

5. Physik jenseits des Standardmodells

5.1 Offene Fragen der Elementarteilchenphysik

5.2 Große vereinheitlichte Theorien

5.3 Supersymmetrie

5.4 Produktion supersymmetrischer Teilchen

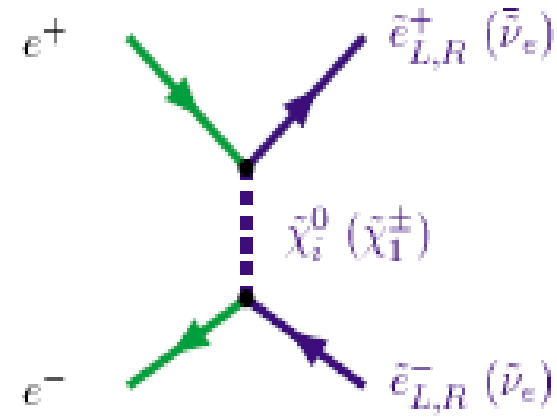
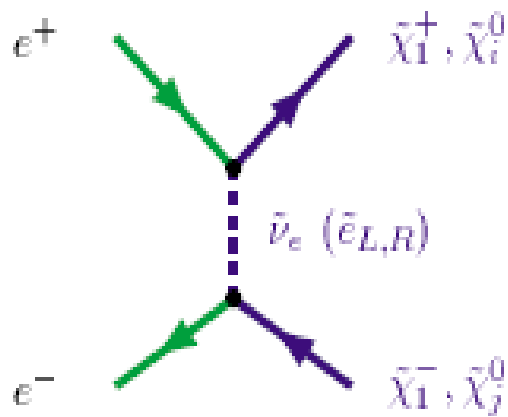
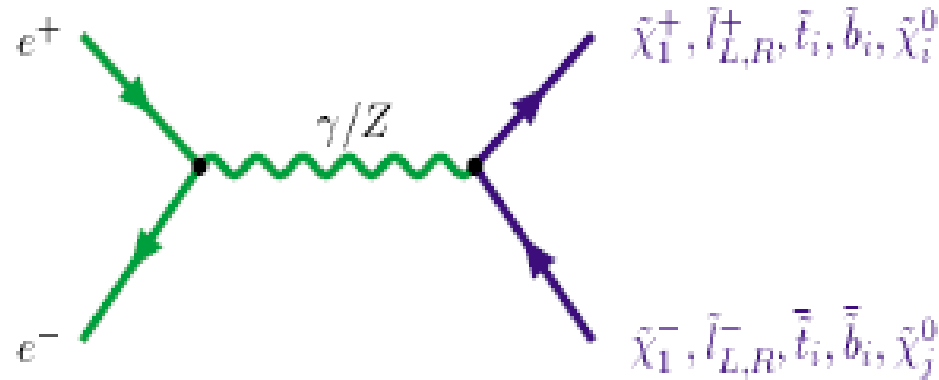
5.5 Experimentelle Tests von Supersymmetrie

5.6 Alternativen zur Supersymmetrie

5. Physik jenseits des Standardmodells

5.4 Produktion supersymmetrischer Teilchen

Produktion von SUSY Teilchen in e^+e^- -Kollisionen



kinematische Massengrenze: $m_{\text{sparticle}} < \sqrt{s}/2$

SUSY Wirkungsquerschnitte in e^+e^- -Kollisionen

Wirkungsquerschnitte bei LEP2-Energien

Chargino-Produktion: $\chi^+ \chi^-$

Selectron-Produktion: $\tilde{e}^+ \tilde{e}^-$

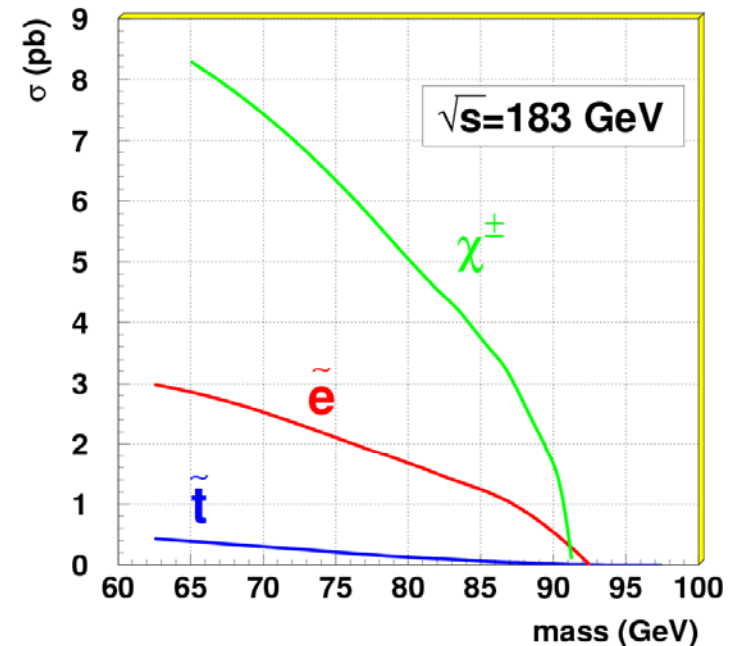
Stop-Produktion: $\tilde{t}^+ \tilde{t}^-$

Experimentelle Signatur:

großer fehlender Transversalimpuls

Am LHC: typische Schwerpunktsenergie \approx :
max. Energie/6 (3 Quarks und Hälfte der
Impulse in Gluonen) \rightarrow SUSY Bereich
am LHC typisch $14\text{TeV}/6/2 \approx 1\text{ TeV}$

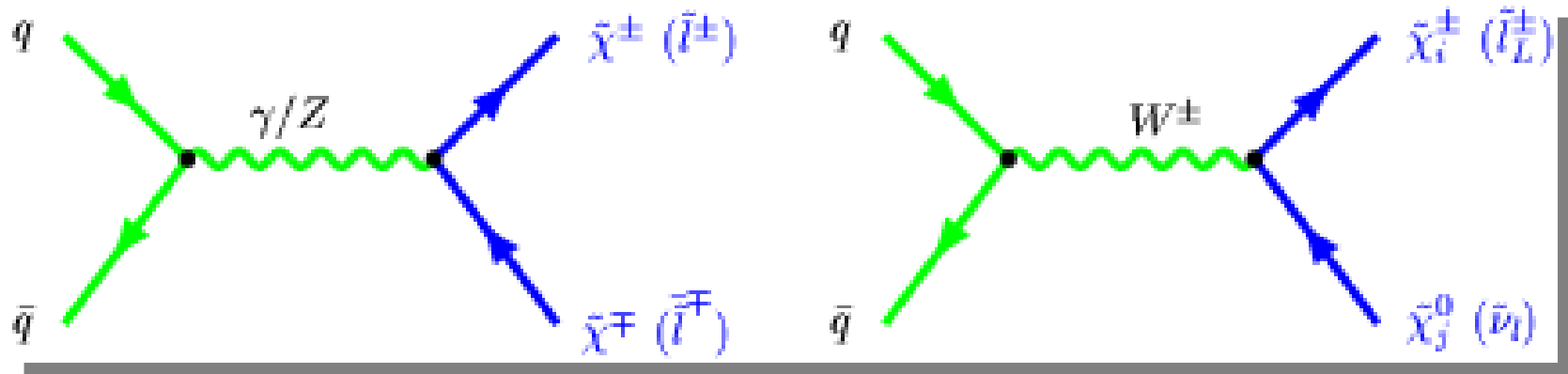
SUSY Cross Sections



$$m_{\text{particle}}^{\text{max}} \leq \frac{\sqrt{s}}{2}$$

SUSY-Produktion an Hadronbeschleunigern

Quark-Antiquark-Annihilation (s-Kanal)



