Suche nach neuen Teilchen bei HERA, LEP und am Tevatron

Beate Heinemann, University of Liverpool
Research Fellow of the Royal Society

DPG Tagung, Berlin, März 2005

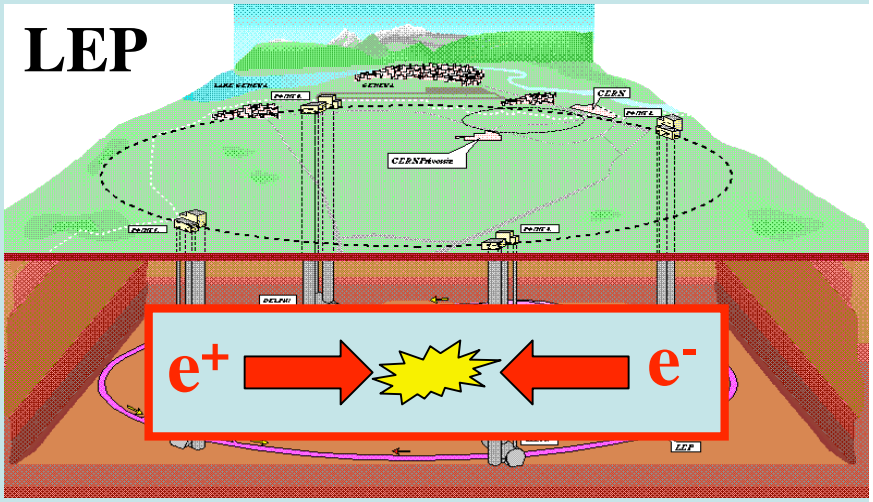
Gibt es Neue Teilchen?

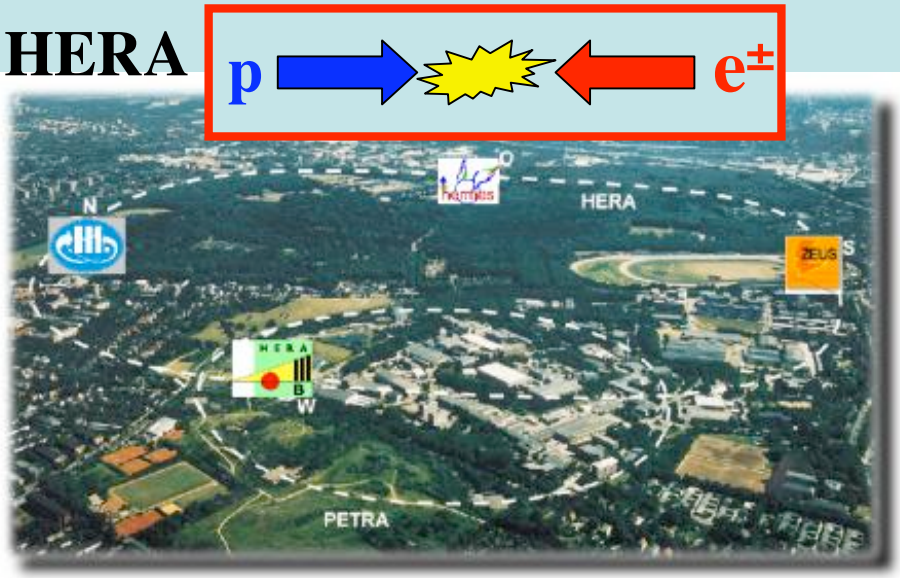
- Im Standardmodell wird elektroschwache Symmetriebrechung erklärt durch Higgs-Mechanismus:
  - generiert Massen der elektroschwachen Bosonen (W, Z) und Fermionen
  - Higgs-Boson bisher nicht gefunden
- Warum ist das Standardmodell nicht die Antwort?
  - **Kalte Dunkle Materie** hat keine Erklärung.
  - Keine **Vereinheitlichung** der elektroschwachen und starken Kraft (und der Schwerkraft)
  - Warum spielen **Bosonen und Fermionen** so unterschiedliche Rollen?
  - **Materie-Antimaterie**-Asymmetrie unerklärt
  - Etc.
- Grösstes Problem im TeV-Bereich:
  - **Hierarchie-Problem**: $m_h << m_{Pl}$

