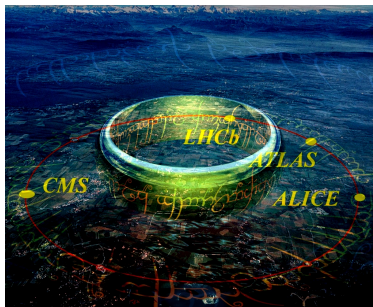


One Ring to find them — Neue Teilchen am LHC

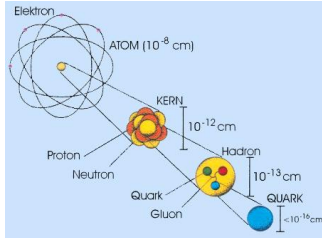
Jürgen Reuter

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg



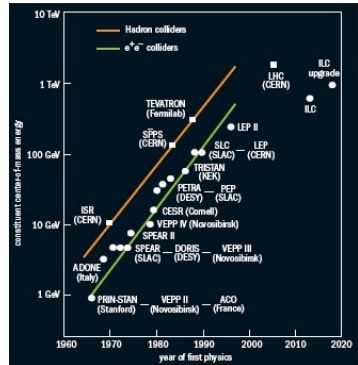
Antrittsvorlesung, Freiburg, 2. Juli 2007

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**







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

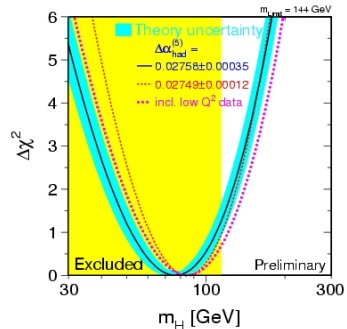
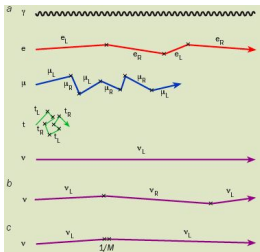
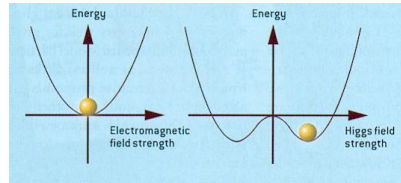
 W, Z

CERN, 1983

– Experimentelle Bestätigung: besser als 1%

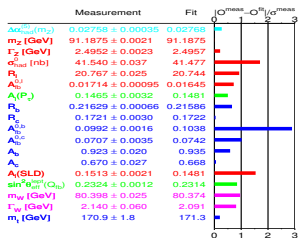
Das Higgs-Boson – A Long Expected Party

- Higgs: fundamentales Skalarfeld
 - Brout, Englert, Higgs, 1964
- Vakuumerwartungswert $v = 246 \text{ GeV}$
- bricht elektroschwache Symmetrie zum Elektromagnetismus
- verleiht Elementarteilchen Masse
- koppelt proportional zur Masse



40 Jahre erfolglose Suche

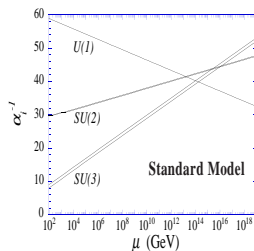
Das Standardmodell der Teilchenphysik – Zweifel



– beschreibt Mikrokosmos (zu gut?)

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



$$\begin{aligned}
 & \int \frac{d^4x}{(2\pi)^4} \sin^2 \theta_W \int d\Omega (\sigma \cdot N_{\vec{k}}) \bar{\psi}(\vec{k}' \rightarrow \psi_{\mu}) \frac{\Lambda^{4+\epsilon}}{\Omega^{\epsilon}} \\
 & - \sum e \frac{v e \theta^2}{(\sigma \cdot N_{\vec{k}})^2 + \Gamma^2} \cdot \frac{v}{\Omega} e_{\mu} \frac{\omega^{\mu}}{\Gamma} \\
 & - \int \int \frac{d^4x d^4y}{(2\pi)^4} g(\nu_e, \nu_\mu) \bar{\psi}_{\nu_e} e^{-i k \cdot x} \psi_{\nu_\mu} e^{-i k \cdot y} \\
 & + \prod_{i=1}^3 \langle \nu_e | \nu_\mu \rangle \langle \nu_\mu | \nu_e \rangle \frac{1}{\Gamma^2} \\
 & + \int \frac{d^4x}{(2\pi)^4} \bar{\psi} \Gamma \psi \omega(\mu^2, s) \\
 & = 115 \text{ GeV}
 \end{aligned}$$

"This does not necessarily mean
that this is the Higgs mass!"



