



Johannes Kepler Vorlesung 2011
Universität Tübingen

Supersymmetrie und die Suche danach am LHC

Herbi Dreiner
11. Mai, 2011

Übersicht

- **Was sind Symmetrien für Physiker?**

Alltag – Teilchenphysik – Supersymmetrie

- **Was ist das besondere an Supersymmetrie?**

Coleman-Mandula – Hierarchie Problem

- **Leptonzahl: Verschiedene Formen der Supersymmetrie**

R-parität: gebrochen oder erhalten?

- **Experimentelle Signaturen am LHC**

Fehlender Transversalimpuls \cancel{p}_T ? Extra ℓ^\pm ?

- **Was wissen wir aus den bisherigen Daten?**

Wie schwer müssen die SUSY Teilchen sein?

Was ist eine Symmetrie?

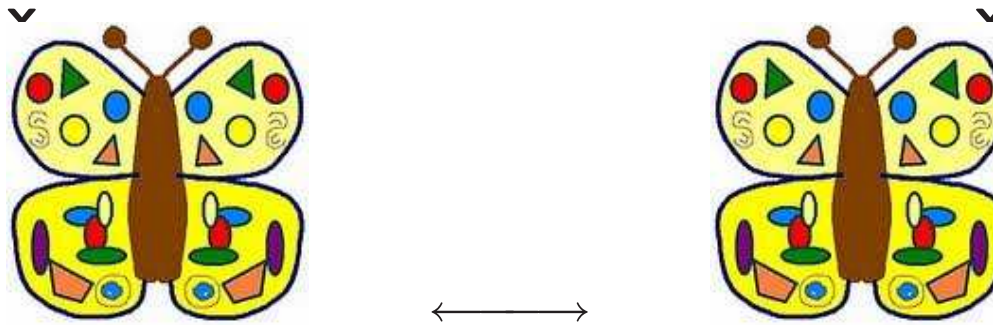
- In der Physik ist dies durch eine Aktion, eine Transformation, definiert
- Einfaches Beispiel: ein Ball



- Aktion: Drehung. Was hat sich geändert? Nichts: Symmetrie.
- Dies ist eine kontinuierliche Symmetrie, Drehwinkel $\theta \in \mathbb{R}$

Andere Symmetrien?

- Spiegel, zwei Bilder, welches ist das original? Diskrete Symmetrie



- Komplizierteres Beispiel: Fußball



- Dies sind diskrete Symmetrien, dazu mehr später

Symmetrien in der Teilchenphysik

- Spez. Relativitäts Theorie: Lorentz–Transformation

$$x^\mu \longrightarrow x'^\mu = \Lambda^\mu{}_\nu x^\nu,$$

- Symmetrie: Lorentzlänge ist invariant: $(x)^2 = g_{\mu\nu} x^\mu x^\nu$
- $(\text{Masse})^2 = p_\mu p^\mu$ und Spin $s_\mu s^\mu = \hbar^2 s(s + 1)$ sind invariant

Teilchenphysik – Feldtheorie

- Was sind Transformationen von Feldern?
- Dirac Gleichung

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m\mathbb{1}_4)\psi(x) = 0, \quad x = (ct, \vec{x})$$

- γ^μ : 4x4 Matrizen, ψ : 4-komponentiger Spinor
- Lagrangedichte Funktion

$$\mathcal{L}(x) = \bar{\psi}(x)(i\gamma^\mu \partial_\mu - m\mathbb{1}_4)\psi(x), \quad \bar{\psi} = \psi^\dagger \gamma^0$$

- Wirkung muß invariant sein

$$S = \int d^4x \mathcal{L}(x)$$

Lorentztransformation für Felder

- Spinorfeld $\psi(x)$ transformiert sich unter Lorentztransformationen

$$\psi'_\alpha(x') = [S(\Lambda)]_\alpha^\beta \psi_\beta(x)$$

- $S(\Lambda)$ ist eine 4x4 Matrix, abhängig von der Lorentztransf: Λ^μ_ν
- Dirac Wirkung ist invariant

Externe Symmetrien

- In der Feldtheorie unterscheidet man **externe** und **interne** Symmetrien
- **Externe Symmetrien:** betreffen die Raumzeitstruktur, also Lorentztransformationen, oder solche, die mit ihnen **NICHT** kommutieren.
- **Interne Symmetrien:** die anderen...am besten Beispiele
 - Eichsymmetrien
 - Leptonflavor, Leptonzahl

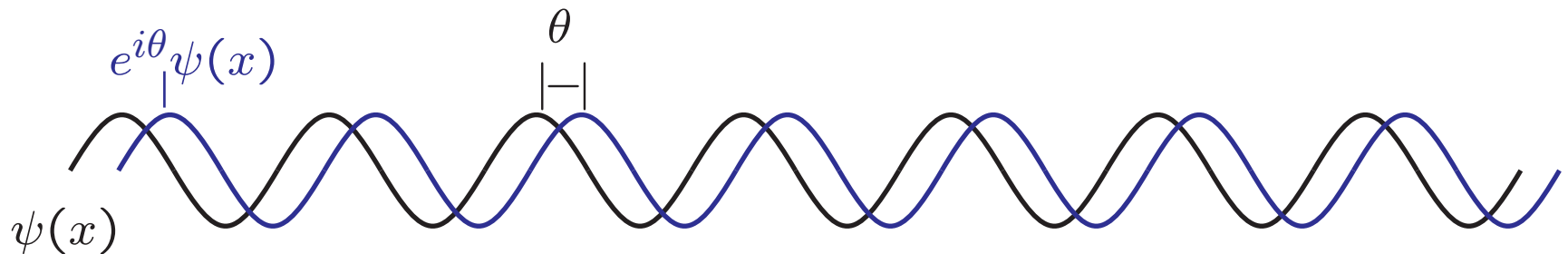
Dirac Theorie

- $\mathcal{L}(x) = \bar{\psi}(x)(i\gamma^\mu\partial_\mu - m\mathbb{1}_4)\psi(x), \quad \bar{\psi} = \psi^\dagger\gamma^0$

- Invariant unter: $\psi(x) \longrightarrow \psi'(x) = e^{i\theta}\psi(x)$

$$\bar{\psi}(x) \longrightarrow \bar{\psi}'(x) = \bar{\psi}(x)e^{-i\theta}$$

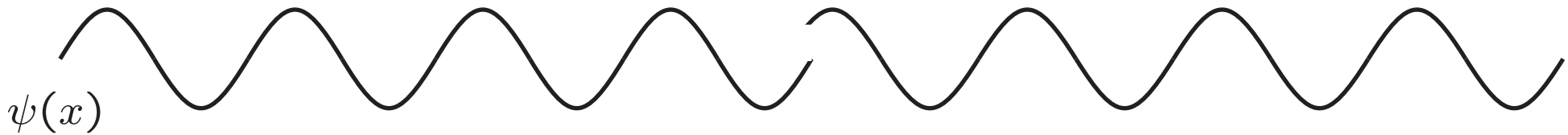
- θ konstant, globale Phasenverschiebung



- **Globale Symmetrie**, θ hängt nicht von x ab.

Eichsymmetrien

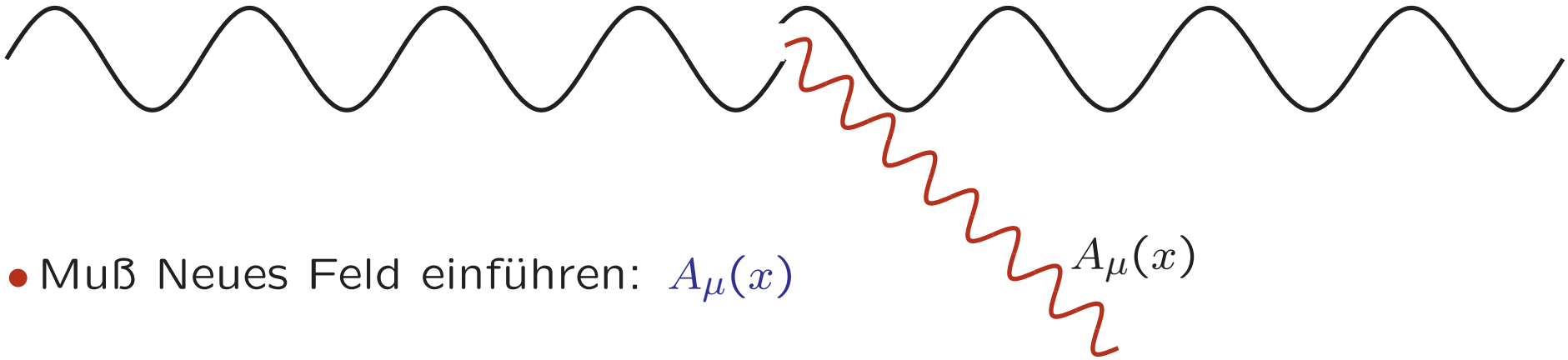
- Lokale Symmetrie $\psi(x) \longrightarrow \psi'(x) = e^{i\theta(x)}\psi(x)$
- $\partial_\mu\psi(x) \longrightarrow \partial_\mu [e^{i\theta(x)}\psi(x)] = e^{i\theta(x)}\partial_\mu\psi(x) + ie^{i\theta(x)}\psi(x) [\partial_\mu\theta(x)]$



- Ist die Lagrange Fkt oder die Wirkung invariant?