Chargino-Produktion

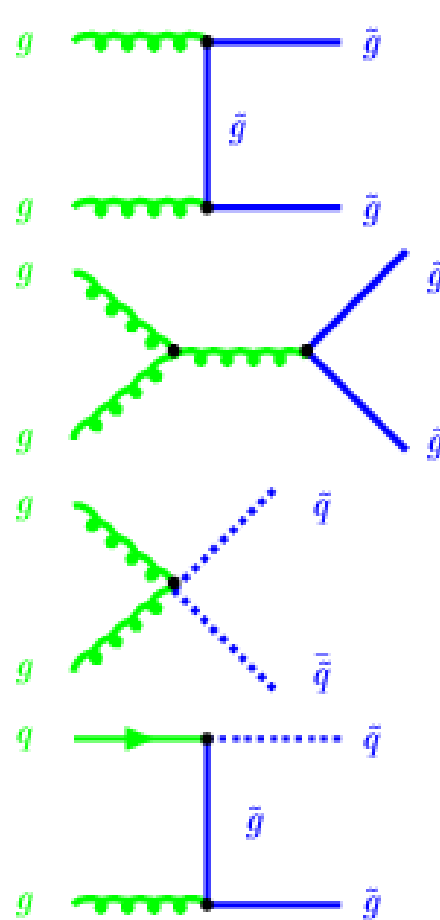
Slepton-Produktion

Chargino-Neutralino-Produktion

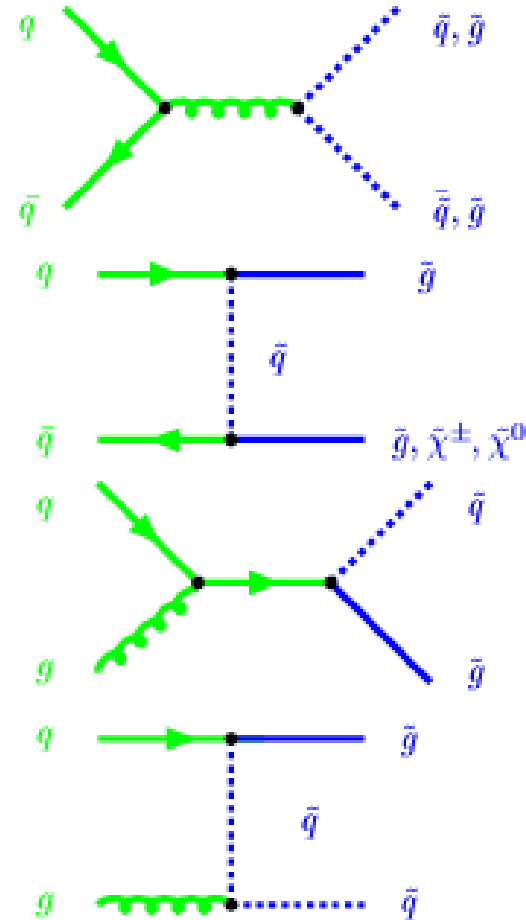
Slepton-sneutrino-Produktion

Gluino- und Squark-Produktion durch gluon-induzierte Prozesse

Gluon-Gluon-Fusion



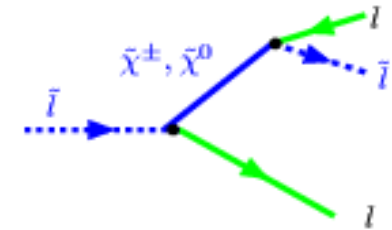
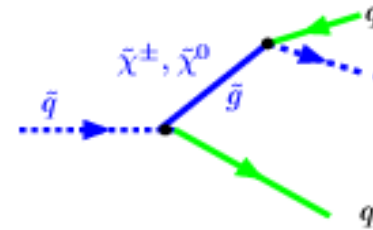
Quark-Gluon-Streuung



Zerfall der Super-Teilchen

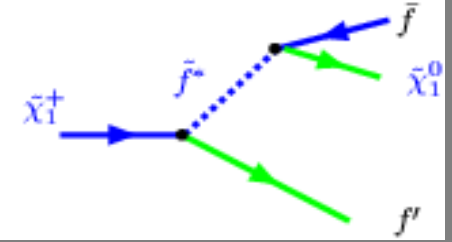
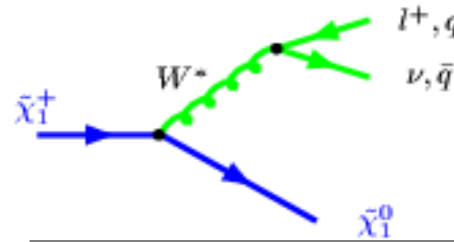
Squarks:

$$\begin{aligned}\tilde{q}_{L,R} &\rightarrow q + \tilde{\chi}_i^0 \\ \tilde{q}_L &\rightarrow q' + \tilde{\chi}_i^\pm \\ \tilde{q} &\rightarrow q + \tilde{g}\end{aligned}$$



Sleptonen:

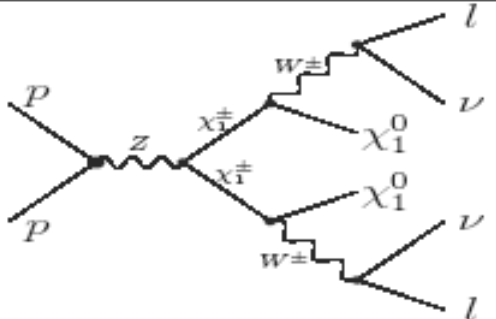
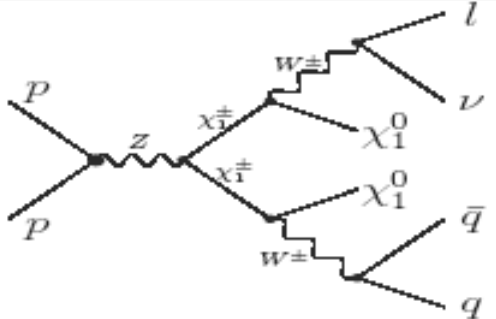
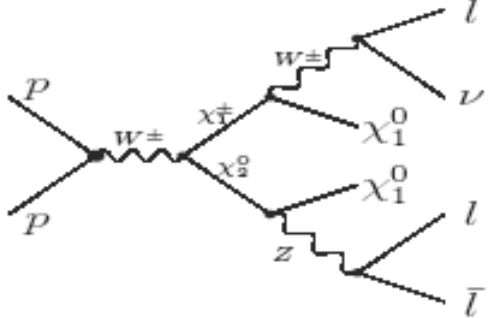
$$\begin{aligned}\tilde{l} &\rightarrow l + \tilde{\chi}_i^0 \\ \tilde{l}_L &\rightarrow \nu_l + \tilde{\chi}_i^\pm\end{aligned}$$

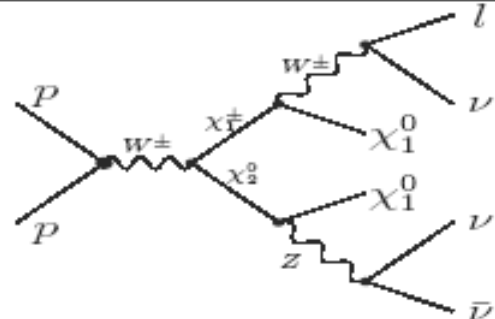
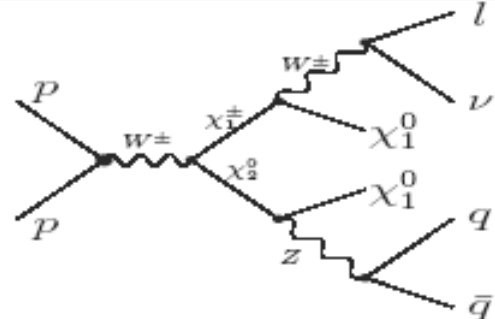
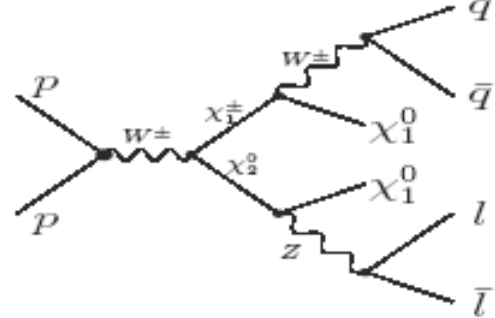


Neutralinos:

$$\begin{aligned}\tilde{\chi}_2^0 &\rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + l^+ l^- & \tilde{\chi}_2^0 &\rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm + l^\mp \nu_l \\ \tilde{\chi}_2^0 &\rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + q \bar{q} \\ \tilde{\chi}_2^0 &\rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + \nu_l \bar{\nu}_l\end{aligned}$$

Endzustände: Chargino-Neutralino-Produktion

process	final states
 <p>Diagram: Two incoming protons (P) interact via a Z boson. The Z boson decays into two charginos (χ_1^\pm). Each chargino then decays into a lepton (l) and a neutrino (ν), with a W^\pm boson being emitted in the process.</p>	$2l$ 2ν \cancel{E}_T $\sigma \approx 0.2pb$
 <p>Diagram: Two incoming protons (P) interact via a Z boson. The Z boson decays into two charginos (χ_1^\pm). One chargino decays into a lepton (l) and a neutrino (ν), with a W^\pm boson being emitted. The other chargino decays into a quark (q) and an antiquark (\bar{q}), with a W^\pm boson being emitted.</p>	$1l$ $2j$ ν \cancel{E}_T $\sigma \approx 0.3pb$
 <p>Diagram: Two incoming protons (P) interact via a W^\pm boson. The W^\pm boson decays into two charginos (χ_1^\pm and χ_2^0). Each chargino decays into a lepton (l) and a neutrino (ν), with a W^\pm boson being emitted. The neutralino (χ_2^0) decays into a lepton (l) and an antilepton (\bar{l}), with a Z boson being emitted.</p>	$3l$ ν \cancel{E}_T $\sigma \approx 0.1pb$

process	final states
 <p>Diagram: Two incoming protons (P) interact via a W^\pm boson. The W^\pm boson decays into two charginos (χ_1^\pm and χ_2^0). One chargino decays into a lepton (l) and a neutrino (ν), with a W^\pm boson being emitted. The other chargino decays into a neutrino (ν) and an antineutrino ($\bar{\nu}$), with a Z boson being emitted.</p>	l 3ν \cancel{E}_T $\sigma \approx 0.2pb$
 <p>Diagram: Two incoming protons (P) interact via a W^\pm boson. The W^\pm boson decays into two charginos (χ_1^\pm and χ_2^0). One chargino decays into a lepton (l) and a neutrino (ν), with a W^\pm boson being emitted. The other chargino decays into a quark (q) and an antiquark (\bar{q}), with a Z boson being emitted.</p>	l ν $2j$ \cancel{E}_T $\sigma \approx 0.5pb$
 <p>Diagram: Two incoming protons (P) interact via a W^\pm boson. The W^\pm boson decays into two charginos (χ_1^\pm and χ_2^0). One chargino decays into a lepton (l) and an antiquark (\bar{q}), with a W^\pm boson being emitted. The other chargino decays into a lepton (l) and an antilepton (\bar{l}), with a Z boson being emitted.</p>	$2l$ $2j$ \cancel{E}_T $\sigma \approx 0.2pb$