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

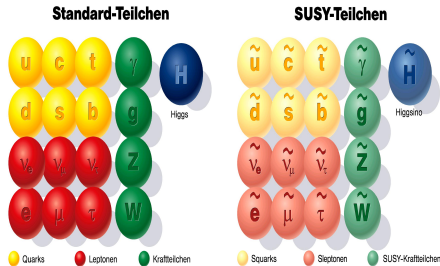
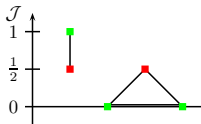
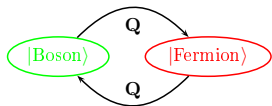
(4) Ignorieren der Hierarchie

- **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



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

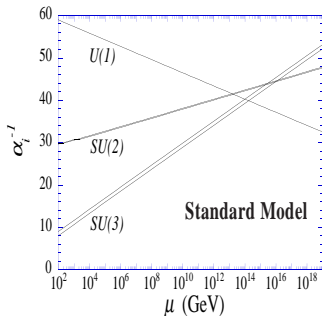
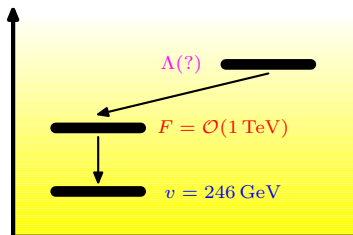
Hassliebe SUSY: Erfolge und Nebenwirkungen

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

Brechung in "hidden sector"

Brechungsmechanismus 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

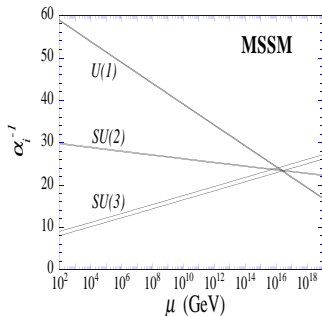
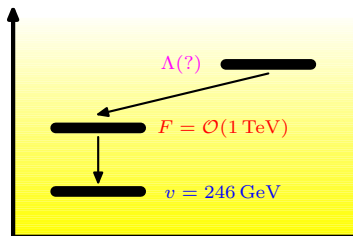
Hassliebe SUSY: Erfolge und Nebenwirkungen

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

Brechung in "hidden sector"

Brechungsmechanismus 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
 - ▶ Vereinigung der Kopplungskonstanten
- $\tilde{\chi}_1^0$



"SUSY will be discovered, even if non-existent"



Und wenn nicht SUSY?

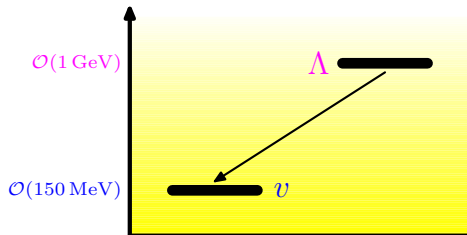
Higgs als Pseudo-Goldstone-Boson: Technicolor

Nambu-Goldstone-Theorem: Spontane Brechung einer globalen Symmetrie: masselose (Goldstone)-Bosonen im Spektrum 1960/61

Color:

Adler/Weisberger, 1965; Weinberg, 1966-69

Leichte Pionen als (Pseudo)-Goldstone-Bosonen der spontan gebrochenen chiralen Symmetrie



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

Skala v : Pionen, Kaonen, ...