Eichsymmetrien

- Lokale Symmetrie $\psi(x) \longrightarrow \psi'(x) = e^{i\theta(x)}\psi(x)$
- $\partial_\mu\psi(x) \longrightarrow \partial_\mu [e^{i\theta(x)}\psi(x)] = e^{i\theta(x)}\partial_\mu\psi(x) + ie^{i\theta(x)}\psi(x) [\partial_\mu\theta(x)]$

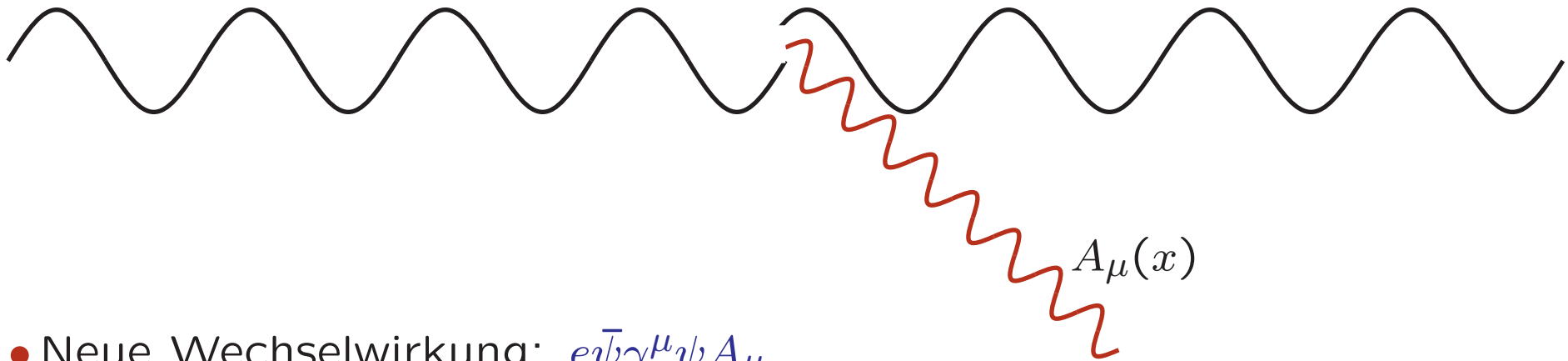


- Muß Neues Feld einführen: $A_\mu(x)$

Eichsymmetrien

- Lokale Symmetrie $\psi(x) \longrightarrow \psi'(x) = e^{i\theta(x)}\psi(x)$

- $\partial_\mu\psi(x) \longrightarrow \partial_\mu [e^{i\theta(x)}\psi(x)] = e^{i\theta(x)}\partial_\mu\psi(x) + ie^{i\theta(x)}\psi(x) [\partial_\mu\theta(x)]$



- Neue Wechselwirkung: $e\bar{\psi}\gamma^\mu\psi A_\mu$

- $\mathcal{L}(x) = \bar{\psi}(x)[i\gamma^\mu D_\mu - m\mathbb{1}_4]\psi(x) - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$

- $D_\mu \equiv \partial_\mu - ieA_\mu$

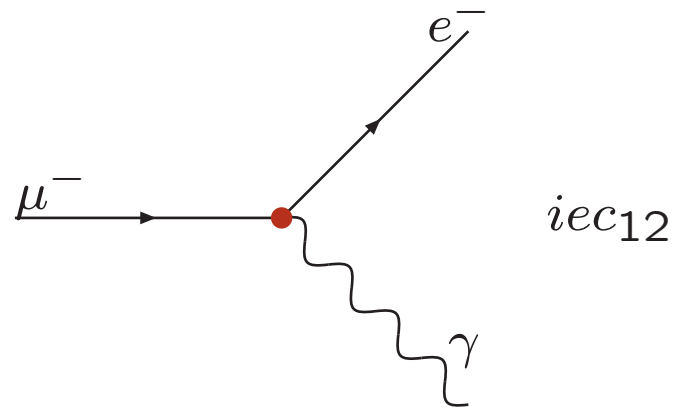
- $A_\mu \longrightarrow A_\mu + \frac{1}{e}\partial_\mu\theta$

QED Lagrangenfunktion: e und μ

- Elektron und Myon haben die gleiche elektrische Ladung
- Eichtransformation ist gleich: $\psi_{e,\mu}(x) \rightarrow e^{i\theta(x)}\psi_{e,\mu}(x)$

$$\mathcal{L}_{e,\mu} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \sum_{i,j=e,\mu} [c_{ij}\bar{\psi}_i(i\partial_\mu + eA_\mu)\gamma^\mu\psi_j + m_{ij}\bar{\psi}_i\psi_j]$$

- Neuer Vertex:



- (• Inverse Breite: $\frac{1}{\Gamma} = |c_{12}|^{-2} 10^{-22} \text{ sec} \ll \tau_\mu$)

Lepton Flavor in QED II

- Lineare Algebra: c_{ij} und m_{ij} sind **immer** simultan diagonalisierbar.

$$\mathcal{L}_{e,\mu} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \sum_{i=e,\mu} \left[\bar{\psi}_i (i\partial_\mu + eA_\mu) \gamma^\mu \psi_i + m_i \bar{\psi}_i \psi_i \right]$$

- Elektronzahl, L_e , und Myonzahl, L_μ , sind separat erhalten.
- Globale Symmetrie: $\psi \longrightarrow \psi' = e^{i\theta L_e} \psi, e^{i\theta L_\mu} \psi$

- Und im Standard Modell?

Standard Modell der Teilchenphysik

LEPTONEN: $\underbrace{\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}}_L, e_R, \quad ; \quad \underbrace{\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}}_L, \mu_R, \quad \underbrace{\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}}_L, \tau_R$
 $\equiv \ell_1 \qquad \qquad \qquad \equiv \ell_2 \qquad \qquad \qquad \equiv \ell_3$

QUARKS: $\underbrace{\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}}_L, u_R, d_R \quad ; \quad \underbrace{\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}}_L, c_R, s_R \quad \underbrace{\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}}_L, t_R, b_R$
 $\equiv q_1 \qquad \qquad \qquad \equiv q_2 \qquad \qquad \qquad \equiv q_3$

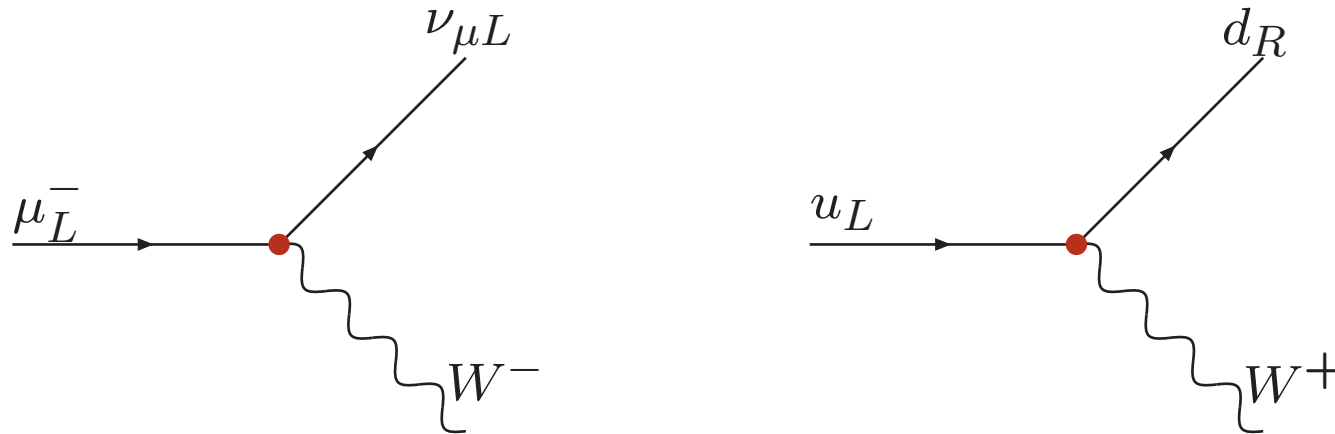
Symmetrie Gruppe: Lorentz \otimes SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y

(8 Gluonen, W^\pm , Z^0 , γ)

Higgs Boson: $H = \begin{pmatrix} h^+ \\ h^0 \end{pmatrix}$

Leptonzahl im SM

- Alle Eichwechselwirkungen im SM erhalten die Leptonzahl



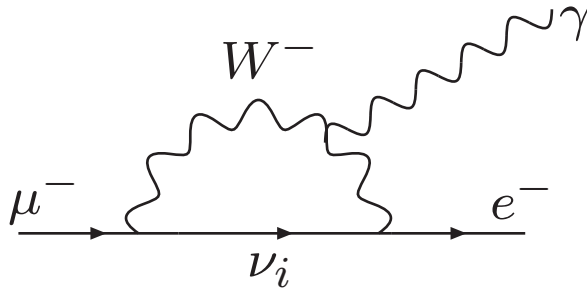
- Die Higgs Yukawa Kopplungen auch:

$$\mathcal{L}_{\text{Yuk}} = (h_e)_{ij} \bar{\ell}_i H e_{Rj} + (h_d)_{ij} \bar{q}_i H d_{Rj} + (h_u)_{ij} \bar{q}_i H u_{Rj} + h.c.$$

- Aber jetzt nicht mehr beide gleichzeitig diagonalisierbar.
- Bei den Quarks, zB $b \rightarrow s + \gamma$
- Quarkflavor ist verletzt

Leptonflavor im SM

- Jetzt erhalten wir auch $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$



- Allerdings

$$Br(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_i U_{\mu i}^* U_{ei} \frac{\Delta m_{\nu_i}^2}{M_W^2} \right|^2 < 10^{-54}$$

- Beste exp. Schranke: $Br(\mu \rightarrow e\gamma) < 1.2 \cdot 10^{-11}$
- Neues Experiment am PSI, MEG: $Br(\mu \rightarrow e\gamma) < 10^{-13}$
- Mu2E Experiment am Fermilab
- SUSY Beiträge sind typischerweise sehr groß!

Supersymmetrie

- **Idee:** erweitere Symmetrie–transformationen des SMs

$$|\text{FERMION}\rangle \xleftrightarrow{Q} |\text{BOSON}\rangle$$

- Externe Symmetrie, weil man den Drehimpuls ändert!

$$Q|F\rangle = |B\rangle, \quad Q^\dagger|B\rangle = |F\rangle$$

- **Infinitesimale Feld–transformationen:**

$$\text{Skalar: } \phi(x) \longrightarrow \phi'(x) = \phi(x) + \Delta\phi; \quad \Delta\phi = \epsilon \cdot \psi(x)$$

$$\text{Fermion: } \psi(x) \longrightarrow \psi'(x) = \psi(x) + \Delta\psi; \quad \Delta\psi = \epsilon \cdot \phi(x)$$

- Die Quantenfelder: $\phi(x)$, $\psi(x)$ bilden ein Paar, ein Supermultiplet
- ϵ ist ein konstanter Spinor in globaler Supersymmetrie

SUSY Spektrum

Standard Model + SUSY \implies Verdoppelung (+2. Higgs Doublet)

e^- (spin = $\frac{1}{2}$)	\longleftrightarrow	\tilde{e} ($s = 0$)	skalares electron
top t ($s = \frac{1}{2}$)	\longleftrightarrow	\tilde{t} ($s = 0$)	skalares top
H^\pm ($s = 0$)	\longleftrightarrow	\tilde{H}^\pm ($s = \frac{1}{2}$)	Higgsino
H^0, h^0 ($s = 0$)	\longleftrightarrow	\tilde{H}^0, \tilde{h}^0 ($s = \frac{1}{2}$)	Higgsino
W^\pm ($s = 1$)	\longleftrightarrow	\tilde{W}^\pm ($s = \frac{1}{2}$)	Wino
B, W^0 ($s = 1$)	\longleftrightarrow	\tilde{B}, \tilde{W}^0 ($s = \frac{1}{2}$)	Bino, neutrales Wino
$g_{a=1,\dots,8}$ ($s = 1$)	\longleftrightarrow	\tilde{g}_a ($s = \frac{1}{2}$)	Gluino

- Mehr als eine Verdoppelung des Spektrums

Supersymmetrie

- Symmetrie legt fest:
 - welche neuen Teilchen
 - ihre Kopplungen
 - und ihre Massen (= SM Partner)
- SUSY muß gebrochen sein, weil noch nichts gefunden
- \implies viele neue Parameter, zB die ganzen Massen

Masse(\tilde{e}), Masse(\tilde{q}), Masse(\tilde{g})

Motivation

- Bisher keine experimentelle Evidenz, also warum der Aufwand?