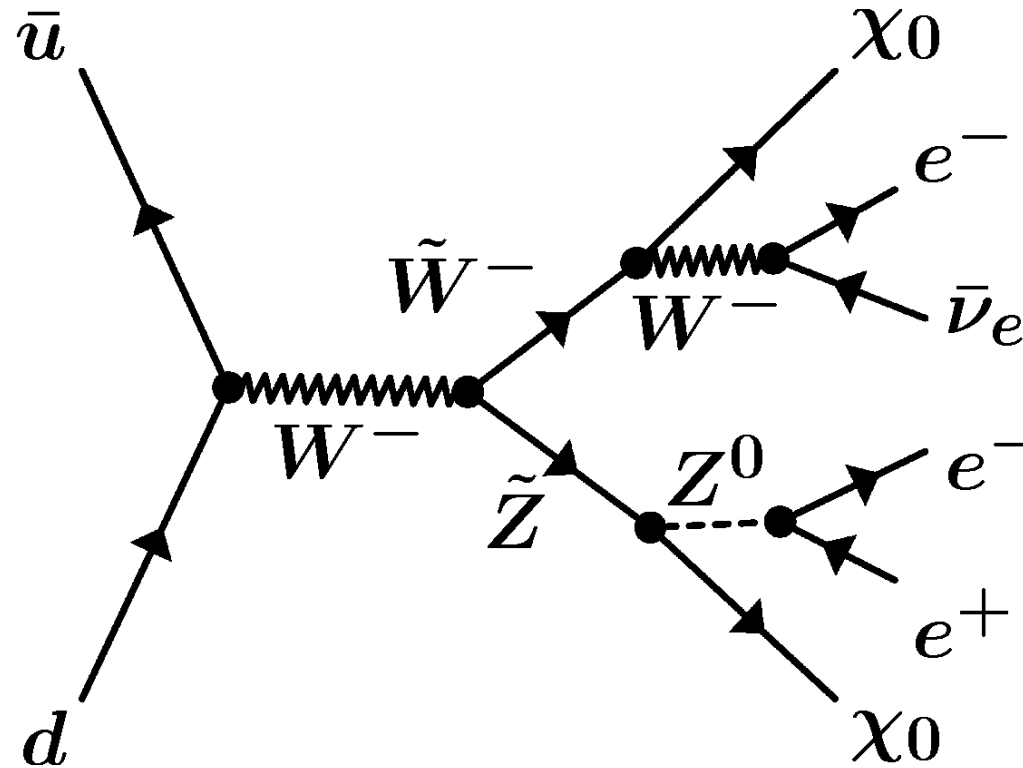
Endzustände: Gluinoproduktion

	2ℓ 2ν $6j$ $\cancel{I_T}$ $\sigma \approx 0.06pb$
	2ℓ $6j$ $\cancel{I_T}$ $\sigma \approx 0.04pb$
	2ℓ $6j$ $\cancel{I_T}$ $\sigma \approx 0.3pb$

	2ℓ 2ν $8j$ $\cancel{I_T}$ $\sigma \approx 0.1pb$
	$8j$ $\cancel{I_T}$ $\sigma \approx 3pb$
	$8j$ $\cancel{I_T}$ $\sigma \approx 1pb$

Wino-Bino-Produktion

SUSY-Analog der WZ Produktion im Standardmodell.



Endzustand:

3 Leptonen + fehlender Transversalimpuls

5. Physik jenseits des Standardmodells

5.5 Experimentelle Tests von Supersymmetrie

Was wissen wir über die SUSY-Parameter?

Einschränkungen an den SUSY Parameterraum

5.5.1 Das leichteste Higgs < 130 GeV (Strahlungskorrekturen)

5.5.2 LEP Massengrenzen und Higgs-Hinweise

5.5.3 g-2 Messungen

5.5.4 Radiative B-Zerfälle ($b \rightarrow s\gamma$)

**5.5.5 WMAP Messung der Energie der DM
EGRET DM-Signal**

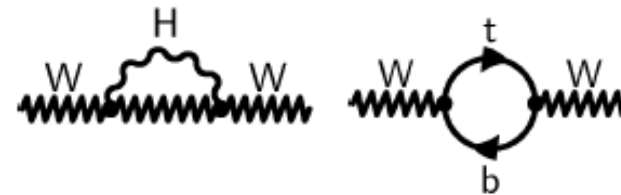
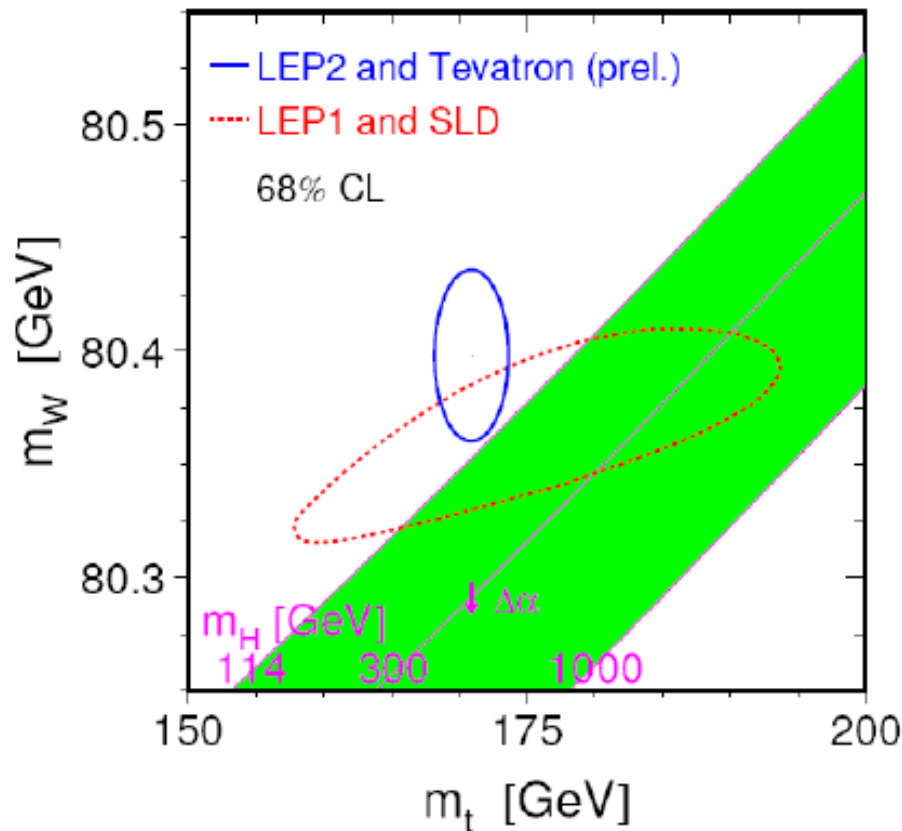
5.5.6 Vereinigung der Eichkopplungen

5.5.1 Higgs-Masse aus Präzisionsmessungen

Präzisionsmessungen der elektroschwachen Wechselwirkung sind über Schleifenkorrekturen sensitiv auf die Higgs-Masse.