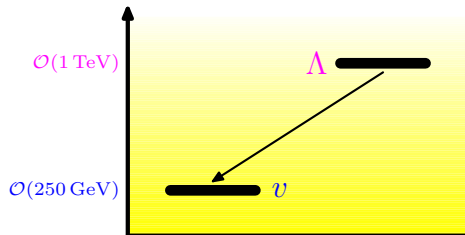
Higgs als Pseudo-Goldstone-Boson: Technicolor

Nambu-Goldstone-Theorem: Spontane Brechung einer globalen Symmetrie: masselose (Goldstone)-Bosonen im Spektrum 1960/61

Technicolor:

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

Leichtes Higgs als (Pseudo)-Goldstone-Bosonen einer neuen spontan gebrochenen chiralen Symmetrie



Skala Λ : chirale
Symmetriebrechung,
Techni-Quarks, $SU(N)_{TC}$

Skala v : Higgs, Techni-Pionen

experimentell eingeschränkt, aber nicht ausgeschlossen

Kollektive Symmetriebrechung, Moose-Modelle

Kollektive Symmetriebrechung:

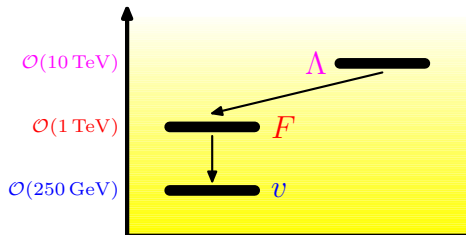
Arkani-Hamed/Cohen/Georgi/Nelson/..., 2001



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

Higgs-Masse erst durch Quantenkorrekturen
2. Ordnung:

$$M_H \sim (0.1)^2 \times \Lambda$$



Skala Λ : chirale SB, starke WW

Skala F :

Pseudo-Goldstone-Bosonen,
neue Eichbosonen

Skala v : Higgs

Little-Higgs-Modelle



- Ökonomische Implementierung der kollektiven Symmetriebrechung

- **Neue Teilchen:**

- ▶ Eichbosonen:

$$\gamma', Z', W'^{\pm}$$

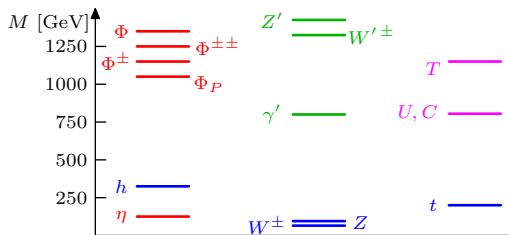
- ▶ Schwere Fermionen:

$$T, U, C, \dots$$

- ▶ Quantenkorrekturen zu M_H eliminiert durch Teilchen gleicher Statistik

Littlest Higgs

Arkani-Hamed/Cohen/Katz/Nelson, 2002

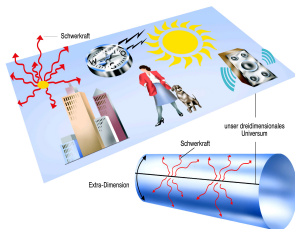


- “Little Big Higgs”: Higgs schwer (300 – 500 GeV)

- **diskrete T -(TeV-Skala)-Parität:**

- ▶ ermöglicht leichtere neue Teilchen
- ▶ Dunkle Materie: LTOP (lightest T-odd), meistens γ'

Extra Dimensionen & Higgslose Modelle

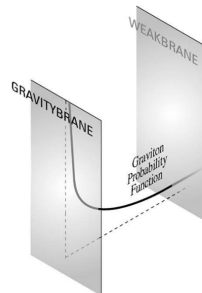


Motivation: Stringtheorie

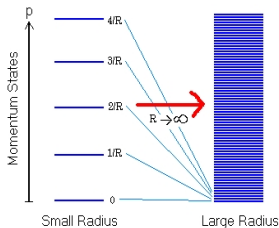
3 + n Raumdimensionen: Radius $R \sim 10^{\frac{30}{n}-17}$ cm
 Antoniadis, 1990; Arkani-Hamed/Dimopoulos/Dvali, 1998

Gravitation stark in höheren Dimensionen
 Teilchen im Potentialtopf: Kaluza-Klein-Tower
 Produktion von Mini-Black Holes am LHC

