g	—	QCD
Standard-Modell	SM_CKM	SM
SM mit anomalen Kopplungen	SM_ac_CKM	SM_ac
SM mit anomalen Top-Kopplungen	—	SM_top
SM mit K-Matrix	—	SM_KM
MSSM	MSSM_CKM	MSSM
MSSM mit Gravitinos	—	MSSM_Grav
NMSSM	NMSSM_CKM	NMSSM
erweiterte SUSY-Modelle	—	PSSSM
Littlest Higgs	—	Littlest
Littlest Higgs mit ungeeichter $U(1)$	—	Littlest_Eta
Littlest Higgs mit T -Parität	—	Littlest_Tpar
Simplest Little Higgs (anomalfrei)	—	Simplest
Simplest Little Higgs (universal)	—	Simplest_univ
UED	—	UED
3-Site Higgsless Model	—	Threshl
Noncommutative SM (inoff.)	—	NCSM
SM mit Z'	—	Zprime
SM mit Gravitino und Photino	—	GravTest
Augmentable SM template	—	Template

leicht, neue
Modelle zu implementieren

- ▶ Interface zu FeynRules
- ▶ Paradebeispiel: LHC-Phäno von HEIDI-Modellen

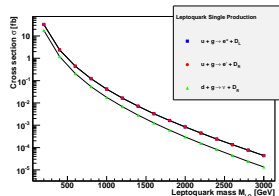
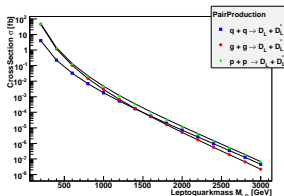
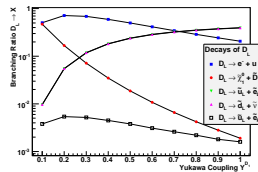
Christensen/Duhr/Fuks/JRR/Specner, 1010.3215

Fuks/JRR/Specner/van der Bij

Vorhersagen von E_6 GUTs für LHC

Braum/JRR/Wiesler, 0909.3081

- ▶ Simulationen für das E_6 -Modell mit WHIZARD
- ▶ Implementierung des Leptoquark/Leptoquarkino + Higgs/schwacher ino Sektor
- ▶ **Analysen:** BRs, Wirkungsquerschnitte für skalare Leptoquarks, S/B
- ▶ Leptoquarkino-Phänomenologie

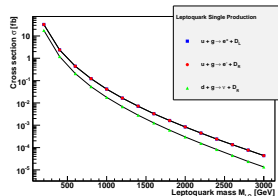
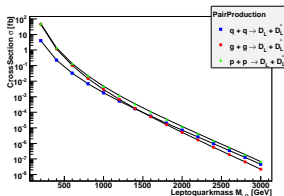
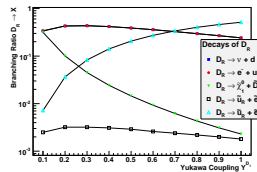


Schnitte		Untergrund	$m_D = 0.6$ TeV		$m_D = 0.8$ TeV		$m_D = 1.0$ TeV	
p_T	$M_{\ell\ell}$	N_{BG}	N_1	S_1/\sqrt{B}	N_2	S_2/\sqrt{B}	N_3	S_3/\sqrt{B}
50	10	413274	64553	93	14823	23	4819	7
100	150	3272	40749	194	10891	92	3767	45
200	150	198	12986	113	5678	74	2405	47

Vorhersagen von E_6 GUTs für LHC

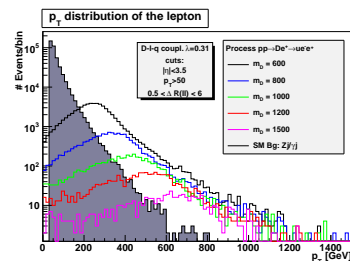
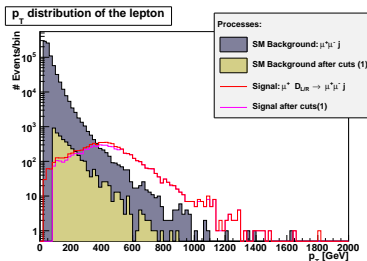
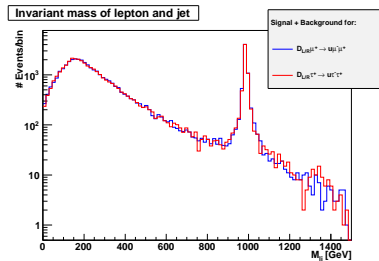
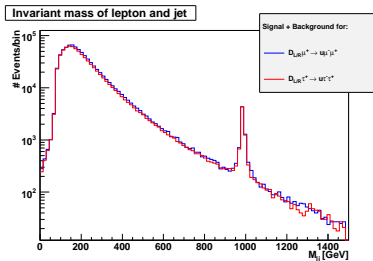
Braum/JRR/Wiesler, 0909.3081

- ▶ Simulationen für das E_6 -Modell mit WHIZARD
- ▶ Implementierung des Leptoquark/Leptoquarkino + Higgs/schwacher ino Sektor
- ▶ **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	93	14823	23	4819	7
100	150	3272	40749	194	10891	92	3767	45
200	150	198	12986	113	5678	74	2405	47

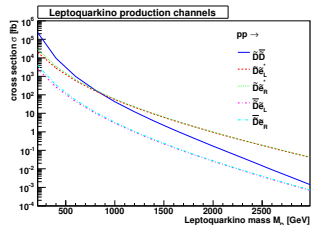
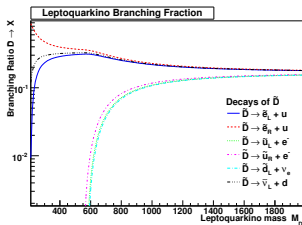
Braum/JRR/Wiesler, 0909.3081; Braam/Horst/Knochel/JRR/Wiesler, 2010/11