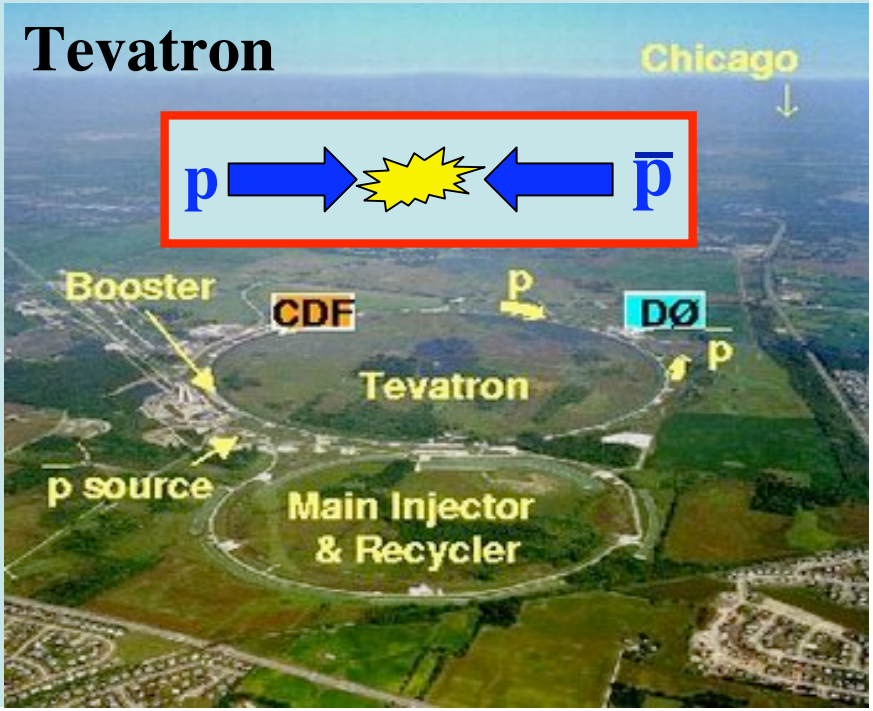
LEP, HERA und Tevatron

- Beschleuniger:

	$\sqrt{s}$	Art	$\int L dt$
LEP	0.2 TeV	e^+e^-	500 pb^{-1}
HERA	0.3 TeV	$e^{\pm}p$	170 pb^{-1}
Tevatron	2 TeV	$p\bar{p}$	500 pb^{-1}







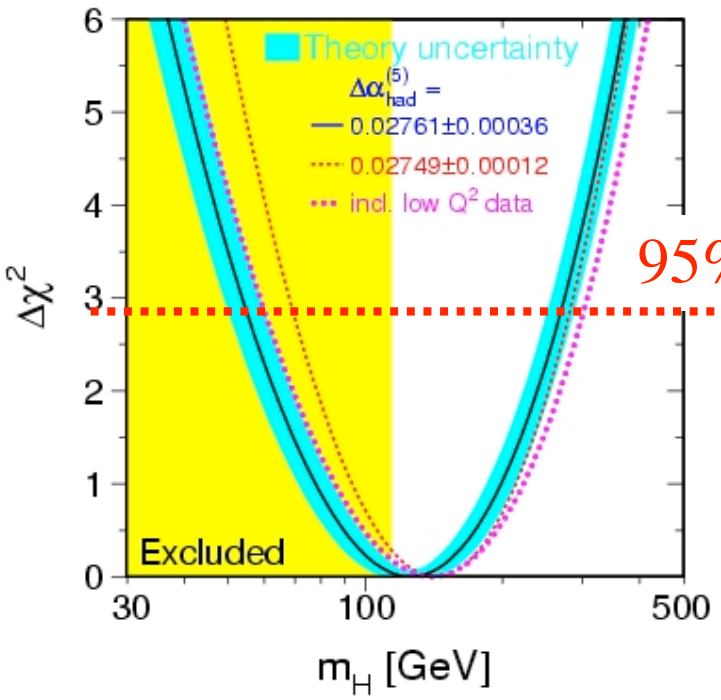
Inhalt

- Higgs Boson:
  - Standard Modell
  - Jenseits des Standardmodells
- SUSY:
  - Charginos und Neutralinos
  - Squarks und Gluinos
- Weitere Suchen:
  - HERA's isolierte Leptonen (W-Produktion)
  - Neue Eichbosonen: Z', W'
  - Extra Dimensionen
  - Magnetische Monopole

Das Higgs Boson

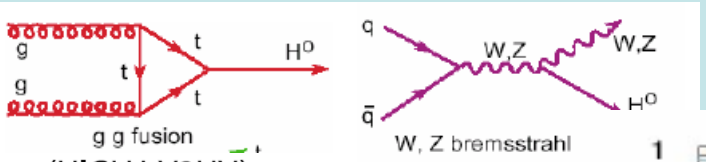
- Eigenschaften:
  - Skalares Feld
  - koppelt an Masse
  - Elementares Teilchen?
- Bisher nicht gefunden:
  - LEP: $m_H > 114.4$ GeV/c^2 @95% C.L
- Präzisionsmessungen:
  - $m_H = 126^{+73}_{-46}$ GeV/c^2
- Supersymmetry:
  - $m_h < 135$ GeV/c^2
- Weitere Higgs Bosonen werden vorhergesagt in Theorien jenseits des SM