- ▶ **“Higgsless Models”**: Higgs Komponente höherdim. Eichfeldes
- ▶ **“Large Extra Dimensions”**: Kontinuum von Zuständen
- ▶ **“Warped Extra Dimensions”**: diskrete, auflösbare Resonanzen Randall/Sundrum, 1999
- ▶ **“Universal Extra Dimensions”**: auch Fermionen/Eichbosonen in höheren Dimensionen



Extra Dimensionen & Higgslose Modelle



Motivation: Stringtheorie

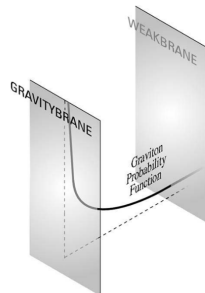
$3 + n$ Raumdimensionen: Radius $R \sim 10^{\frac{30}{n}-17}$ cm
Antoniadis, 1990; Arkani-Hamed/Dimopoulos/Dvali, 1998

Gravitation stark in höheren Dimensionen

Teilchen im Potentialtopf: Kaluza-Klein-Tower

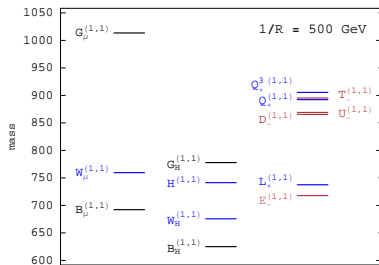
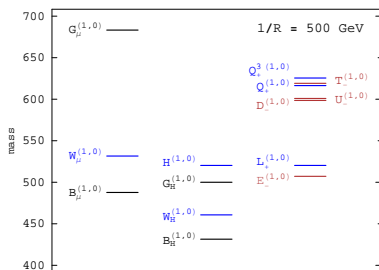
Produktion von Mini-Black Holes am LHC

- ▶ “Higgsless Models”: Higgs Komponente höherdim. Eichfeldes
- ▶ “Large Extra Dimensions”: Kontinuum von Zuständen
- ▶ “Warped Extra Dimensions”: diskrete, auflösbare Resonanzen Randall/Sundrum, 1999
- ▶ “Universal Extra Dimensions”: auch Fermionen/Eichbosonen in höheren Dimensionen



KK-Parität und Dunkle Materie

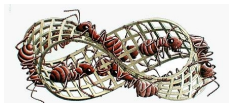
► typische Kaluza-Klein-Spektren



- Struktur des Spektrums **ähnlich zu SUSY**, aber im Spin verschoben
- Dunkle Materie: leichtestes KK -ungerades Teilchen (LKP)
Photonresonanz γ' (in 5D Vektor, in 6D Skalar)
- Zitat der SUSY-Orthodoxie:
"This is a strawman's model invented with the only purpose to be inflamed to shed light on the beauty of supersymmetry!"

Nichtkommutative Raumzeit

Wess et al., 2000



- Annahme: nichtkommutierende Raumzeit-Koordinaten $[\hat{x}_\mu, \hat{x}_\nu] = i\theta_{\mu\nu}$
- Klassisches Analogon: geladenes Teilchen im untersten Landau-Niveau: $\{x_i, x_j\}_P = 2c(B^{-1})_{ij}/e$
- Niederenergie-Limes in Stringtheorien
- **Yang-Landau-Theorem verletzt:** $Z \rightarrow \gamma\gamma, gg$ möglich