A Priori:

1. Maximale externe Symmetrien in der Natur: Coleman–Mandula
2. Lösung des Hierarchie–Problems: $M_W \longleftrightarrow M_{\text{Planck}}$

A Posteriori:

1. Vereinheitlichung der Eichkopplungen bei $M_X = \mathcal{O}(10^{16} \text{ GeV})$
2. Dunkle Materie (R-parität) / Neutrino masses (Baryon Triality)

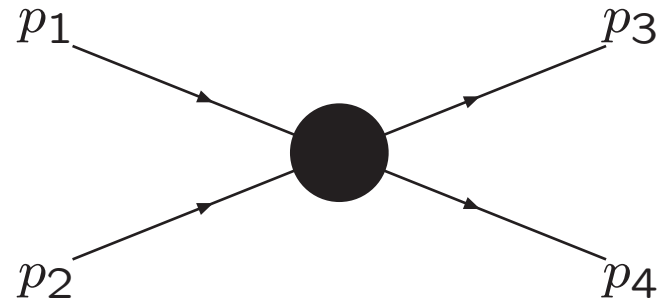
Coleman Mandula Theorem

- Theorem: Lorentz–Symmetrie stellt die maximale externe Symmetrie in der Natur da.
- Wenn ich noch mehr Symmetrien hinzufüge, dann ist die Theorie so eingeschränkt, dass nur der triviale Fall möglich ist

\Rightarrow **Keine Streuung**

Heuristisches Argument

- Betrachte $2 \rightarrow 2$ spin=0 Streuung



- Impulserhaltung (Lorentz symmetry): $p_1 + p_2 = p_3 + p_4$
- Streuamplitude \mathcal{M} ist ein Lorentz-Skalar

\implies hängt nur von Lorentz-Invarianten der p_i ab

- Nur zwei unabhängig:

$$s = (p_1 + p_2)^2 = E_{\text{cm}}^2$$

$$t = (p_1 - p_3)^2 = -\frac{s}{2}(1 - \cos \theta)$$

- Postuliere jetzt eine zusätzliche **externe** Symmetrie/Erhaltungsgröße

$$R_{\mu\nu} = p_\mu p_\nu - \frac{1}{4} g_{\mu\nu} m^2$$

- Für festes $E_{\text{cm}}(\sqrt{s})$ zusätzliche Einschränkungen an θ
- Nur diskrete Winkel erlaubt, in diesem Fall $\theta = 0$
- \mathcal{M} is analytisch

$$\implies \mathcal{M}(\theta) = 0 \text{ überall}$$

- Die Theorie ist trivial: keine Streuung!

Supersymmetrie

- Coleman–Mandula hat implizit angenommen, dass die Symmetrie bosonisch ist
- In der Supersymmetrie wird die Transformation der Felder durch Q_α generiert
- Q_α ist ein Spinor ($\phi \longrightarrow \psi$)
- Coleman–Mandula Theorem ist nicht relevant
- Ich kann die externen Symmetrien um die Supersymmetrie erweitern!
- Haag–Lopuszanski–Sohnius:

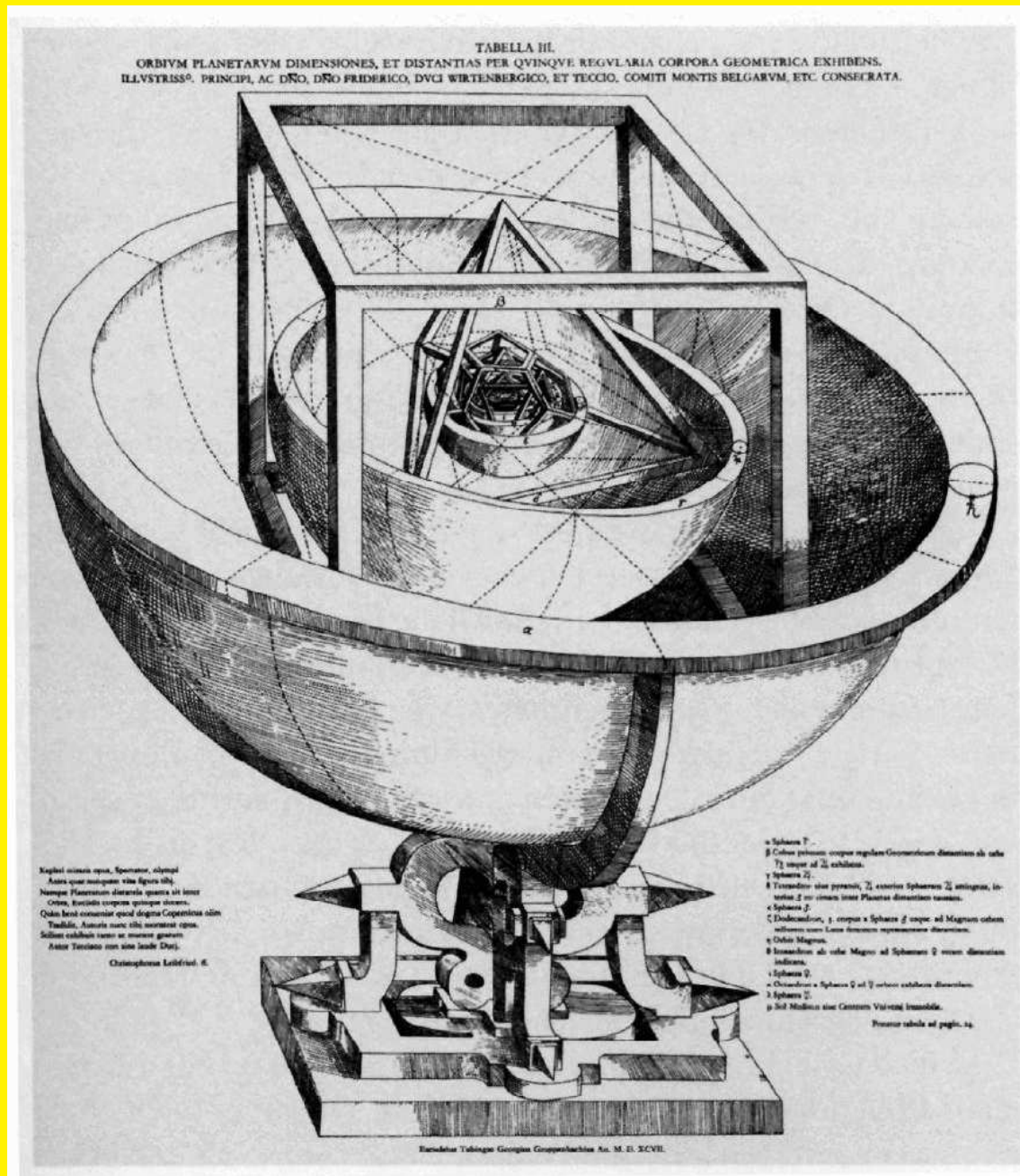
(Lorentz + Supersymmetrie) ist die maximale externe Symmetrie mit nicht-trivialer S -matrix

- Ästhetisches Argument

Was sagt Kepler?



Platonische Körper – Planetenradien



Was? Falsch??



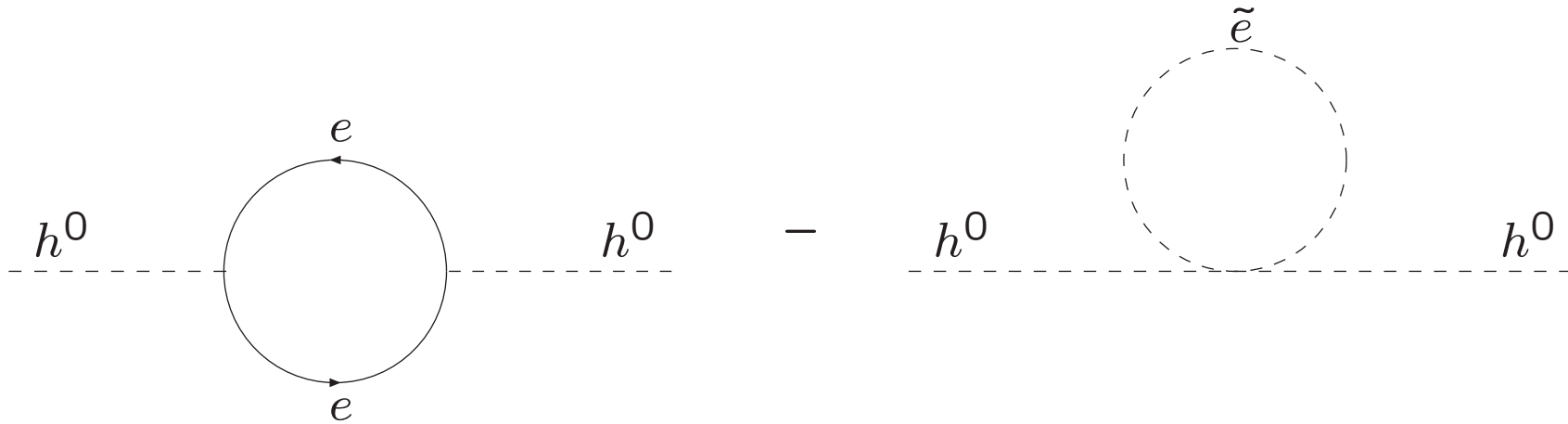
**Dann ist SUSY
auch falsch!**

SUSY Experimentell Überprüfen

- SUSY Teilchen versuchen zu produzieren und nachzuweisen
- Aber, was ist die SUSY Massenskala? – Hierarchie–Problem
- Im Higgssektor ist die Massendiskrepanz $M_W \longleftrightarrow M_{Pl}$ nicht stabil
 - Masse(Photon)= 0, wegen $U(1)$ Eichsymmetrie
 - Masse(Elektron) $\ll M_W$, wegen $SU(2)_L$ Eichsymmetrie
 - Masse(Higgs) ungeschützt im SM
 - Aber SM inkonsistent falls Masse(Higgs) > 1 TeV