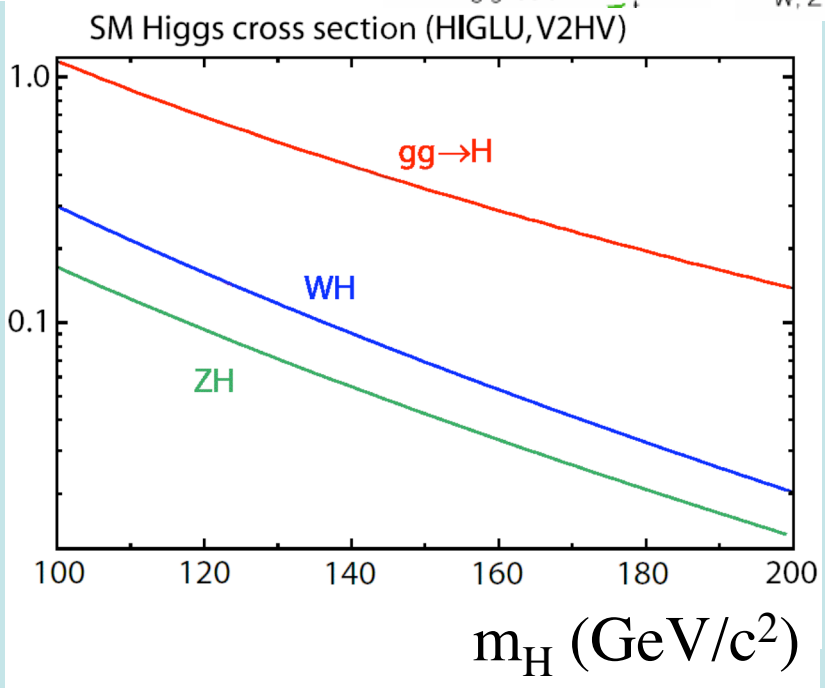
LEP EWK Working group: Frühling 2005



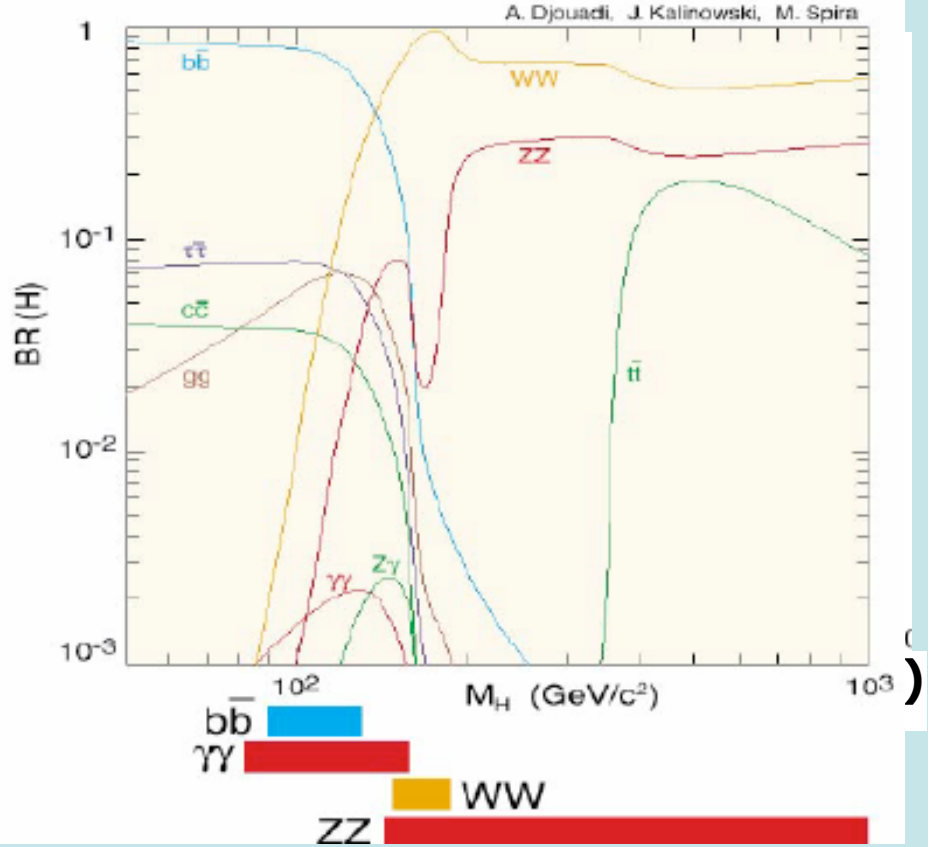
Tevatron SM Higgs Suche

Produktion:





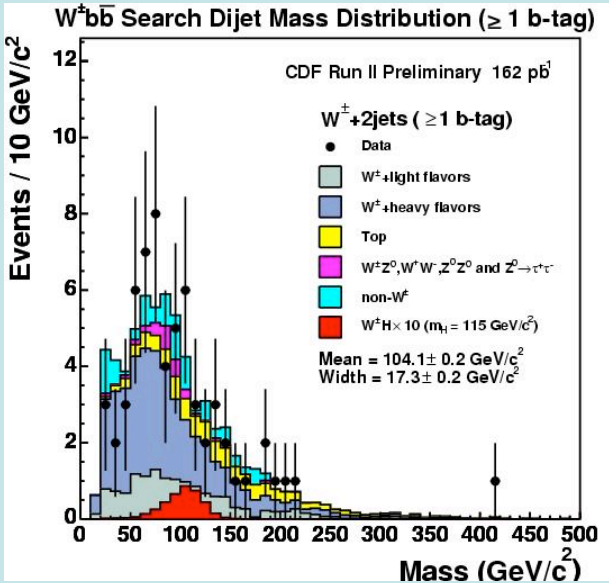
Zerfall

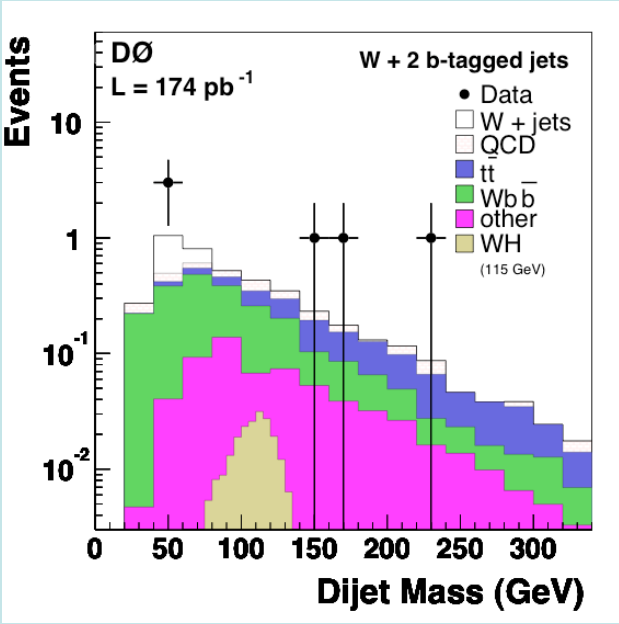


- Beste Chancen:
  - M_H<135 GeV: WH und ZH mit H->$b\bar{b}$ (und H->$\tau^+\tau^-$)
  - M_H>135 GeV: gg->H->W^+W^-

WH->eνbb̄ und WH->μνbb̄

- Selektion: W+b-jets
  - CDF: e oder μ, $\not\!\!E_t$, 2 jets (>=1 b-jet)
  - D0: e, $\not\!\!E_t$ und 2 b-jets
  - Invariante Masse der jets
- Daten konsistent mit Untergrund:
  - Daten schliessen Wirkungsquerschnitte >5 pb aus
  - Standard Modell: ca. 0.1-0.2 pb
- Massenauflösung:
  - Jetzt: ≈ 17%
  - Ziel: ≈ 10%