(siehe Vorlesung zur Top-Quark-Physik, Kapitel 3.4)

Stand Sommer 2007:



Anpassung an Präzisionsmessungen:

$m_H < 182 \text{ GeV}/c^2$
mit 95% Konfidenz
(berücksichtigt direkte Untergrenze, Quelle: LEPEWWG)

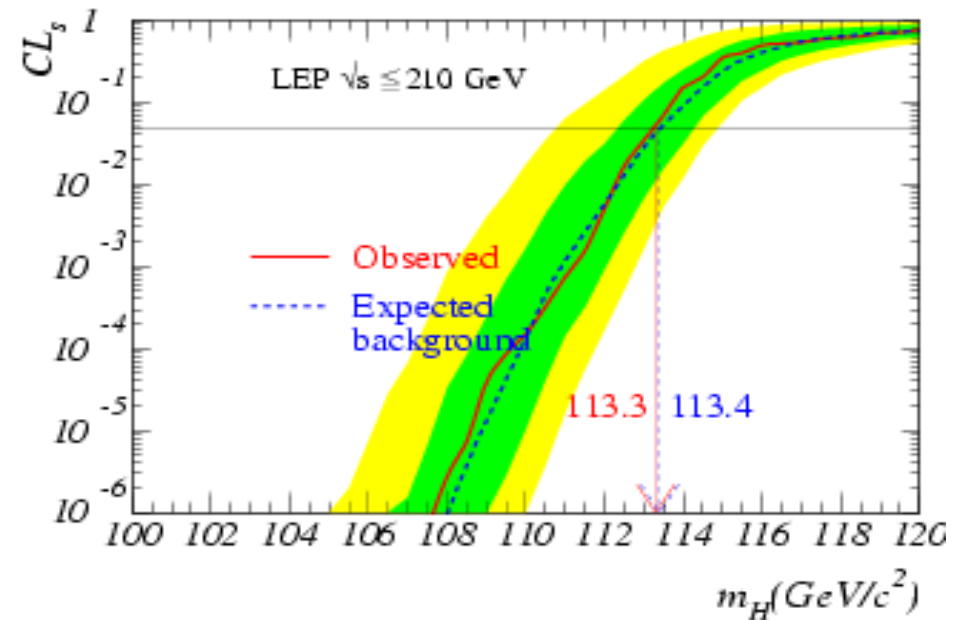
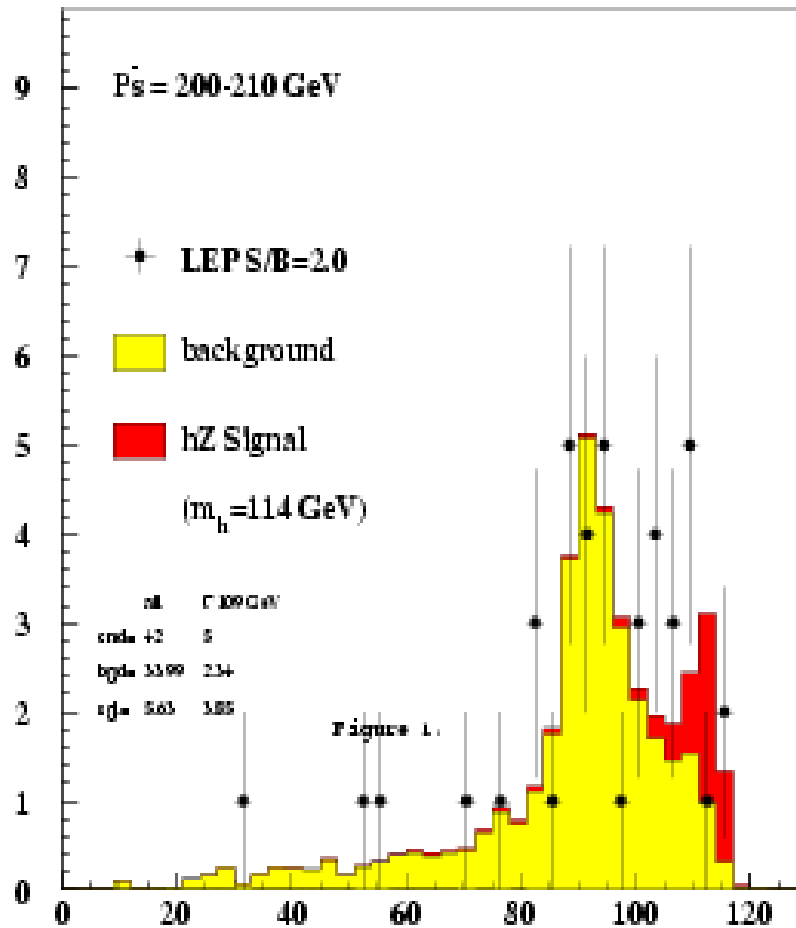
Minimum bei:

$$m_H = 76^{+33}_{-24} \text{ GeV}/c^2$$

Top-Physik ist Higgs-Physik !

Direkte Higgs-Suchen bei LEP 2

$m_H \geq 113.4 \text{ GeV}$ at 95 % C.L.



Kleiner Überschuss an Ereignissen bei 114 -115 GeV sorgte im Jahr 2000 für Aufregung.

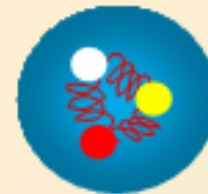
Was ist g-2 ?

- The gyromagnetic ratio, g , relates spin angular momentum to the particle's magnetic moment

$$\bar{\mu}_S = g \left(\frac{e}{2m} \right) \bar{S}$$

- Dirac theory: point-like, spin-1/2 particles have $g = 2$, but ...

» **proton**
» **hyperons** } $g \gg 2$



» **electron**
» **muon** } g almost equal to 2



- The muon *anomalous* magnetic moment is

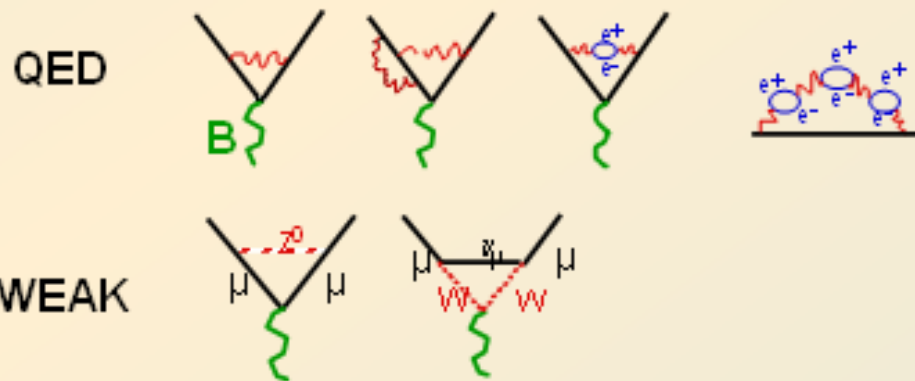
$$a_\mu = \frac{(g-2)_\mu}{2} \approx \frac{\alpha}{2\pi} \approx \frac{1}{800}$$

Wodurch entsteht g-2?

$$a_{\mu}^{\text{"NEW"}} = \left(a_{\mu}^{\text{exp t}} - a_{\mu}^{\text{theory}} \right)$$

QED + WEAK + HADRONIC

Standard Model g-2



not (too) controversial

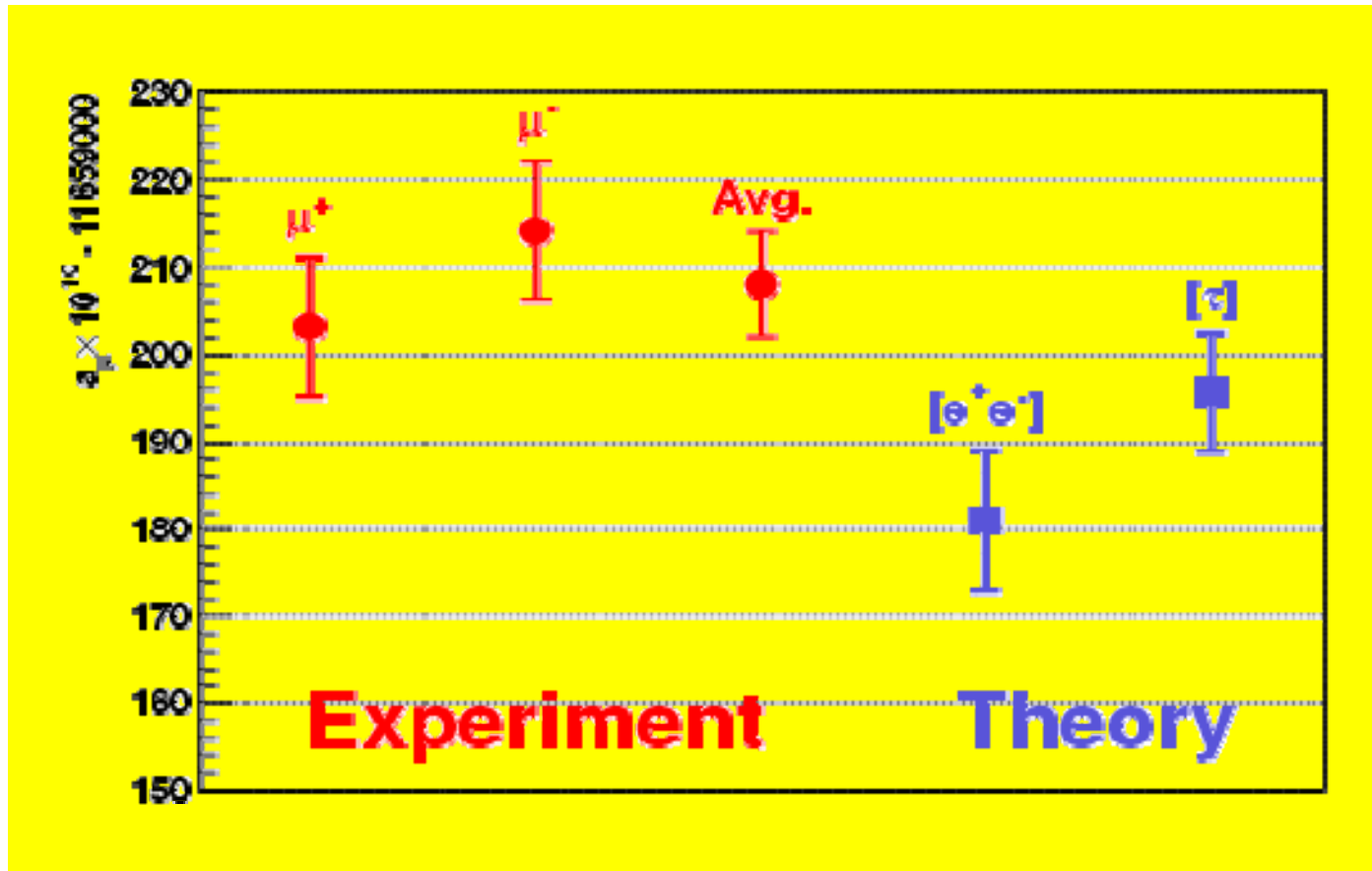
Mögliche Abweichungen vom SM, wenn neue schwere Teilchen im Vakuum kurzfristig erzeugt werden. (Erlaubt nach Heisenberg)