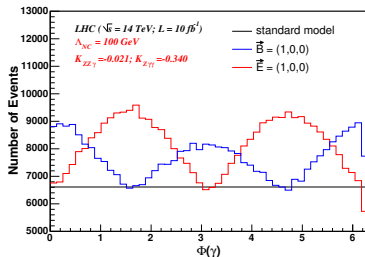
Seiberg/Witten, 1999

- Richtung im Universum:
Rotationsinvarianz gebrochen

- Streuquerschnitte hängen vom Azimutwinkel ab

⇒ Unterschiedliche Signale bei Drehung der Erde

- Dunkle Materie, Kosmologie, theoretische Probleme



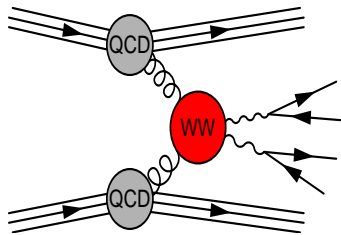
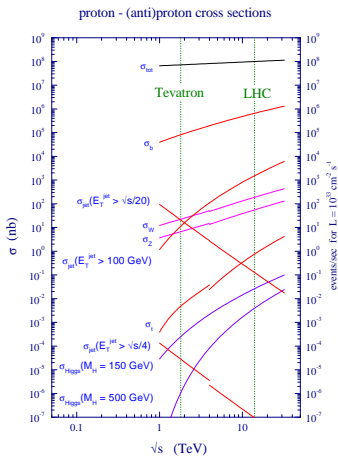
Welches Modell?

A Conspiracy Unmasked



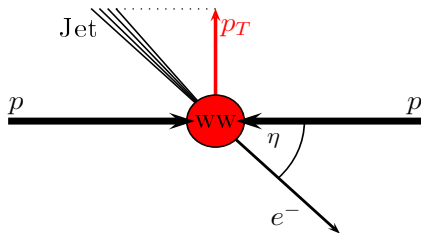
Die Herausforderung des LHC

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



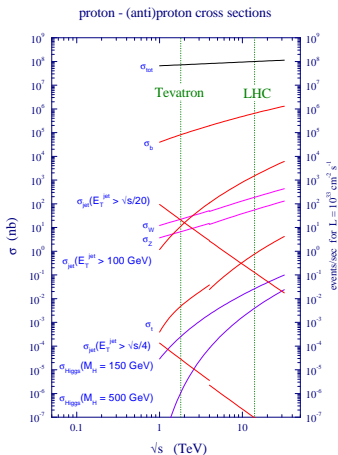
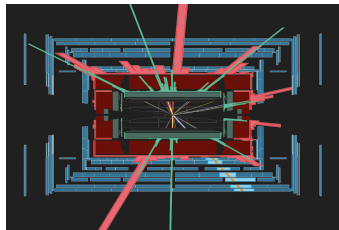
$$R = \sigma \mathcal{L} \quad \mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

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



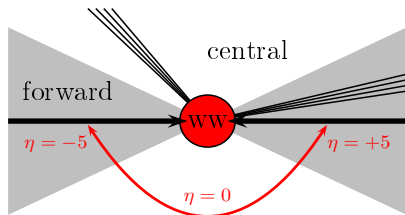
Die Herausforderung des LHC

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

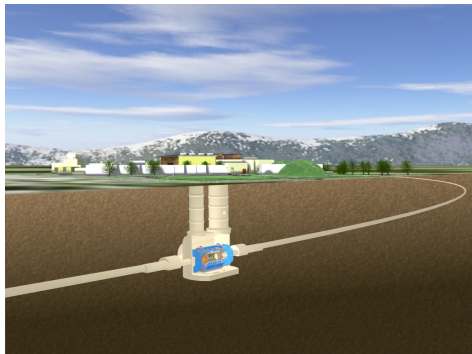


$$R = \sigma \mathcal{L} \quad \mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

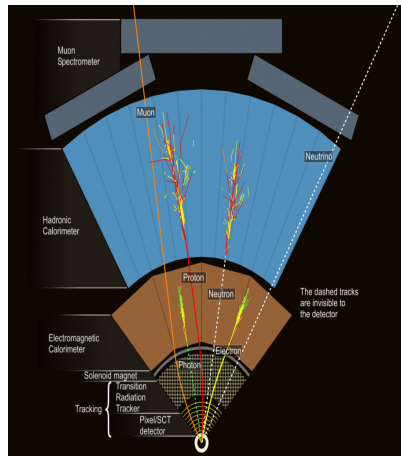
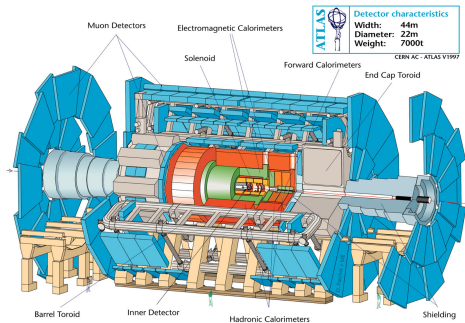
Hohe Raten für $t, W/Z, H, \Rightarrow$
große Untergründe