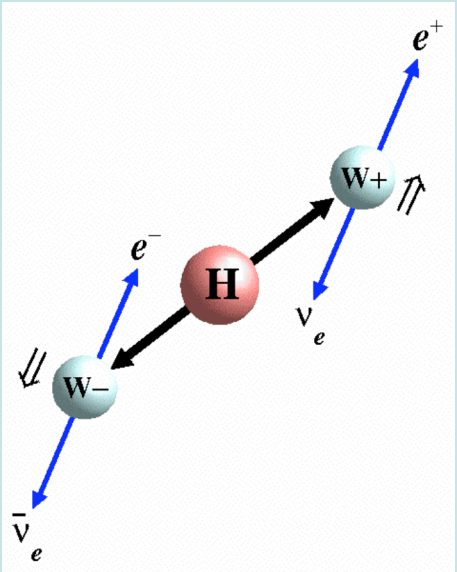


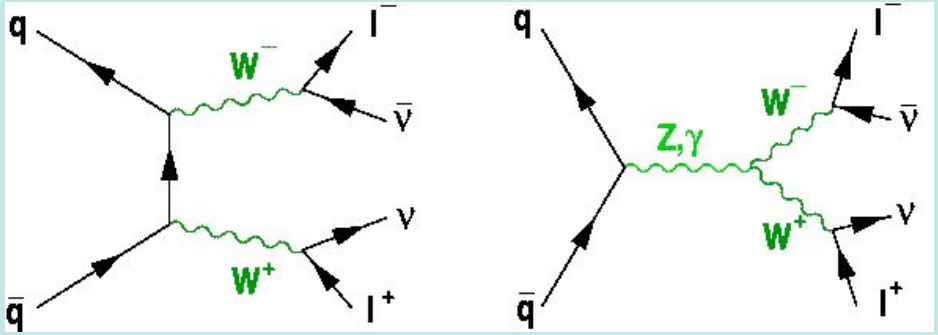


D0: Accepted in PRL - hep-ex/0410062

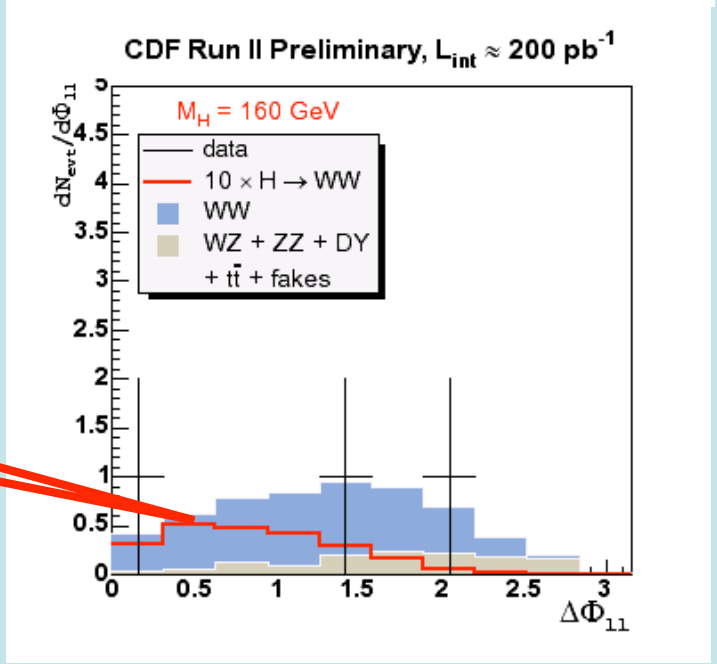
$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l^+l^-\nu\bar{\nu}$

- Higgs-Massen Rekonstruction unmöglich aufgrund von 2 Neutrinos im Endzustand
- Nutze Spin-Korrelations um WW Untergrund zu unterdrücken:
  - Higgs hat Spin=0
  - Leptonen in $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow l^+l^-\nu\nu$ sind kollinear
- Hauptuntergrund: WW Produktion



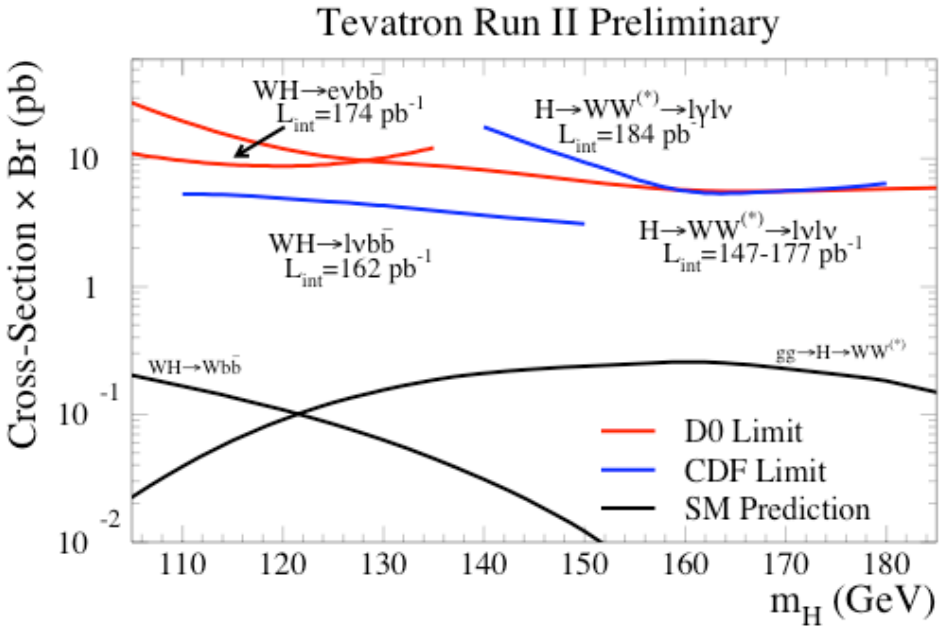


160 GeV Higgs

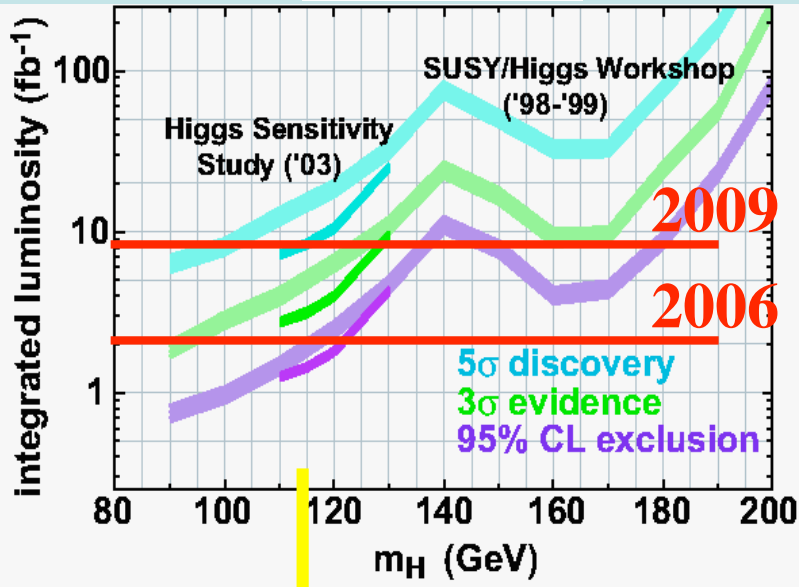


Status: Higgs am Tevatron

Jetzt (März 2005)