Strahlungskorrekturen

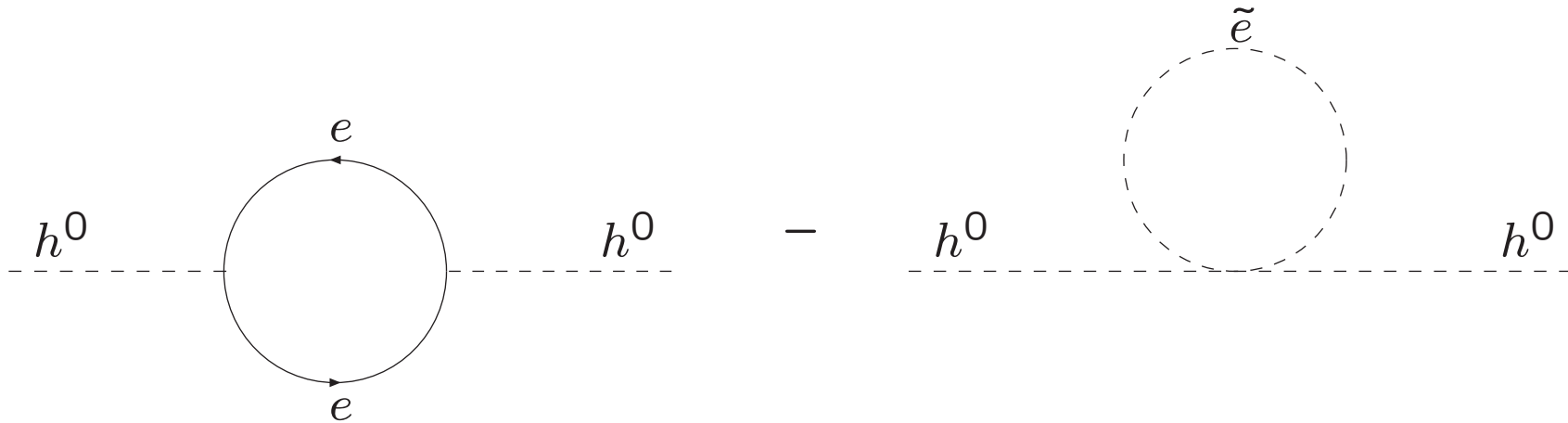
- Masse(Higgs)=max(Masse), $M_{Pl} = 10^{19}$ GeV



$\sim \Lambda^2$; Λ : max Energie in der Theorie

Strahlungskorrekturen

- Masse(Higgs)=max(Masse), $M_{Pl} = 10^{19}$ GeV



$\sim \Lambda^2$; Λ : max Energie in der Theorie

- Heben sich genau weg, im supersymmetrischen Fall
- SUSY gebrochen \implies Masse(\tilde{e}) $\lesssim 1$ TeV
- Analog für die squarks: $\tilde{q} \lesssim 1$ TeV

SUSY Lagrange-Fkt, Superfelder

- Verbinde Elektron ψ_e und selectron $\phi_{\tilde{e}}$ zu einem Superfeld

$$\Phi_e \sim \phi_{\tilde{e}_L} + \epsilon\psi_{e_L} = E_L,$$

- Ähnlich für die anderen Felder

$$L = \begin{pmatrix} N \\ E \end{pmatrix}_L, \quad Q = \begin{pmatrix} U \\ D \end{pmatrix}_L, \quad \bar{E}, \quad \bar{U}, \quad \bar{D}$$

- Plus Higgs superfields: H_1, H_2
- Allgemeinste Wechselwirkung \longrightarrow

SUSY Yukawa Wechselwirkungen

- $W_{\text{Yuk}} = W_1 + W_2$

$$W_1 = (h_e)_{ij} L_i H_1 E_j^c + (h_d)_{ij} Q_i H_1 D_j^c + (h_u)_{ij} Q_i H_2 U_j^c + \mu H_1 H_2$$

- Wie im SM. Aber nicht vollständig

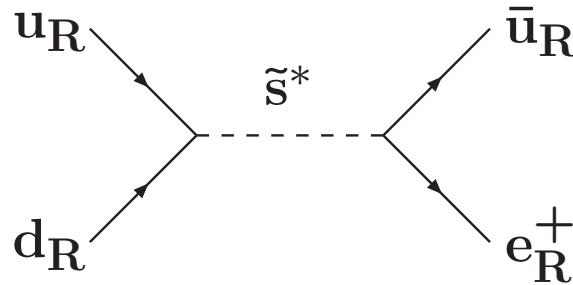
$$W_2 = \underbrace{\lambda_{ijk} L_i L_j \bar{E}_k + \lambda'_{ijk} L_i Q_j \bar{D}_k + \kappa_i L_i H_2}_{\text{Leptonzahl verletzend}} + \underbrace{\lambda''_{ijk} \bar{U}_i \bar{D}_j \bar{D}_k}_{\text{Baryonzahl verletzend}}$$

Leptonzahl verletzend

Baryonzahl verletzend

- Zusammen führen sie zu raschem Protonzerfall

Protonzerfall: $p \rightarrow \pi^0 + e^+$



$$\lambda'_{i1j} \cdot \lambda''_{11j} < 2 \cdot 10^{-27} \left(\frac{M_{\tilde{d}_j}}{100 \text{ GeV}} \right)^2, \quad i = 1, 2, j \neq 1,$$

- λ oder $\lambda'' = 0$
- Brauche zusätzliche Symmetrie um Proton zu schützen

Diskrete Symmetrien

- Nur zwei Möglichkeiten theoretisch konsistent
- **Materie Parität (\mathbf{R}_p):** verbietet $LL\bar{E}$, $LQ\bar{D}$, LH_2 , $QQQL$ Terme

$$(Q, \bar{U}, \bar{D}, L, \bar{E}) \longrightarrow -(Q, \bar{U}, \bar{D}, L, \bar{E})$$

$$(H_1, H_2) \longrightarrow +(H - 1, H_2)$$

- **Baryon Trialität (\mathbf{B}_3):** verbietet $\bar{U}\bar{D}\bar{D}$, $QQQL$ Terms

$$\Phi_j \longrightarrow e^{i\alpha_j 2\pi/3} \Phi_j$$

	Q	U^c	D^c	L	E^c	H_d	H_u
α_j	0	2	1	2	2	2	1

- Sehr unterschiedliche Konsequenzen bei der Suche am LHC

Materie Parität = R-Parität

- Äquivalent: Invarianz unter multiplikative diskrete Symmetrie R_p

$$R_p = (-1)^{2S+L+3B}$$

- Angewandt auf die Komponentenfelder, nicht die Superfelder
- Alle SM Teilchen haben $R_p = +1$;

$$R_p(e) = (-1)^{1+1+0} e = +1 \cdot e$$

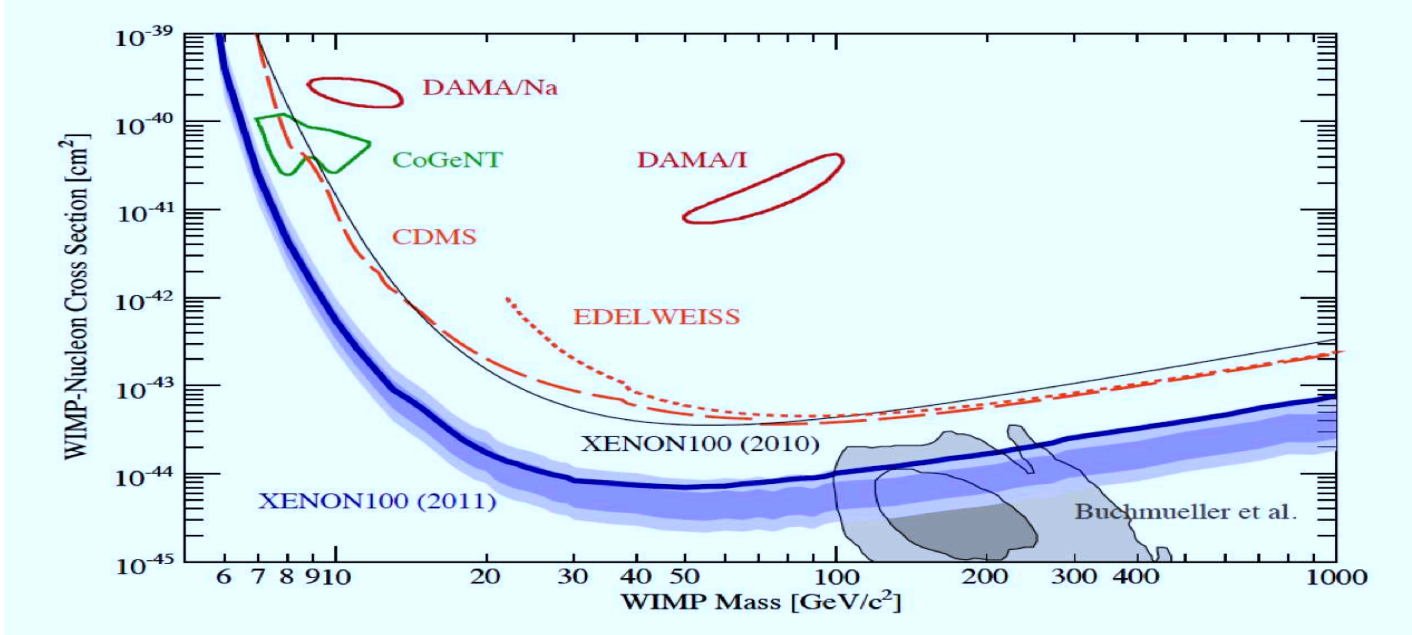
- \Rightarrow LHC Anfangszustand hat $R_P = +1$!
- Alle SUSY Teilchen haben: $R_p = -1$

$$R_p(\tilde{e}) = (-1)^{0+1+0} e = -1 \cdot e$$

Experimentelle Konsequenzen

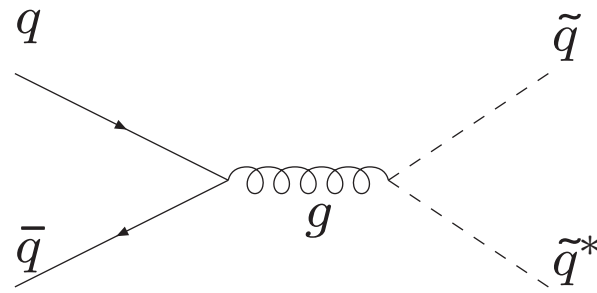
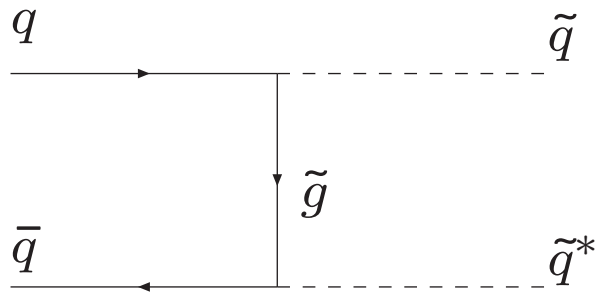
- Leichtestes SUSY Teilchen (LSP): muss stabil sein
- LSP = dunkle Materie Kandidat
 - Beobachtung: muss elektrisch- und farb-neutral sein
 - Leichtestes Neutralino, χ_1^0 , Mischung aus $\tilde{\gamma}$, \tilde{Z}^0 , \tilde{h}_1^0 , \tilde{h}_2^0
 - Kann man direkt nach schauen, oder indirekt
 - Bisher noch nichts beobachtet, große Bereiche des SUSY Parameterraums ausgeschlossen
- R-parität erhalten: muss SUSY Teilchen paarweise erzeugen