-> Präzisionsmessungen ermöglichen ein Fenster zur neuen Physik!!!

g – 2 Messergebnisse

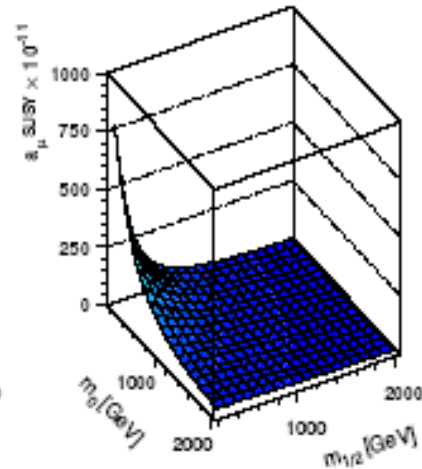
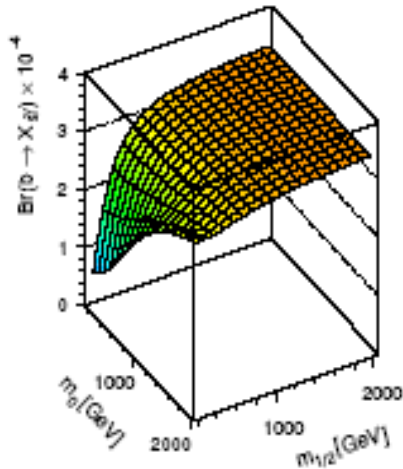
$(g-2)/2 = 11659203 \pm 7$ (PDG 2004)

Messung der MUG2
Kollaboration (Brookhaven)



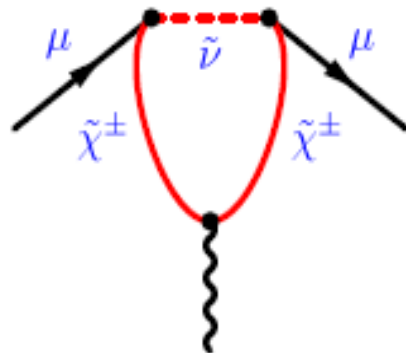
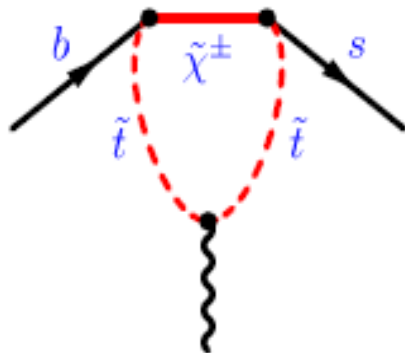
Daten weichen (etwas) ab vom SM -> OBERE Massengrenze für SUSY

5.5.4 $b \rightarrow s + \gamma$



MSSM Contributions:

Combined Data on $Br(b \rightarrow X_s \gamma)$ from ALEPH, BaBar, CLEO, BELLE slightly BELOW SM prediction, if one uses running c-quark mass $m_c(\mu)/m_b = 0.22$ (Gambino and Misiak, hep-ph/0104034)



Data on anomalous magnetic moment from E-821 slightly ABOVE SM prediction, after correcting sign error in SM prediction from light-by-light scattering

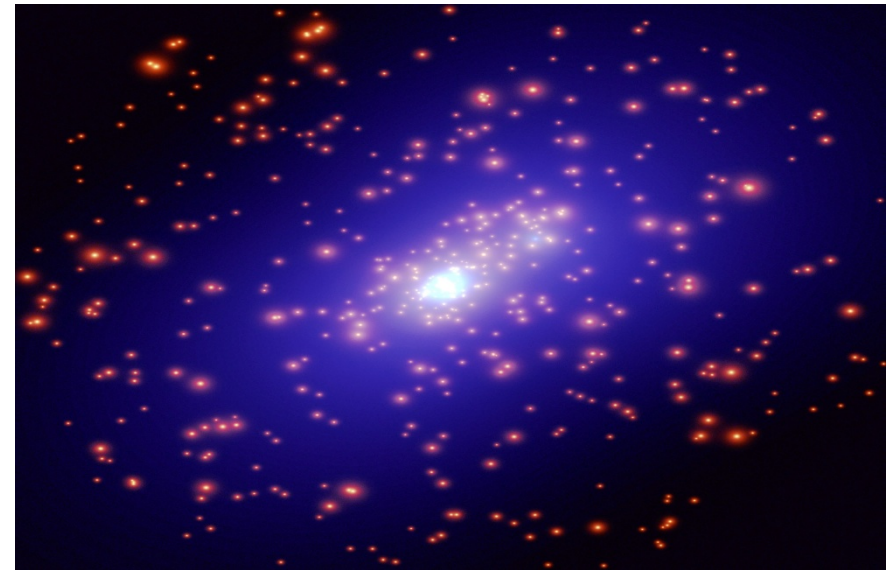
Daten fast wie im SM vorhergesagt -> UNTERE Massengrenze für SUSY

Der EGRET-Satellit (1991 – 2000)

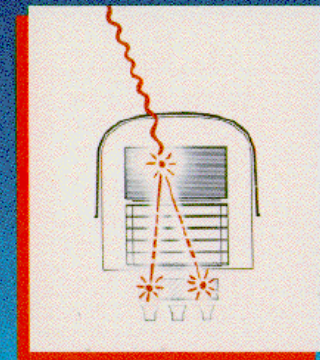
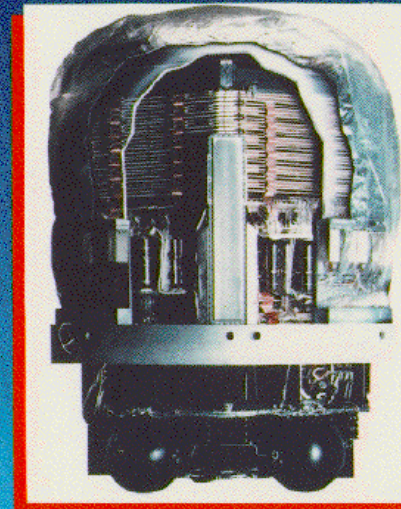
EGRET Satellit hat 9 Jahre lang Photonen bis 100 GeV im Weltall gemessen. Die Daten zeigen einen **Überschuss**, der in allen Himmelsrichtungen das gleiche Spektrum hat.

Interpretation (W. de Boer et al.):
Photonen aus der Selbstannihilation der DM in Quarks.