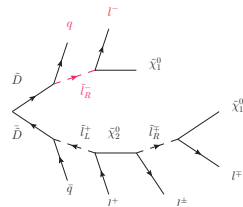
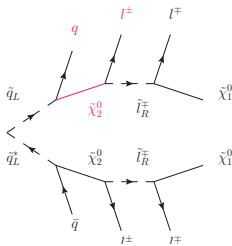
Massenkanten bei Leptoquarkinos

JRR/Wiesler, 1010.4215

- Eigenschaften der Leptoquarkinos:



- Identische exklusive Endzustände

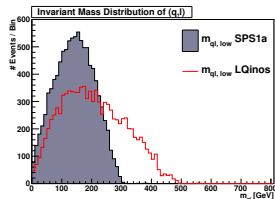
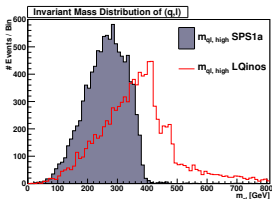


Massenkanten bei Leptoquarkinos

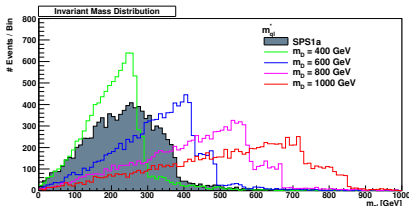
JRR/Wiesler, 1010.4215

- ▶ Massenkanten deutlicher aufgrund fehlender Spinkorrelation

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



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



- ▶ Neue Massenvariable zur Subtraktion komb. Untergründe

JRR/Wiesler

Proton-Zerfall im PSSSM

Mallot/JRR, 2010

- Superpotential (und weiche Brechung) induzieren keinen Proton-Zerfall
- Untersuchung Austausch von E_6 Eichbosonen/Gauginos
- Rechenschritte von "oben nach unten":
 1. Gruppentheoretische Gewichte aus Clebsch-Gordan-Zerlegung
Horst/Mallot/JRR, 2009
 2. Berechnung der Proton-Zerfall-Wilson-Koeffizienten bei Λ_{GUT}
 3. Short-distance (SUSY) Renormierungsgruppenfaktor
 4. Matching auf SM Dimension-6 Fermi-Operatoren
 5. Long-distance (SM/QCD) Renormierungsgruppenfaktor
 6. Matching auf mesonische/baryonische Operatoren (analog zu chiraler Störungstheorie)
 7. Berechnung des Baryon-Zerfallsmatrixelementes und der Breite
- Ergibt **sehr konservative Abschätzung**:

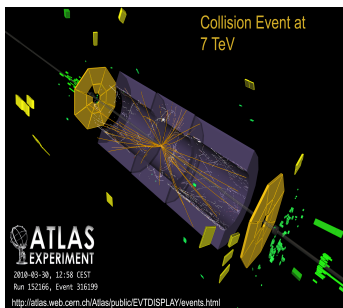
$$1/\Gamma_{\text{tot}}(p \rightarrow X) \approx 10^{40} - 10^{46} \text{ Jahre}$$

Zusammenfassung SUSY GUTs

- Grand Unified Theories mit intermediärer Brechung
- Gangbare Wege: $E_6 \rightarrow SU(3/4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)^2$
- Mögliche Brechungsszenarien: Higgs vs. Orbifold-Randbedingungen
- Proton-Zerfall ausserhalb experimenteller Reichweite
- Direkte Hinweise durch chirale Exotica am LHC
- Interessante, aber verquickte Phänomenologie am LHC
- Einbettung in heterotische Stringtheorie Knochel/Ratz/JRR/Vaudrevange
- Flavour spielt wichtige Rolle: kontinuierliche vs. diskrete Symmetrien
- Offene Fragen: Flavour, Dunkle Materie, SUSY-Brechungsmechanismus

Ausblick

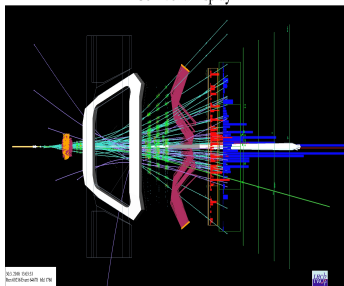
- LHC: neues Zeitalter der Physik bricht an
- Neue Teilchen, neue Symmetrien, neue Wechselwirkungen, Dunkle Materie
- Model Building, Phänomenologie, Tools
- Spannende Zeiten!



Ausblick

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

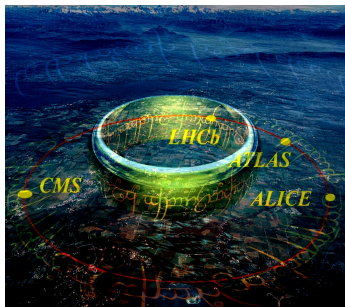
LHCb Event Display



Ausblick

የጥናት ማዘጋጀት ለ ማስገባት።

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



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

Fermionen (Materie-Superfelder)

Einzig möglicher Weg, Materie zu kombinieren:

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

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

Bemerkungen

- ▶ Quarks und Leptonen im selben Multipllett
- ▶ Rationale Ladungen von der Spurfreiheits-Bedingung (Farbe!)
- ▶ $\bar{\mathbf{5}}$ und $\mathbf{10}$ haben gleiche und entgegengesetzte Anomalien
- ▶ ν^c muss ein $SU(5)$ -Singlett sein