$$R_p(\tilde{q}\tilde{q}) = (-1)^2\tilde{q}\tilde{q} = (+1)\tilde{q}\tilde{q}$$

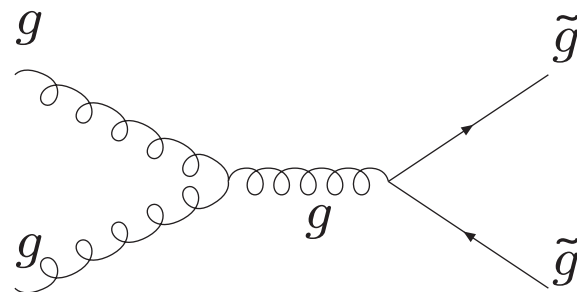
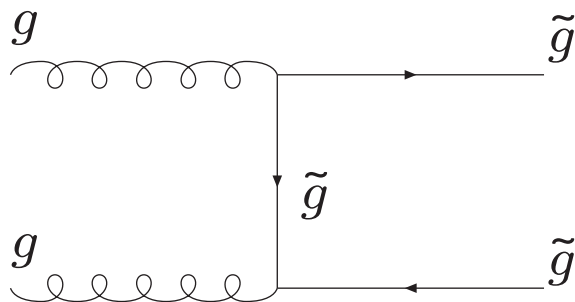


SUSY Paar-Produktion

- SUSY Teilchen notwendigerweise paarweise produziert
- Squark Paarproduktion

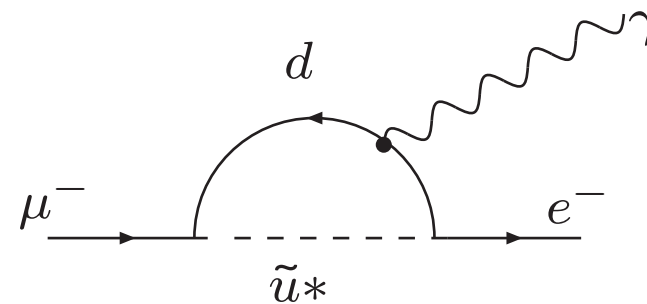
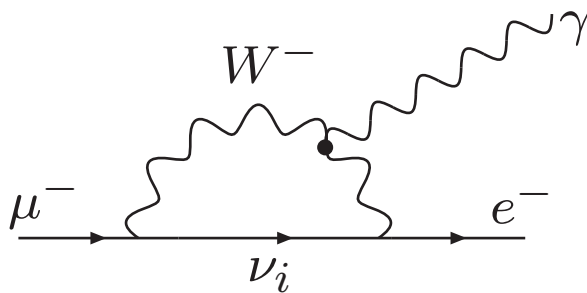


- Gluino Paarproduktion



Baryon-Trialität – R_p -Verletzung

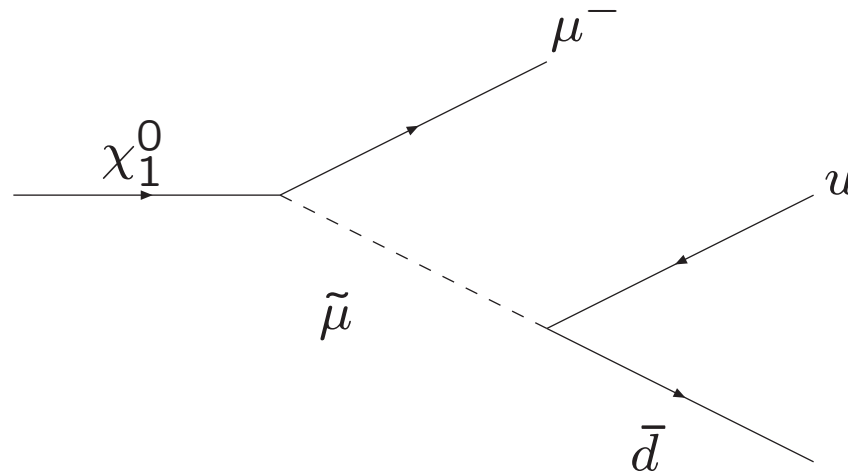
- Leptonzahl verletzt, neue Beiträge z_B zu $\mu \rightarrow e\gamma$



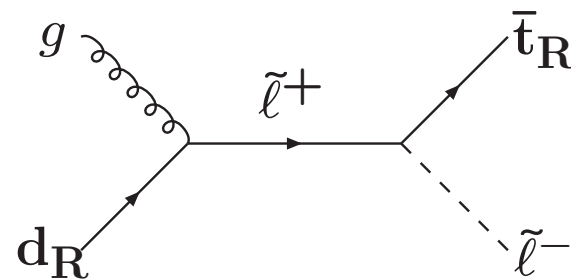
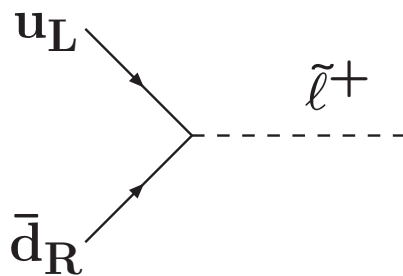
- Erhalte direkt leichte Majorana-Neutrinomassen ohne See-Saw und zusätzlicher schwerer Massenskala

Baryon-Trialität – R_p -Verletzung

- LSP Zerfällt; Lebensdauer kann sehr kurz bis sehr lang sein



- Brauche anderen dunkle Materie-Kandidat, zB Axion oder Axino
- Resonante oder Assoziierte Einzelproduktion

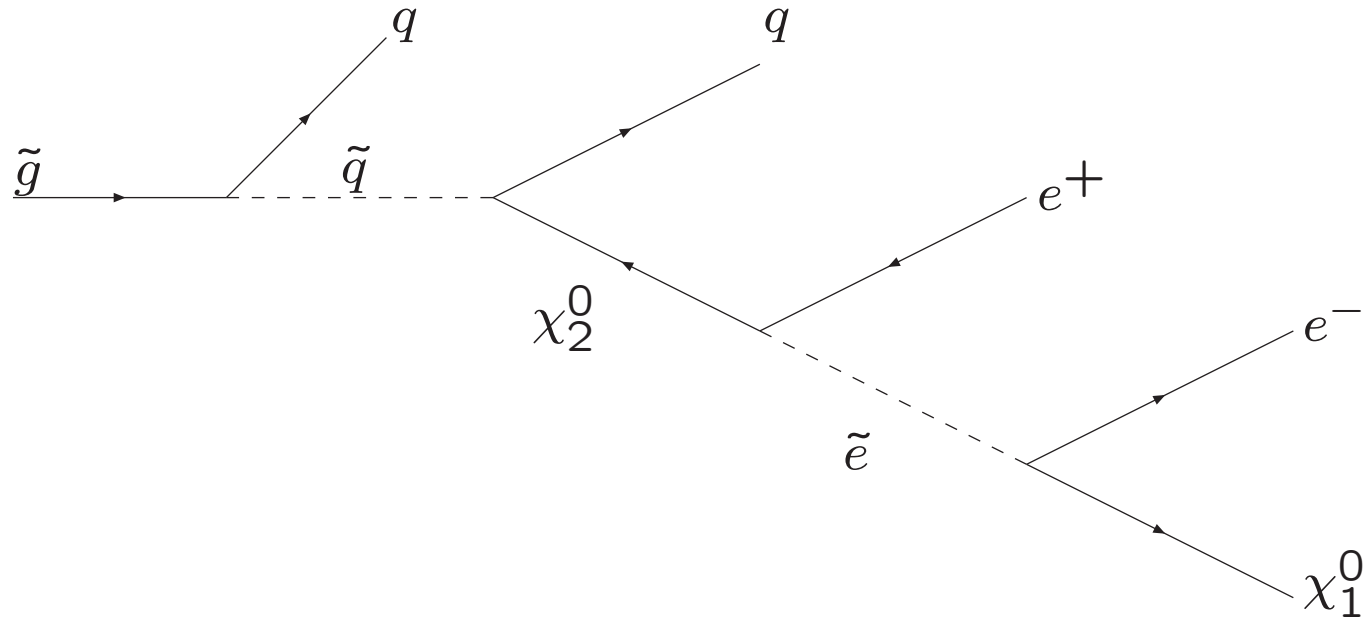


SUSY Signaturen am LHC

- Typischerweise ein breites SUSY–Massenspektrum
- Gluinos und Squarks am schwersten
- Kopplungen durch SM & SUSY festgelegt
 - ⇒ Teilchen zerfallen instantan im Detektor
- Am LHC Gluino und Squark produktion dominant (falls sie existieren), wegen der starken Kopplung α_s , und der Protonen im Anfangszustand
- Kaskadenzerfall durch leichteren SUSY Teilchen

SUSY Signaturen am LHC

- Kaskadenzerfall



- Signaturen: • **Fehlender Transversalimpuls:** χ_1^0
 - plus 2 – 4 jets, 0 – 4 geladene leptonen
 - plus extra Leptonen und jets im B_3 Fall
- Beschränke mich jetzt auf den R_p -erhaltenen Fall