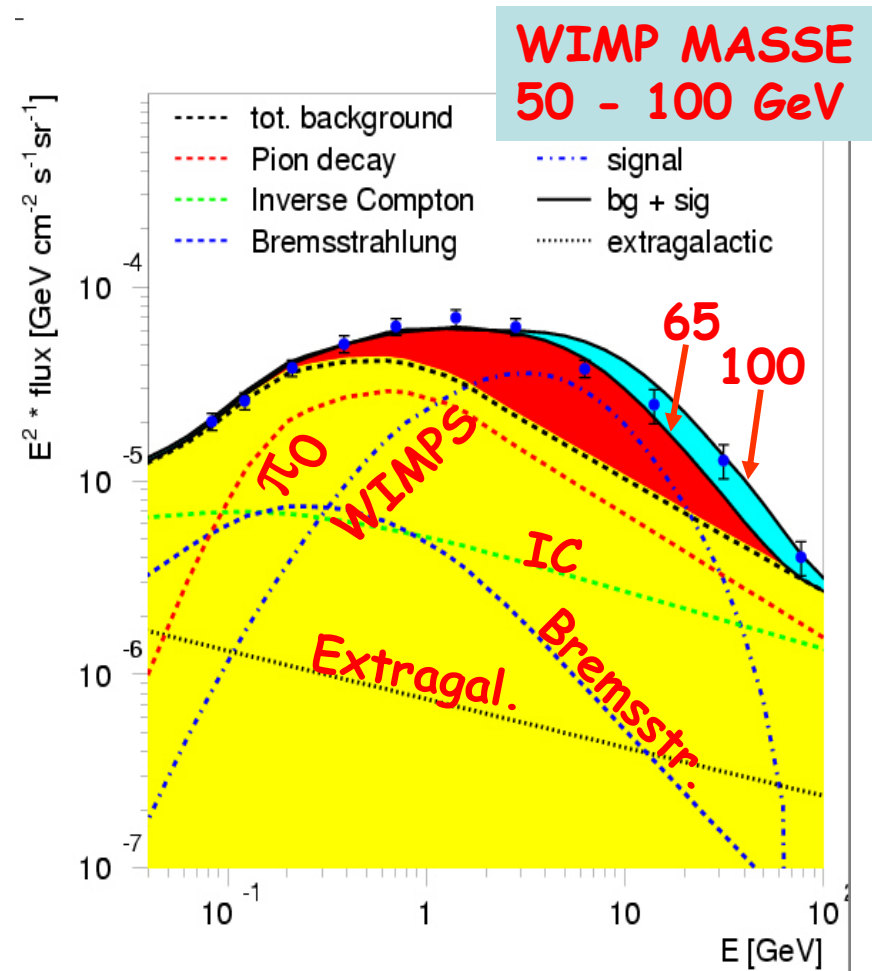
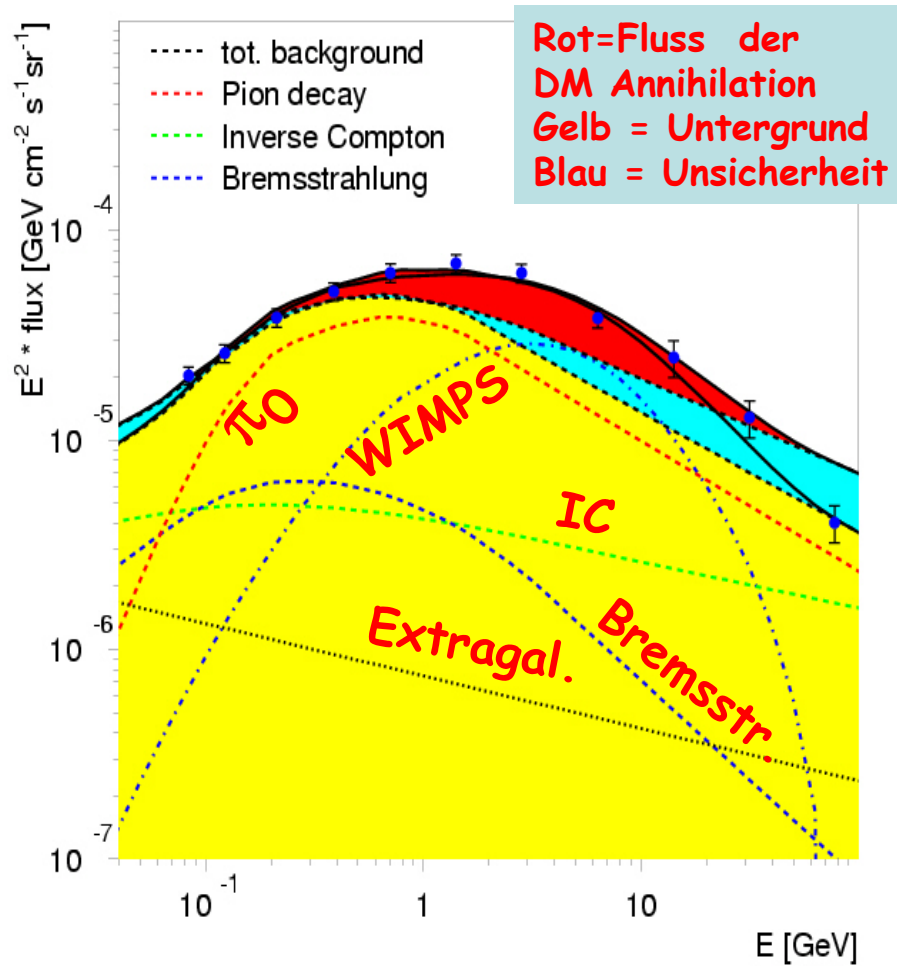
- WIMP-Masse kann aus dem Energiespektrum bestimmt werden
- Verteilung der DM kann aus der räumlichen Intensitätsverteilung bestimmt werden (Halostruktur)



Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)

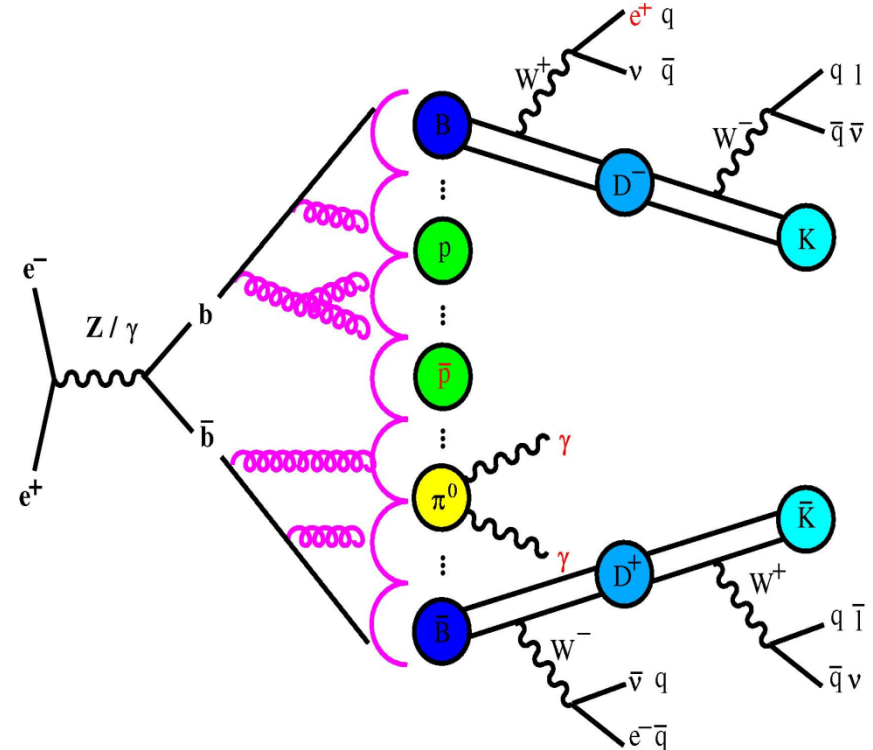
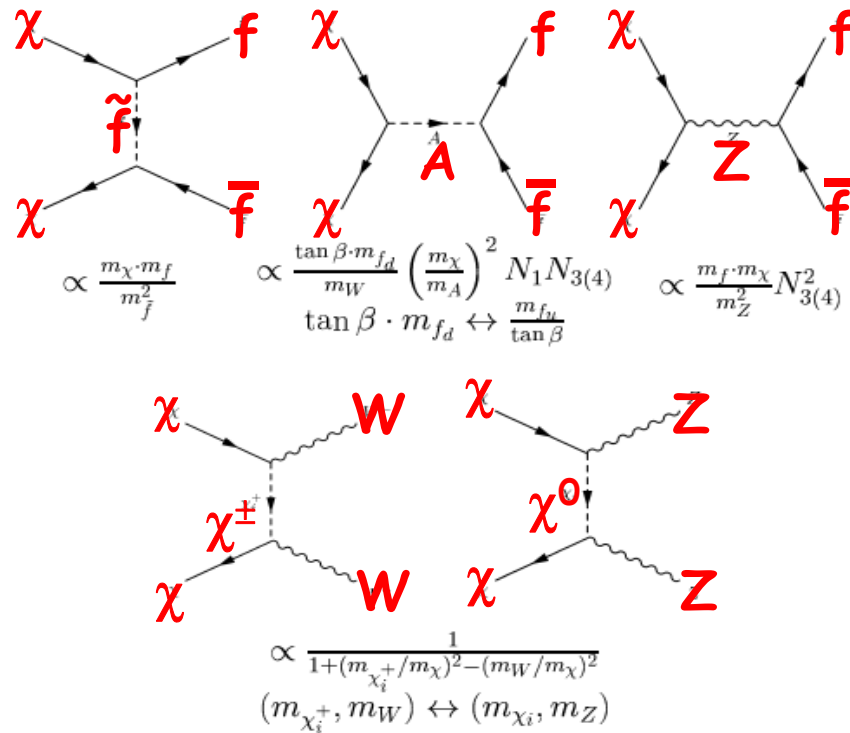


Das EGRET Energiespektrum



Das Energiespektrum lässt sich unter der Annahme eines WIMP (Weak Interacting Massive Particle) besser anpassen!

Annihilation dunkler Materie im SUSY-Modell



**Dominanter Prozess: $\chi + \chi \Rightarrow A$
 \Rightarrow MONOENERGETISCHE
 b bquer Quarks**

**Gamma-Spektrum monoenergetischer
 Quarks wurde bei LEP gut studiert!**

Zusammenfassung

Was sollte man sich merken?