Zukunft

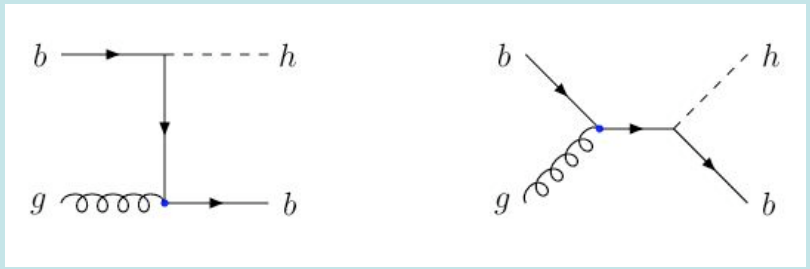


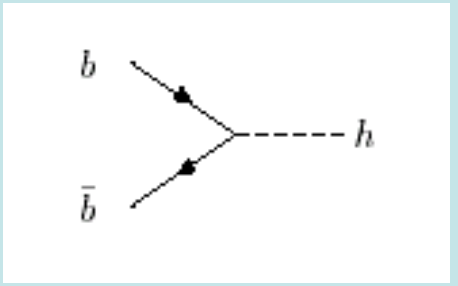
LEP

- Bisher keine Sensitivität:
  - Zu wenig Luminosität
  - Nur WH Kanal analysiert (ZH ->$\nu\bar{\nu}b\bar{b}$ is genauso wichtig!)
  - Experimentelle Techniken werden weiter optimiert

MSSM Higgs Suche

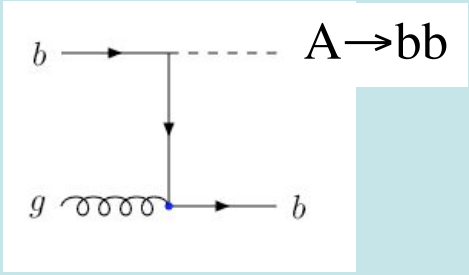
- MSSM (**M**inimales **S**upersymmetrisches **SM**):
  - 2 Higgs-Felder: Parameter $\tan\beta = \langle H_d^0 \rangle / \langle H_u^0 \rangle$
  - 5 Higgs-Bosonen:
    - h, A, H (neutral), H^+. H^- (geladen)
- Bei Tevatron und LHC:
  - Produktion von A $\propto \tan^2\beta$, A entartet mit h oder H
  - BR(A->$b\bar{b}$)≈90%, BR(A->$\tau\tau$)≈10% (auch für hohe Massen!)
  - Suche nach bA -> $bb\bar{b}$ und A+X->$\tau\tau$+X