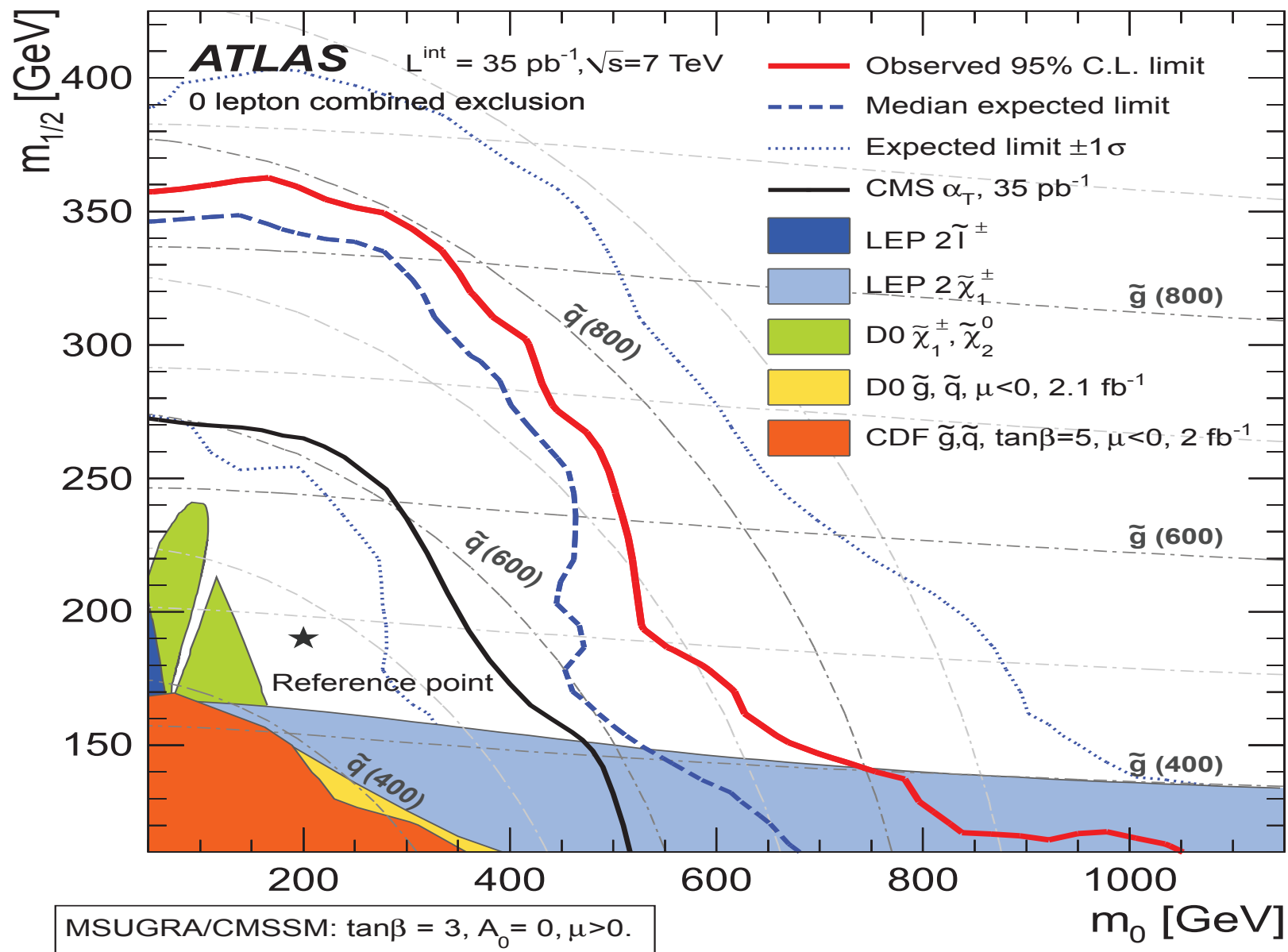


Figure 3: 95% C.L. exclusion limits in the $\tan\beta = 3, A_0 = 0$ and $\mu > 0$ slice of MSUGRA/CMSSM, together with existing limits [3, 4] with the different model assumptions given in the legend.

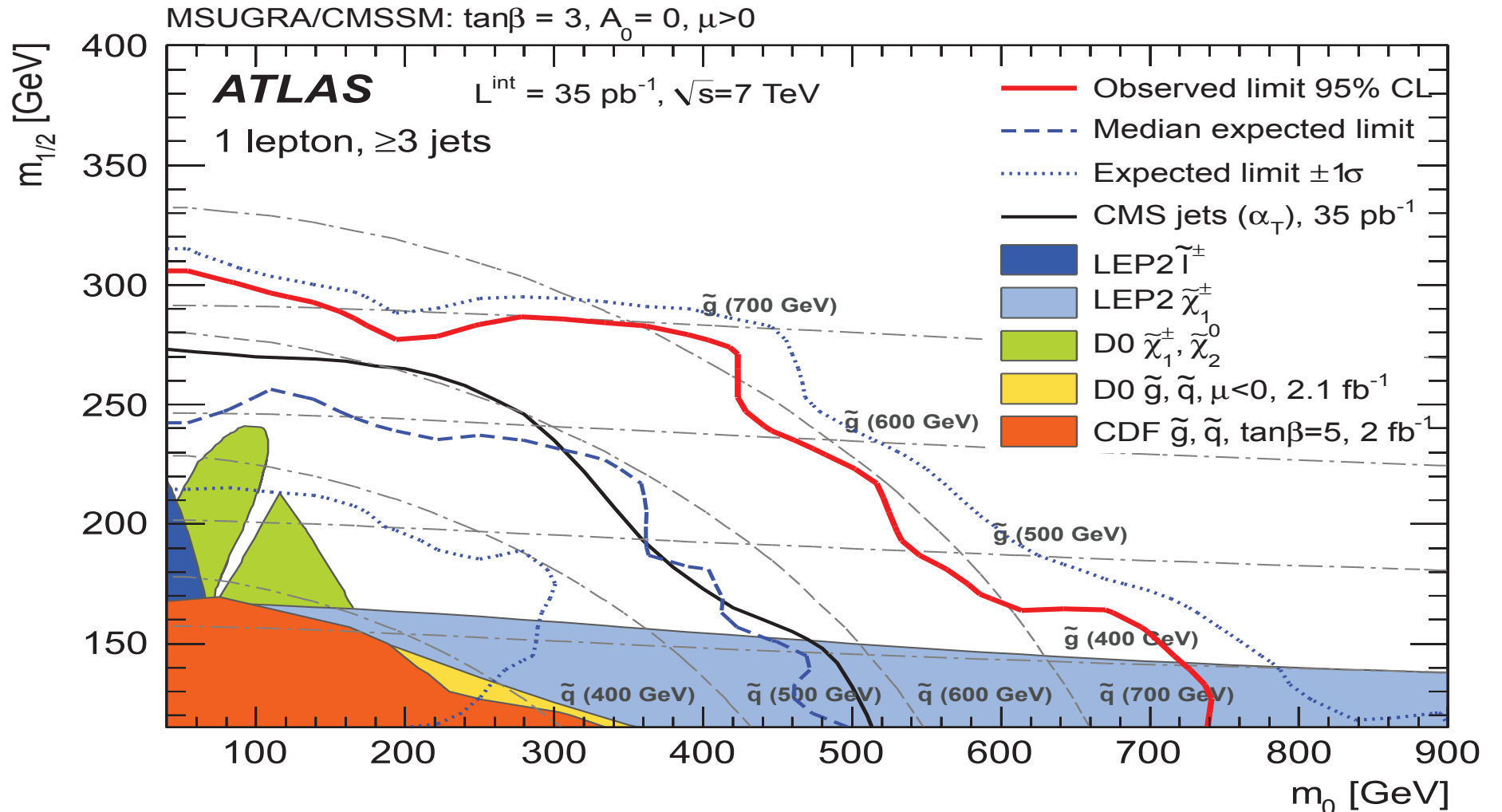
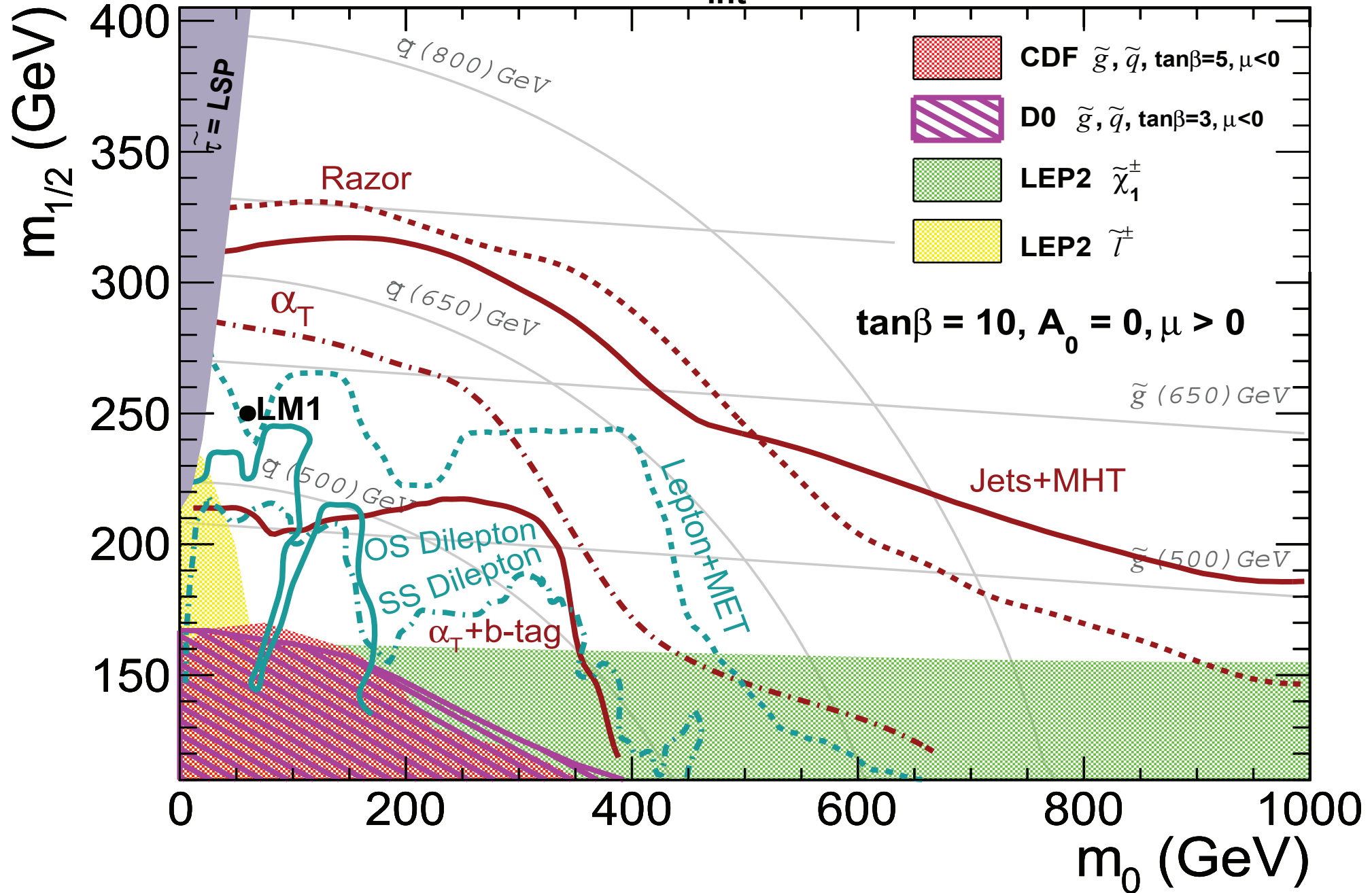


FIG. 2: Observed and expected 95% CL exclusion limits, as well as the $\pm 1\sigma$ variation on the expected limit, in the combined electron and muon channels. Also shown are the published limits from CMS [3], CDF [4], and D0 [5, 6], and the results from the LEP experiments [29].