- Es gibt weiterhin spannende, offene Fragen in der Elementarteilchenphysik
- Große vereinheitlichte Theorien und supersymmetrische Theorien sind Vorschläge zur Beantwortung einiger (aber nicht aller) Fragen
- Basis der Ansätze sind:
 - größere zugrunde liegende Symmetriegruppe
 - Symmetrie zwischen Quarks und Leptonen
 - Vereinigung der Kräfte bei einer hohen Energieskala
- Untergrenzen auf Protonlebensdauer schließen einfach GU Theorien aus
- Experimentelle Einschränkungen an SUSY-Modelle
 - Direkte Suchen, $g-2$, $b \rightarrow s\gamma$
- LHC wird über SUSY-Modelle entscheiden
- Nicht besprochen: große Extra-Dimensionen, Top-Color, ...

Arbeitsprogramm für den LHC

1. Entdecke das leichteste Higgs-Boson
2. Suche nach SUSY-Teilchen
3. Suche nach Evidenz für zusätzliche Raumdimensionen

5. Physik jenseits des Standardmodells

5.6 Alternativen zur Supersymmetrie

6.6.1 Starke elektroschwache Symmetriebrechung

6.6.2 Technicolour

6.6.3 Extra-Dimensionen

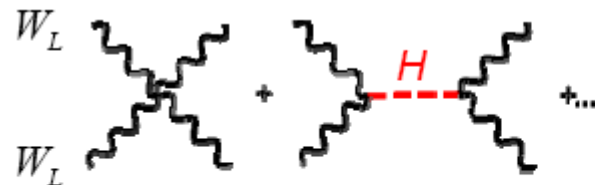
6.6.4 Little-Higgs-Modelle

$W_L W_L$ -Streuung

Bei hohen Energien ($\sqrt{s} \sim 1 \text{ TeV}$) divergiert die Streuamplitude für $W_L W_L \rightarrow W_L W_L$ in Störungsrechnung.

Lösung:

1. Higgs: Diagramme mit Higgs-Austausch regularisieren Streuamplitude
 $\Rightarrow M_H < 1 \text{ TeV}$
2. Starke Wechselwirkung: schwache WW wird stark



From finite term: $M_H < 1 \text{ TeV}$

$$A \sim G_F s - G_F s \sim G_F M_H^2$$

contact+ γ, Z

Higgs exchange

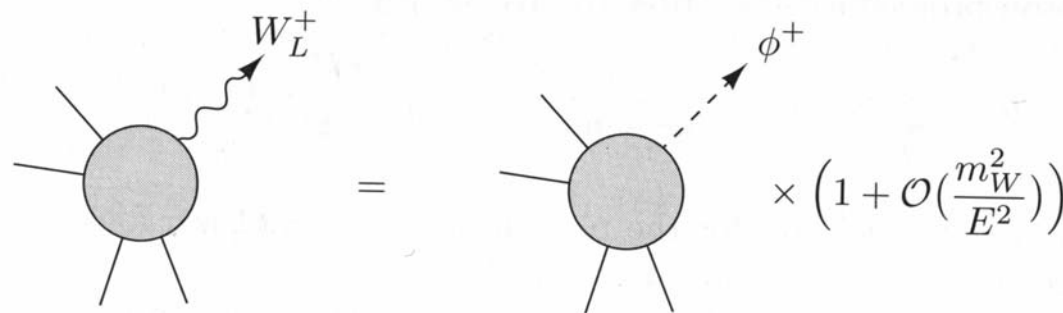
N.B.: $\Gamma_H \approx 0.5 M_H (M_H/1 \text{ TeV})^2$

Starke elektroschwache Symmetriebrechung

Postuliert neue, starke (nicht QCD!) Wechselwirkung zwischen den longitudinalen Komponenten der massiven Eichbosonen.

Die longitudinalen Komponenten der Eichbosonen treten als Konsequenz der elektroschwachen Symmetriebrechung auf.

⇒ Goldstone Boson-Äquivalenz-Theorem



Bei hohen Energien wird die Streuamplitude für die Emission bzw. Absorption eines longitudinal polarisierten Eichbosons gleich der Amplitude für die Emission bzw. Absorption des assoziierten Goldstone-Bosons.

Goldstone-Boson-Äquivalenz-Theorem

Higgs-Mechanismus:

Erhaltung der Zahl der Freiheitsgrade der beteiligten Teilchen

⇒ masseloses Eichboson (2 Polarisationszustände) wird mit einem skalaren Boson zu einem massiven Eichboson kombiniert (3 Polarisationszustände)

plastische Sprechweise:

„Das Goldstone-Boson wird vom Eichboson aufgegessen.“

Literatur: Peskin, Schroeder, Kapitel 21.2

Originalpapier: J.M. Cornwall, D.N. Levin und G. Tiktopoulos, Phys. Rev. D10, 1145 (1974).

Polarisationszustände von Vektorbosonen

Vierer-Impuls-Vektor k^μ

Im Ruhesystem: $k^\mu = (m, 0, 0, 0)$

Polarisationsvektor ϵ^μ

ist eine Linearkombination der drei orthogonalen Einheitsvektoren

$(0, 1, 0, 0)$ $(0, 0, 1, 0)$ $(0, 0, 0, 1)$

Kinematik longitudinaler Vektorbosonen

Boosten des Vektorbosons entlang der z-Achse:

$$k^\mu = (E(\vec{k}), 0, 0, k)$$

3 Polarisationszustände:

transversale Zustände sind proportional zu:

$$(0, 1, 0, 0) \quad (0, 0, 1, 0)$$

longitudinaler Polarisationsvektor:

$$\epsilon_L^\mu(k) = \left(\frac{k}{m}, 0, 0, \frac{E(\vec{k})}{m} \right)$$

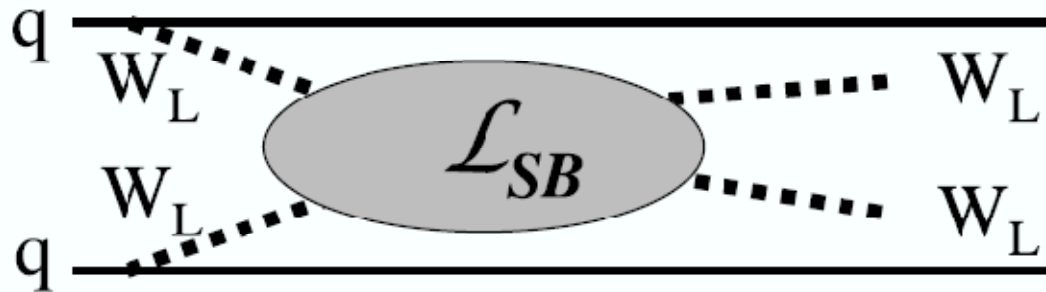
Experimentelle Signatur

Starke Streuung von WW Paaren:

$$W_L W_L \rightarrow W_L W_L$$

z.B. in
Hadronkollisionen

Signatur: harte
Vorwärts-Jets



Am e⁺e⁻ Linear-Beschleuniger:

$$e^+ e^- \rightarrow \nu \bar{\nu} + W^+ W^-$$

5.6.2 Technicolour

Annahme:

neue starke, asymptotisch freie Eichwechselwirkung

Eichgruppe: G_{TC}

Eichkopplung: α_{TC}

wird stark bei einigen 100 GeV

neue Dubletts von Technifermions

\Rightarrow formen Kondensate, die W und Z Massen geben

Technicolour hat Schwierigkeiten den Fermionen Massen zu geben.

Experimentelle Suche: Suche nach Techni-Vektormesonen ρ_T ω_T oder Technipionen, z.B.

$$\rho_T \rightarrow W_L^+ W_L^- \quad \pi_T^0 \rightarrow b\bar{b}$$

Experimentell sehr ähnlich zur Higgs-Suche.

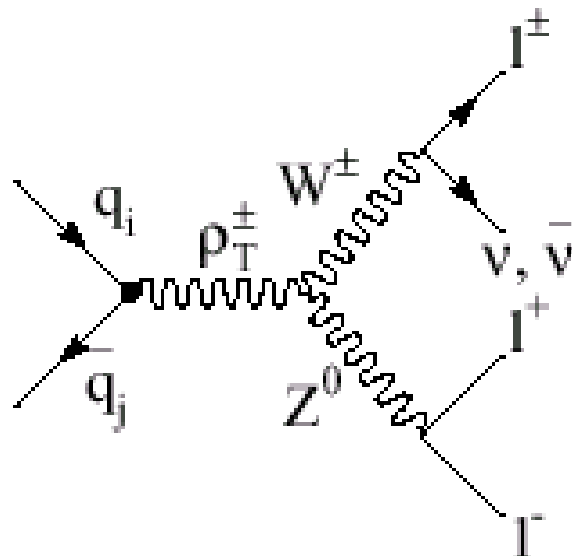
Technicolour

Techni-Pionen spielen Rolle des Higgs-Bosons

Da die Theorie stark wechselwirkend ist, bricht die Störungstheorie zusammen.