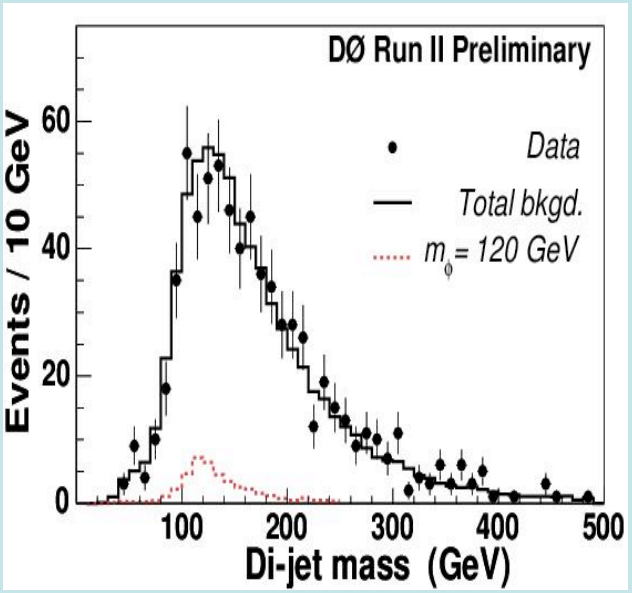


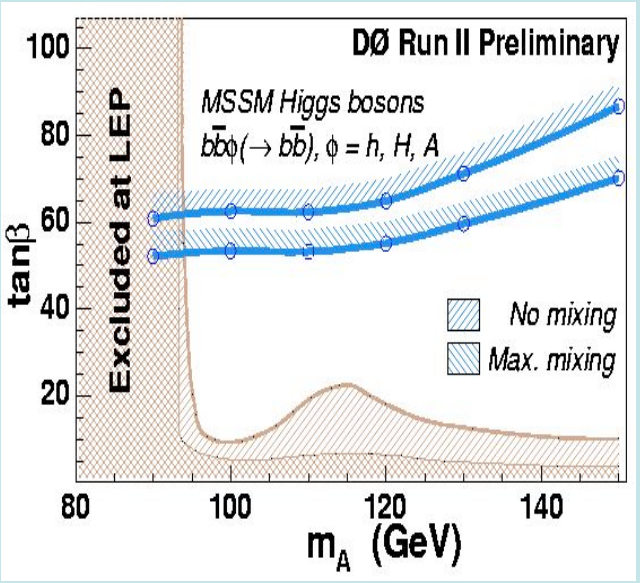
MSSM Higgs Suche

Update seit ICHEP



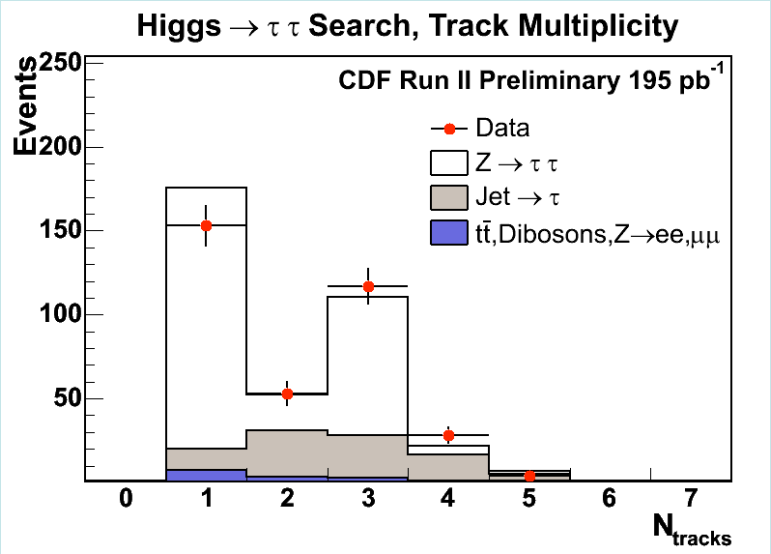
- Selektion:
  - 3 b-jets mit E_t>35, 20 und 15 GeV
- Untergrund:
  - QCD $b\bar{b}q\bar{q}$ und $b\bar{b}b\bar{b}$
  - Bestimme aus Daten
- Invariante Masse des ersten und zweiten Jets:
  - Suche nach Resonanz
- Daten konsistent mit Untergrund:
  - Schliesst tanβ>50-60 aus für 90<m_A<150 GeV/c^2

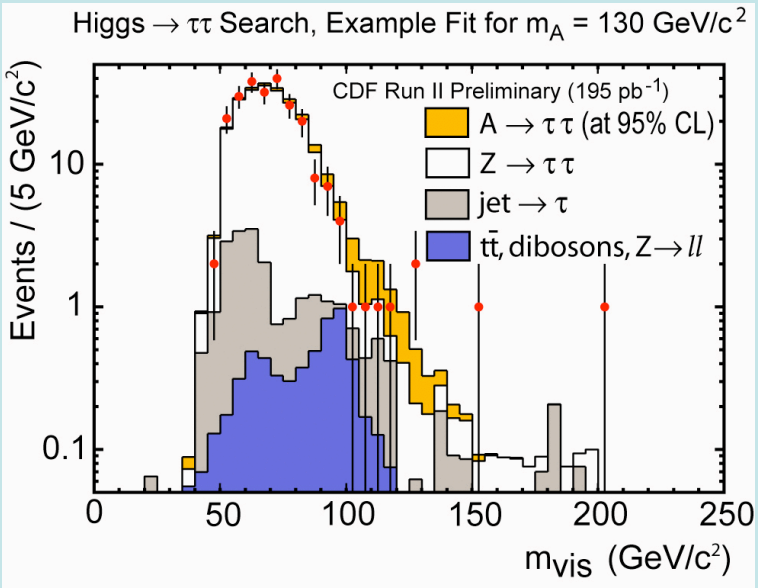




MSSM Higgs: $A \to \tau^+\tau^-$

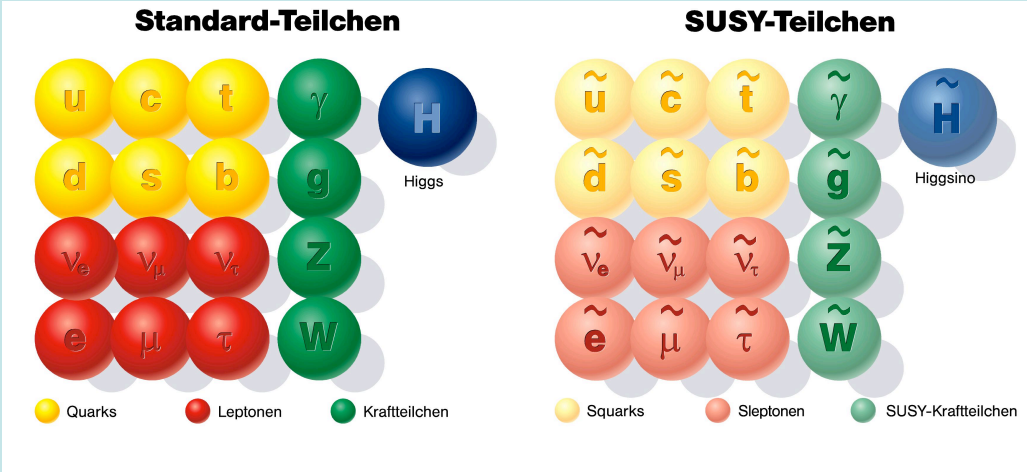
- $A \to \tau^+\tau^-$ Zerfall: BR≈8%
- Selektion:
  - 1 $\tau \to e\nu\nu, \mu\nu\nu$: e oder μ
  - 1 hadronischer τ-Zerfall: schmaler isolierter "jet" mit 1 oder 3 Spuren
- Ergebnis:
  - Typische τ-Signatur erkennbar
  - Hauptuntergrund $Z \to \tau^+\tau^-$
  - Massenverteilung konsistent mit SM
- Wirkungsquerschnitt<10-2 pb
  - Interpretation in MSSM in Arbeit
  - Sensitivität ≈tanβ=50