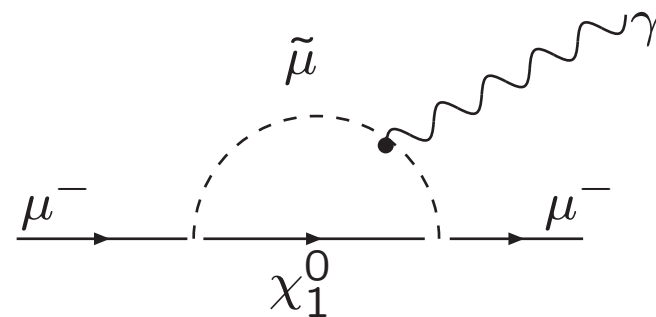
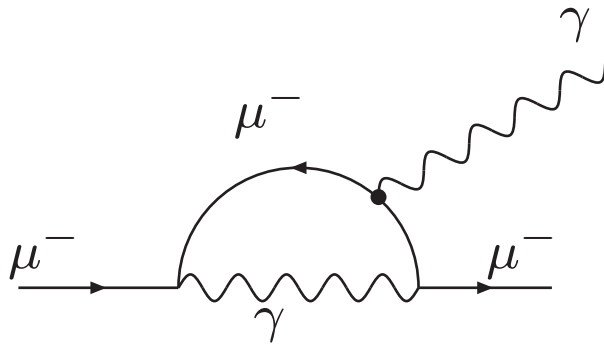
CMS preliminary $L_{\text{int}} = 36 \text{ pb}^{-1}, \sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$



“die Frage”

Ph. Bechtle, K. Desch, HD, M. Krämer, Bj. Sarrazin, P. Wienemann

- Was wussten wir vor dem LHC über SUSY?
- Was ist der “Best-Fit” an alle “Niederenergie-Observablen?”
- zB $(g - 2)_\mu$



- Und auch dunkle Materie mit χ_1^0

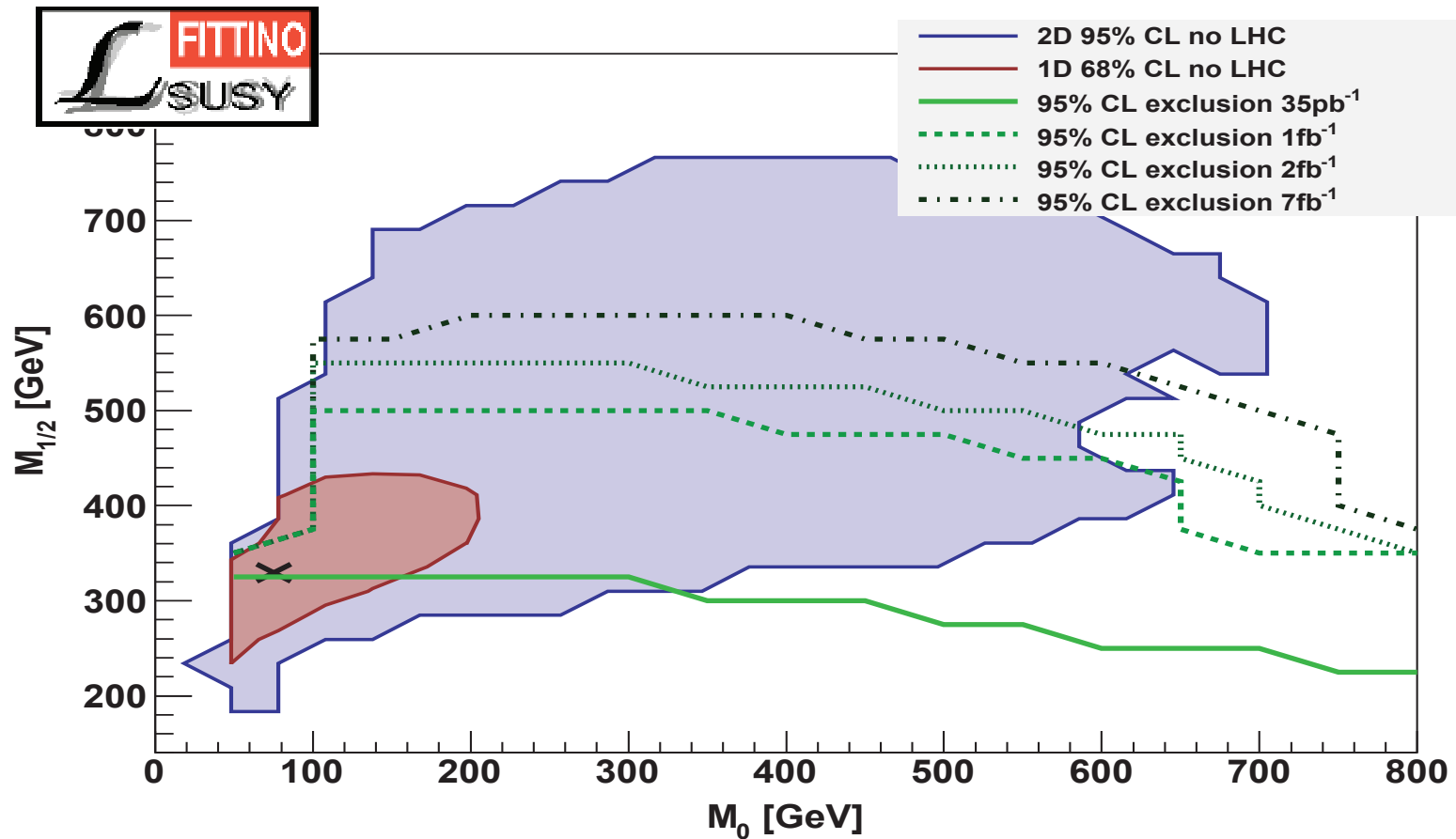


FIG. 1: mSUGRA parameter region in M_0 and $M_{1/2}$ compatible with low-energy observables, current collider data from LEP, SLC and the Tevatron, and the dark matter relic density. Shown are the two-dimensional 95% and one-dimensional 68% CL regions. Also shown is our estimate of the potential LHC 95% CL exclusion limits in the four-jet, zero-lepton and E_T^{miss} channel for different integrated luminosities.

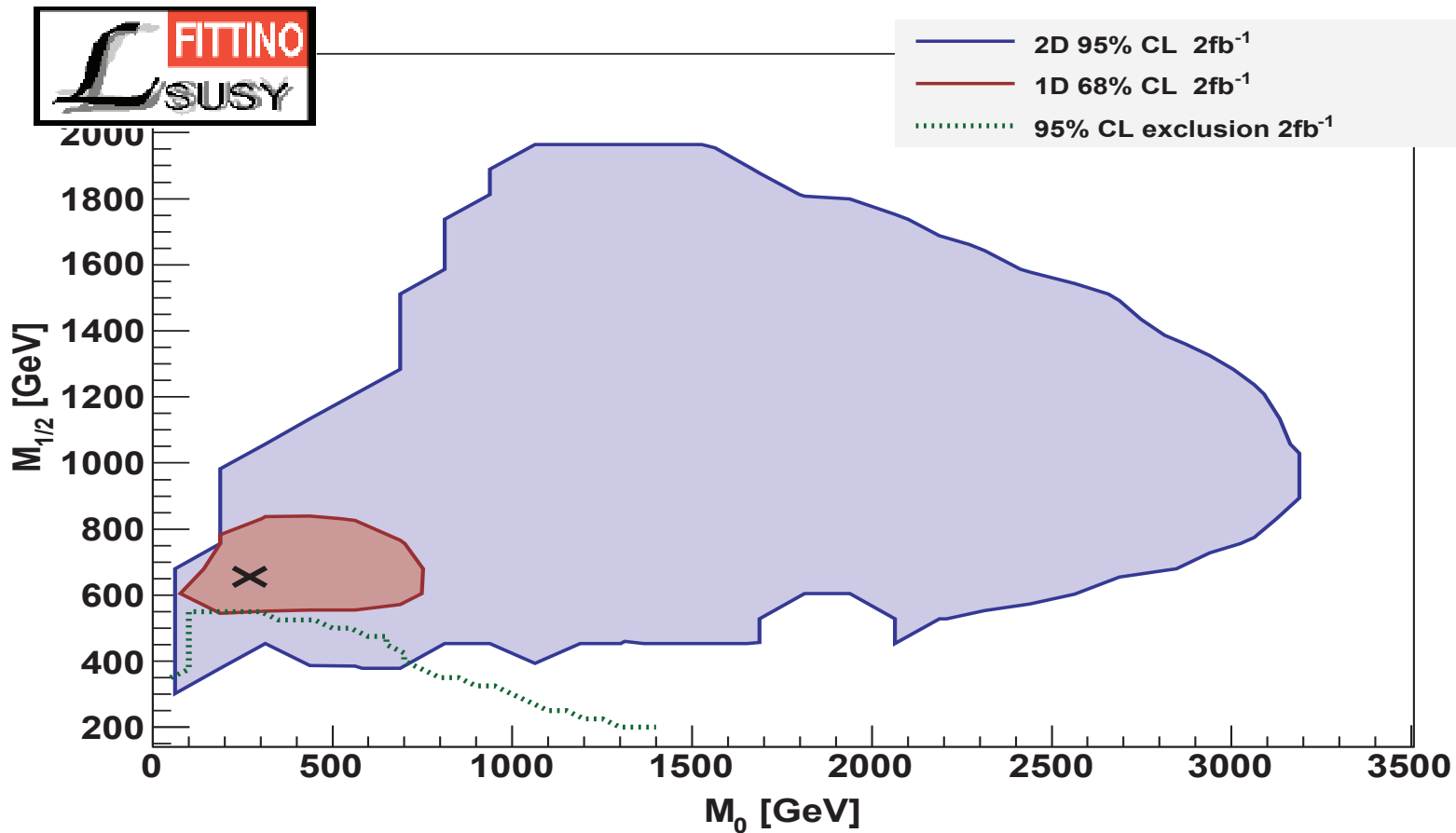


FIG. 2: mSUGRA parameter region in M_0 and $M_{1/2}$ compatible with low-energy observables, current collider data from LEP, SLC and the Tevatron, the dark matter relic density, and a potential LHC exclusion limit in the four-jet, zero-lepton and E_T^{miss} channel for 2fb^{-1} integrated luminosity. Also shown is the the potential LHC 95% CL exclusion limit.