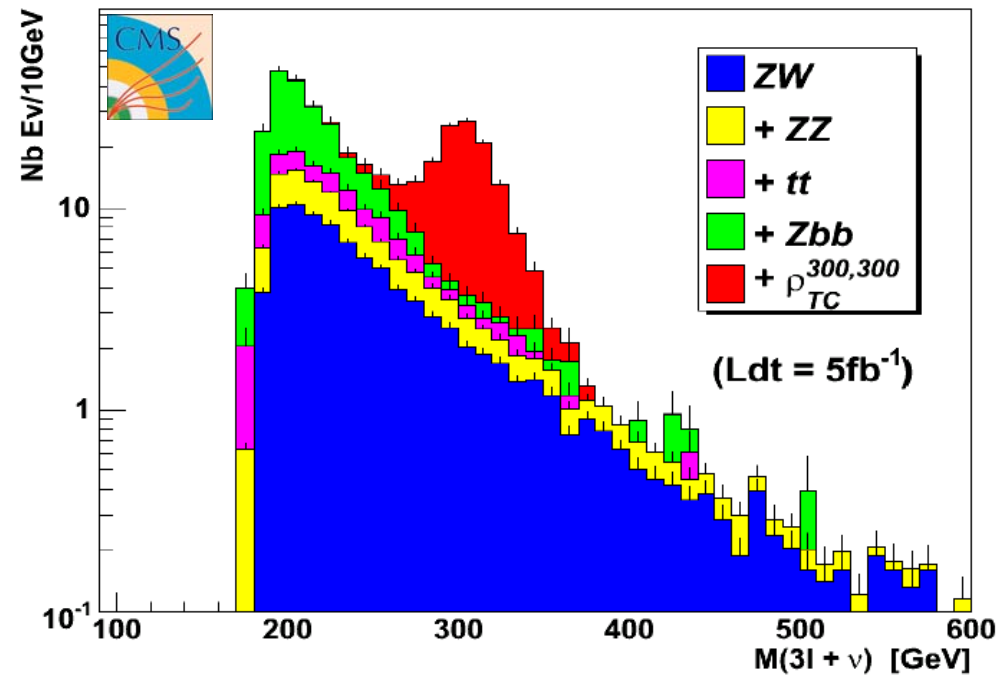
⇒ Rechnungen sind schwierig

Einfache Varianten sind bereits ausgeschlossen.



CMS PTDR 2006

$M(\rho_{TC}) = M(\pi_{TC}) = 300 \text{ GeV}$



5.6.3 Große Extra-Dimensionen

Motivation dieser Klasse von Modellen: String-Theorie

Einführung zusätzlicher kompaktifizierter Raumdimensionen

Anzahl der extra Dimensionen: δ

Raumzeit: $4 + \delta$ dimensional

Raum faktorisiert: $R^4 \times M_\delta$

4-dimensionaler Teil der Metrik hängt nicht von den Koordinaten der extra Dimensionen ab

M_δ ist ein δ -dimensionaler kompakter Raum
hat endliches Volumen V_δ

Erinnerung **kompakt**:
Eine Teilmenge A eines metrischen Raumes X heisst kompakt, wenn es zu jeder offenen Überdeckung $(U_i)_{i \in I}$ von A **endlich viele** Indizes $i_1, \dots, i_k \in I$ gibt, so dass $A \subset U_{i_1} \cup U_{i_2} \cup \dots \cup U_{i_k}$.



Ameisen auf Möbius-Band

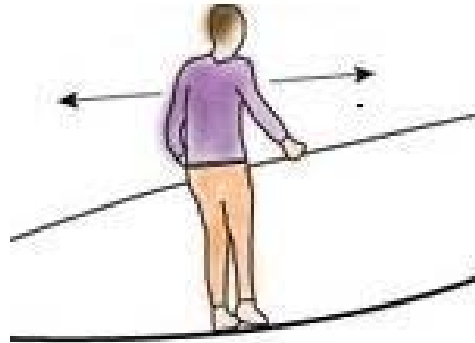
Teilchenpropagation

Beispiel: δ -dimensionaler Torus mit Radius R , $V_\delta = (2\pi R)^\delta$

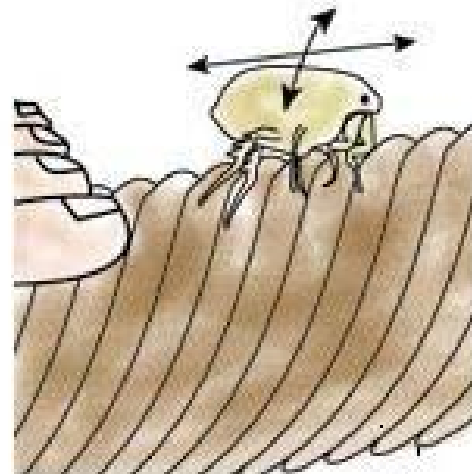
in der String-Theorie meist Annahme: Ausdehnung = Planck-Länge

aber: extra Dimensionen könnten auch größer sein (TeV Skala)

Annahme: nur Gravitonen propagieren durch extra Dimensionen
SM Teilchen sind auf der R^4 lokalisiert



Der Seiltänzer kann sich nur in einer Dimension entlang des Seils bewegen, ...



... aber ein Floh kann sich in zwei Dimensionen bewegen.

Masse in $4 + \delta$ Dimensionen

$$m_0^2 = E^2 - p_1^2 - p_2^2 - p_3^2 \dots - p_{3+\delta}^2$$

Messung der Masse des Teilchens im 4-dimensionalen Raum:

$$m^2 = E^2 - p_1^2 - p_2^2 - p_3^2 = m_0^2 + p_4^2 + \dots - p_{3+\delta}^2$$

In den extra Dimensionen ist der Impuls quantisiert:

$$p = n/R \quad R = \text{Radius der extra Dimension}$$

$$m^2 = m_0^2 + \sum_{i=1, \dots, \delta} \left(\frac{n_i}{R_i} \right)^2$$

Grundzustand mit m_0

**Anregungen: Kaluza-Klein
Zustände**

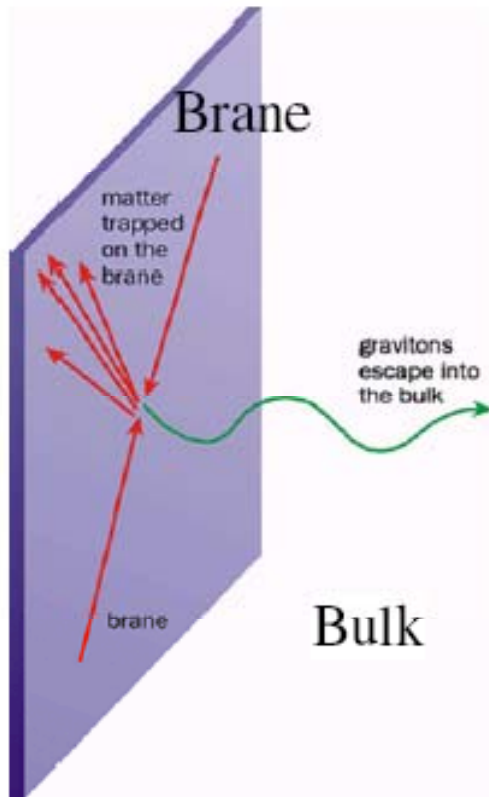
Grenzen auf extra Dimensionen

$d=1$ ist ausgeschlossen durch die Gültigkeit des Newtonschen Gravitationsgesetzes

$d=2$ und $d=3$ sind ausgeschlossen durch kosmologische und astrophysikalische Überlegungen bzw. Messungen

Extra Dimensionen in Hadronkollisionen

Signatur in Teilchenkollisionen: **große fehlende transversale Energie**



Standardmodell-Teilchen bewegen sich im 3D-Raum (Brane).

Das Graviton kann sich auch in den extra Dimensionen bewegen.

⇒ reelle Gravitonen verschwinden in extra Dimensionen

⇒ **fehlende transversale Energie**

Graviton-Spektrum

typische Größe von extra Dimensionen in gängigen Modellen: μm bis fm

⇒ sehr kleine Massenaufspaltung der KK-Zustände

⇒ nahezu kontinuierliches Graviton-Massenspektrum

5.6.4 Little-Higgs-Modelle

zusätzlich postulierte Teilchen:

- ein leichtes Higgs-Boson
- ein Up-Type Quark
kompensiert Divergenzen, die durch Top-Quark-Schleifen entstehen
- schwere Eichbosonen:

$$W_H \rightarrow t\bar{b} \quad Z_H \rightarrow Zh \quad Z_H \rightarrow Zf\bar{f}$$

kompensieren Divergenzen in Eichboson und Higgs-Schleifen

Anders als in Supersymmetrie werden Divergenzen im Fermion- bzw. Bosonsektor durch Teilchen des gleichen Typs kompensiert.

Zum Mitnehmen

Supersymmetrie bietet:

Vereinheitlichung aller Kräfte \Rightarrow mögliche
Erklärung für die Baryonasymmetrie
Higgs Mechanismus um Massen zu erklären
Kandidat für Dunkle Materie
Beseitigung der quadratischen Divergenzen des SM.

Mögliche Signale der Supersymmetrie:
(bisher noch nicht gefunden!)

Direkter Nachweis der SUSY Teilchen am LHC
Indirekter Nachweis der Annihilation der DM
(mit Eigenschaften konsistent mit SUSY)
Direkter Nachweis der WIMPS durch Streuung
(mit Wirkungsquerschnitten vorhergesagt von SUSY)