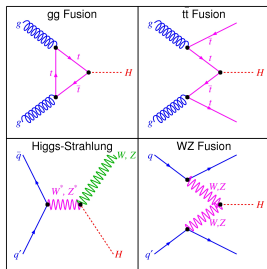
Die Detektoren – z.B. ATLAS



Die Detektoren – z.B. ATLAS



Die Suche nach dem Higgs



Produktion: Gluon-/Vektorboson-Fusion

zerfällt bevorzugt in schwerste Teilchen

$b\bar{b}$ hoffnungslos: Untergrund!

Detektion seltener Zerfälle

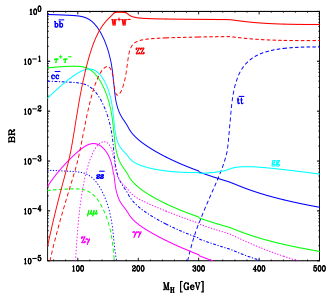
Komplizierte Suche: viele Kanäle

hohe Statistik notwendig

$\gamma\gamma$: Massenbestimmung

$M_H > 135 \text{ GeV}$: $ZZ^* \rightarrow llll$

Die Suche nach dem Higgs



Produktion: Gluon-/Vektorboson-Fusion
 zerfällt bevorzugt in schwerste Teilchen

$b\bar{b}$ hoffnungslos: Untergrund!

Detektion seltener Zerfälle

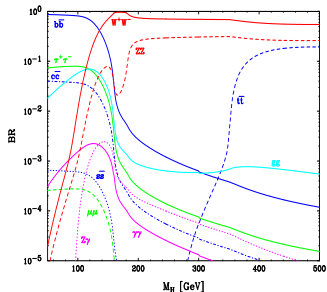
Komplizierte Suche: viele Kanäle

hohe Statistik notwendig

$\gamma\gamma$: Massenbestimmung

$M_H > 135 \text{ GeV}$: $ZZ^* \rightarrow llll$

Die Suche nach dem Higgs



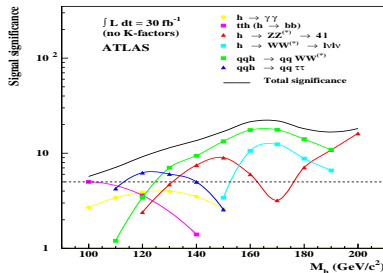
Produktion: Gluon-/Vektorboson-Fusion
 zerfällt bevorzugt in schwerste Teilchen
 $b\bar{b}$ hoffnungslos: Untergrund!
 Detektion seltener Zerfälle

Komplizierte Suche: viele Kanäle

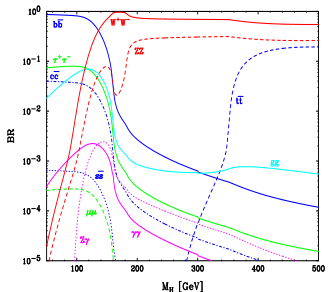
hohe Statistik notwendig

$\gamma\gamma$: Massenbestimmung

$M_H > 135 \text{ GeV}$: $ZZ^* \rightarrow llll$



Die Suche nach dem Higgs



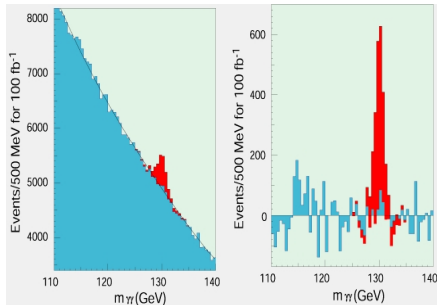
Produktion: Gluon-/Vektorboson-Fusion
 zerfällt bevorzugt in schwerste Teilchen
 $b\bar{b}$ hoffnungslos: Untergrund!
 Detektion seltener Zerfälle

Komplizierte Suche: viele Kanäle

hohe Statistik notwendig

$\gamma\gamma$: Massenbestimmung

$M_H > 135 \text{ GeV}$: $ZZ^* \rightarrow llll$



Suche nach neuen Teilchen

Zerfallsprodukte schwerer Teilchen:

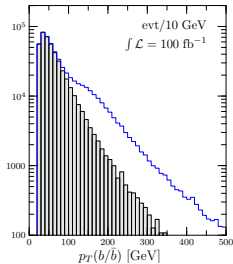
- ▶ high- p_T Jets
- ▶ viele harte Leptonen

Produktion farbiger Teilchen

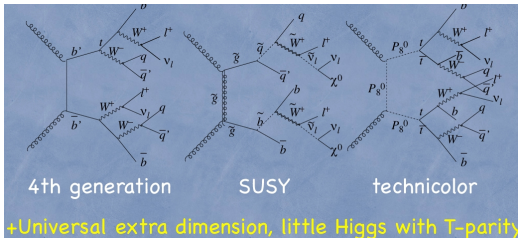
schwach ww. Teilchen nur in Zerfällen

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



Suche nach neuen Teilchen

Zerfallsprodukte schwerer Teilchen:

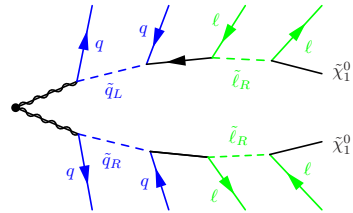
- ▶ high- p_T Jets
- ▶ viele harte Leptonen

Produktion farbiger Teilchen

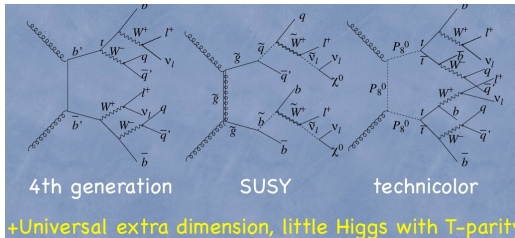
schwach ww. Teilchen nur in Zerfällen

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)

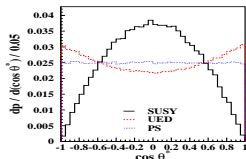
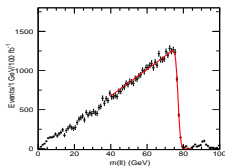
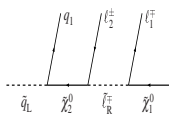


Unterschiedliche Modelle/Zerfallsketten — gleiche Signaturen



Modell-Diskriminierung – A Journey to Cross-Roads

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



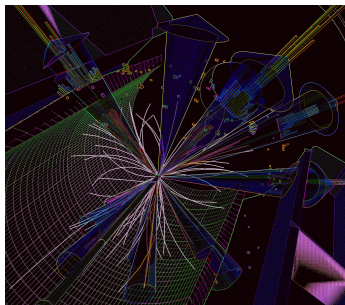
- **Spin neuer Teilchen:** Spin neuer Teilchen: Winkelverteilungen, ...
- **Modellbestimmung:** **Messung von Kopplungskonstanten**

⇒ 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

Ausblick

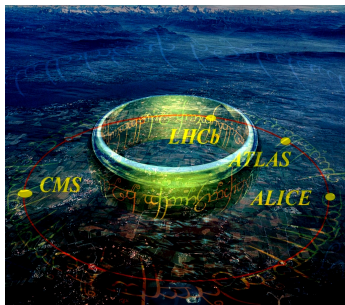
- ▶ **LHC: neues Zeitalter der Physik bricht an**
- ▶ Neue Teilchen, neue Symmetrien, neue Wechselwirkungen
- ▶ Dunkle Materie
- ▶ Spannende Zeiten!



Ausblick

የአዲስ ዘመን ስርዓት ለጥናት

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



“Will man nun annehmen, dass das abstrakte Denken das Höchste ist, so folgt daraus, dass die Wissenschaft und die Denker stolz die Existenz verlassen und es uns anderen Menschen überlassen, das Schlimmste zu erdulden. Ja es folgt daraus zugleich etwas für den abstrakten Denker selbst, dass er nämlich, da er ja doch selbst auch ein Existierender ist, in irgendeiner Weise distrairt sein muss.”

Søren Kierkegaard