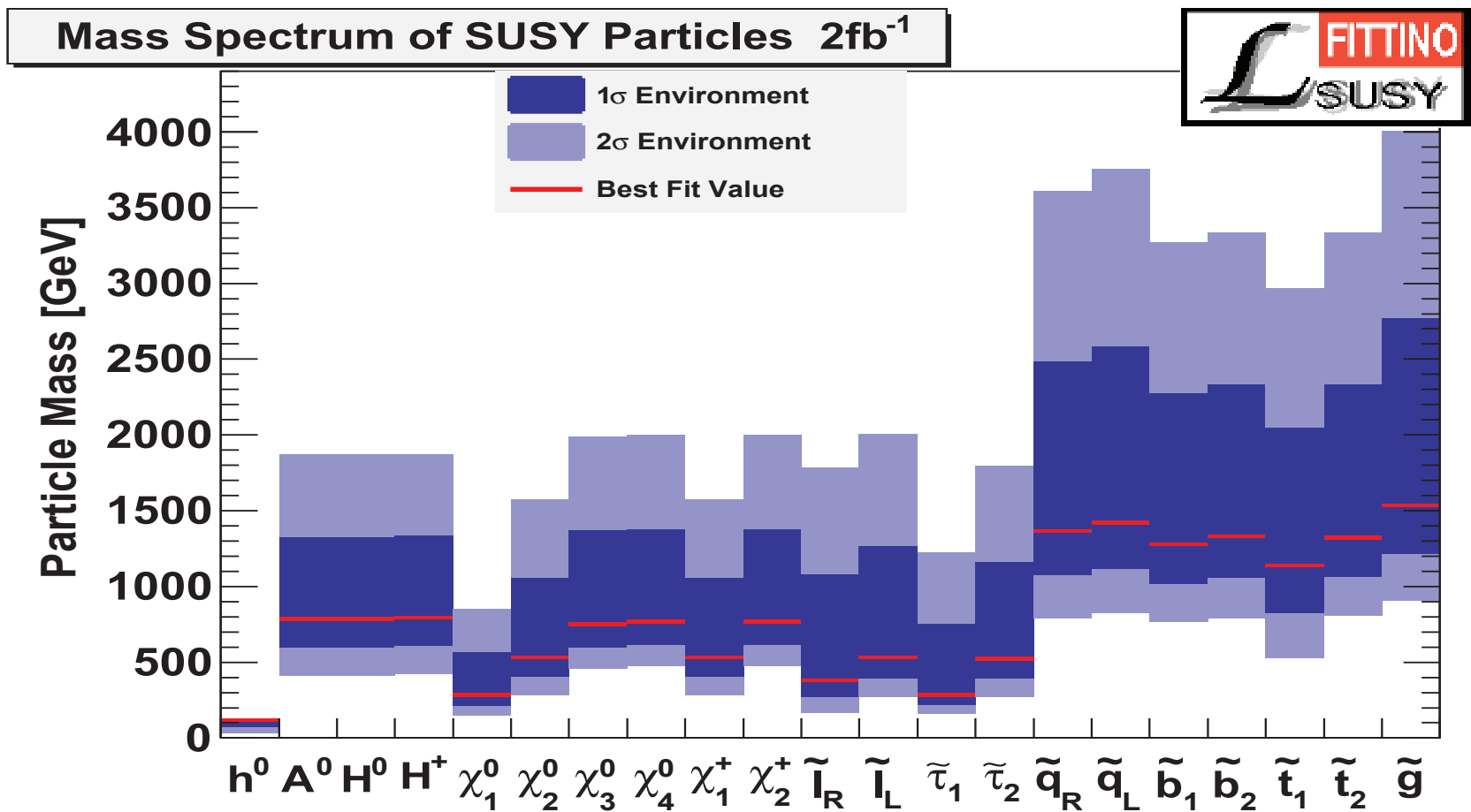
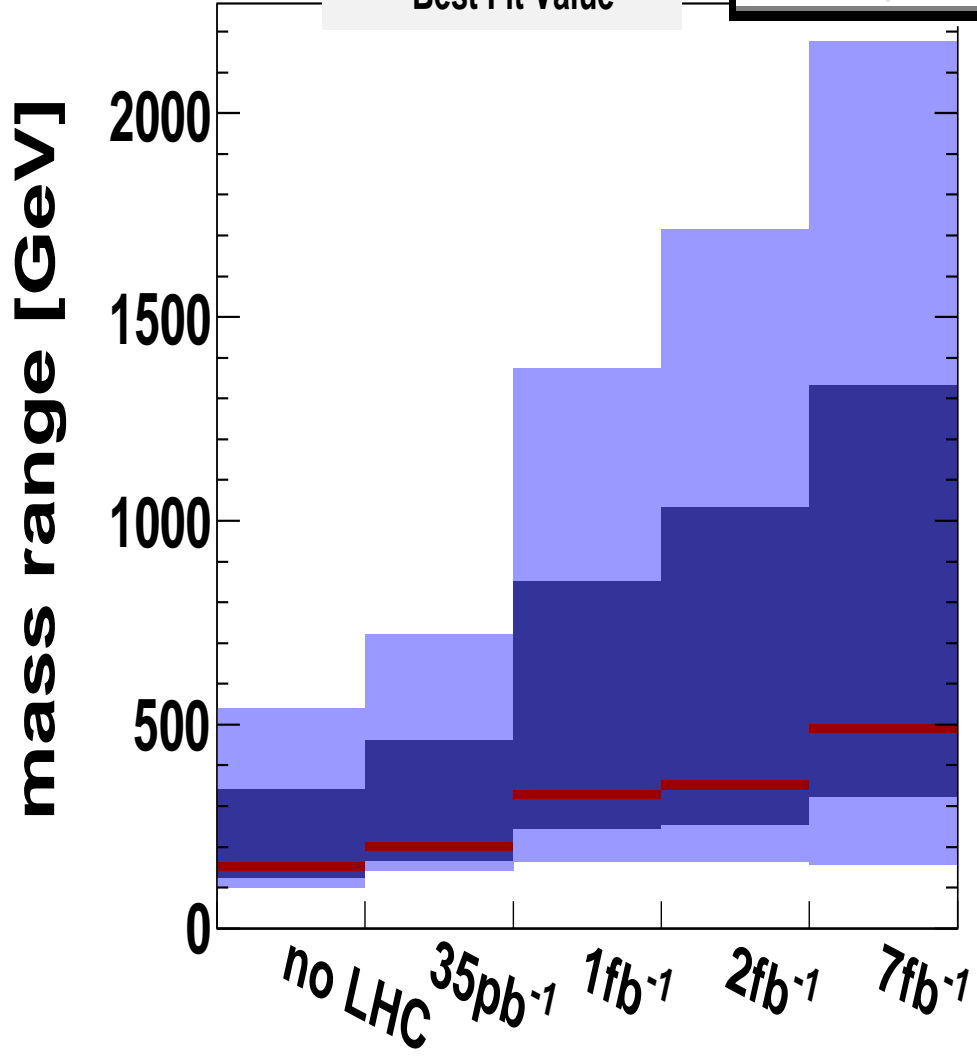
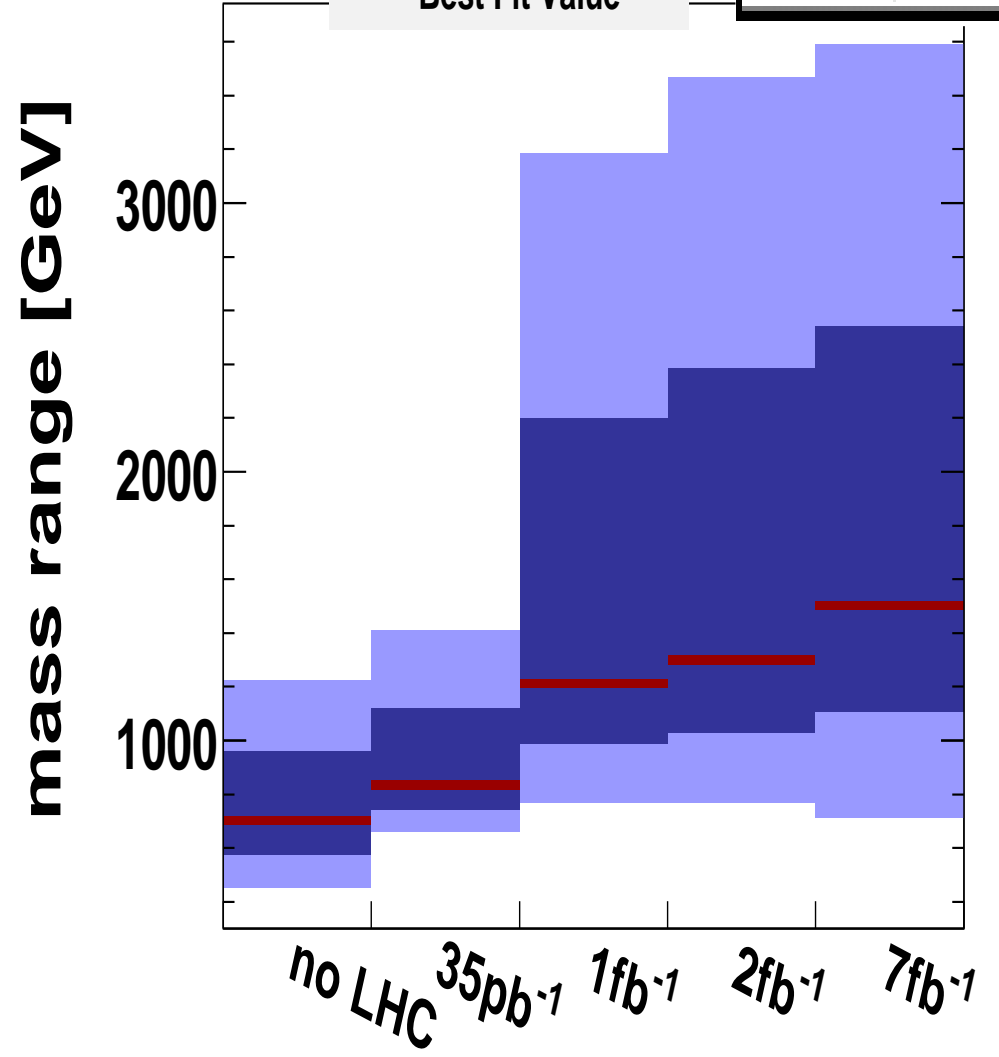


FIG. 3: SUSY mass spectrum as predicted by a combined mSUGRA fit of low-energy observables, current collider data from LEP, SLC and the Tevatron, the dark matter relic density, and a potential LHC exclusion limit in the four-jet, zero-lepton and E_T^{miss} channel for 2fb^{-1} integrated luminosity.

Mass of \tilde{l}_R



Mass of \tilde{q}_R



Zusammenfassung

- Symmetrien spielen eine entscheidende Rolle in allen Aspekten der Teilchenphysik
- Die Supersymmetrie hat eine Sonderrolle als maximale externe Symmetrie
- Die lokale Supersymmetrie beinhaltet automatisch die Gravitation
- Der LHC ist die ideale Maschine um Supersymmetrie zu testen



Kepler war ein Boston Red Sox Fan!



Und Einstein auch!



Die Bonner Teilchenphysikshow ... mit χ_1^0 !!