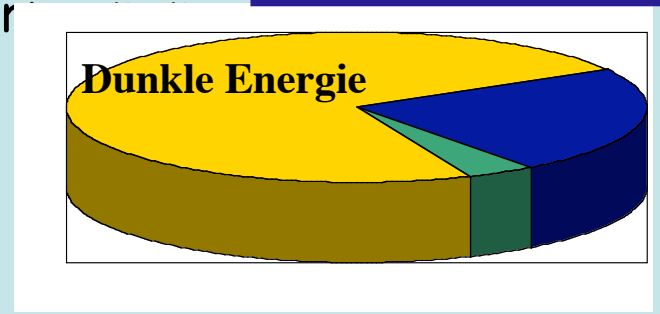


Supersymmetrie (SUSY)

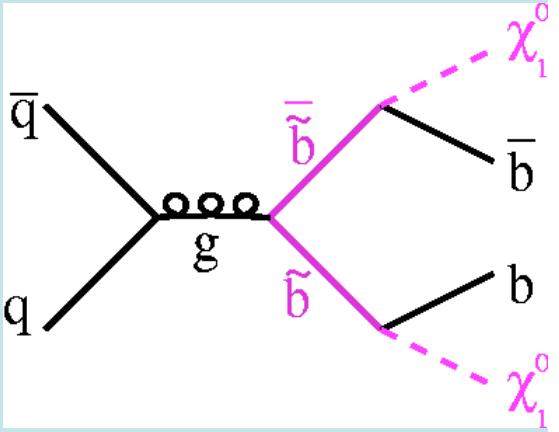
- ≈ Verdoppelt Anzahl der Elementarteilchen:
  - SM fermion => SUSY boson
  - SM boson => SUSY fermion
  - $R_p=(-1)^{3B+L+2S}$
    - R_p=+1 fur SM Teilchen
    - R_p=-1 fur SUSY Teilchen
  - Gebrochene Symmetry



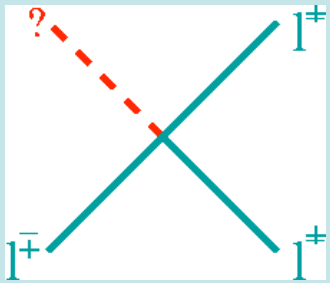
- Vorteile:
  - Löst Asymmetrie zwischen Bosonen und Fer
  - Löst Hierarchie-Problem
  - kalte dunkle Matrie: R_p erhalten
  - Neutrino-Massen ≠0: R_p verletzt
  - Konsistent mit elektroschwachen Präzisionsmessungen
  - Vereinheitlichung der Kräfte auf GUT Skala



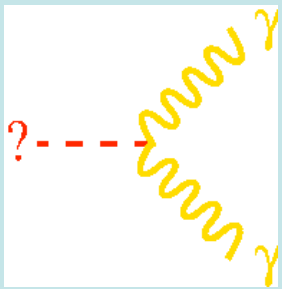
Wie suchen wir nach SUSY?



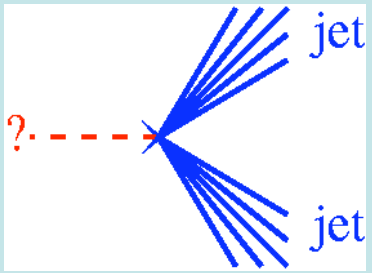
- R_p-Erhaltung:
  - LSP = leichteste neutralino (nicht beobachtbar)
  - Typische Suche : Steilchen → LSP+SM Teilchen
- Sensitivität:
  - LEP: $m_{NLSP} \sim \sqrt{s}/2 \leq 103.5$ GeV
  - Tevatron: 50- 500 GeV (hängt von Teilchen ab)
  - HERA: hauptsächlich R_p verletzend
- Massen-Eigenzustände der SUSY Partner der W's, Z's, Photonen heißen:
  - Chargino $\tilde{\chi}^{\pm}_1, \tilde{\chi}^{\pm}_2$
  - Neutralino: $\tilde{\chi}^0_1, \tilde{\chi}^0_2, \tilde{\chi}^0_3, \tilde{\chi}^0_4$
- Beispiele:

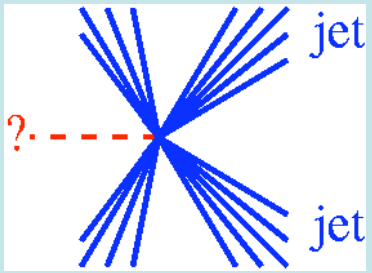


chargino+neutralino



GMSB

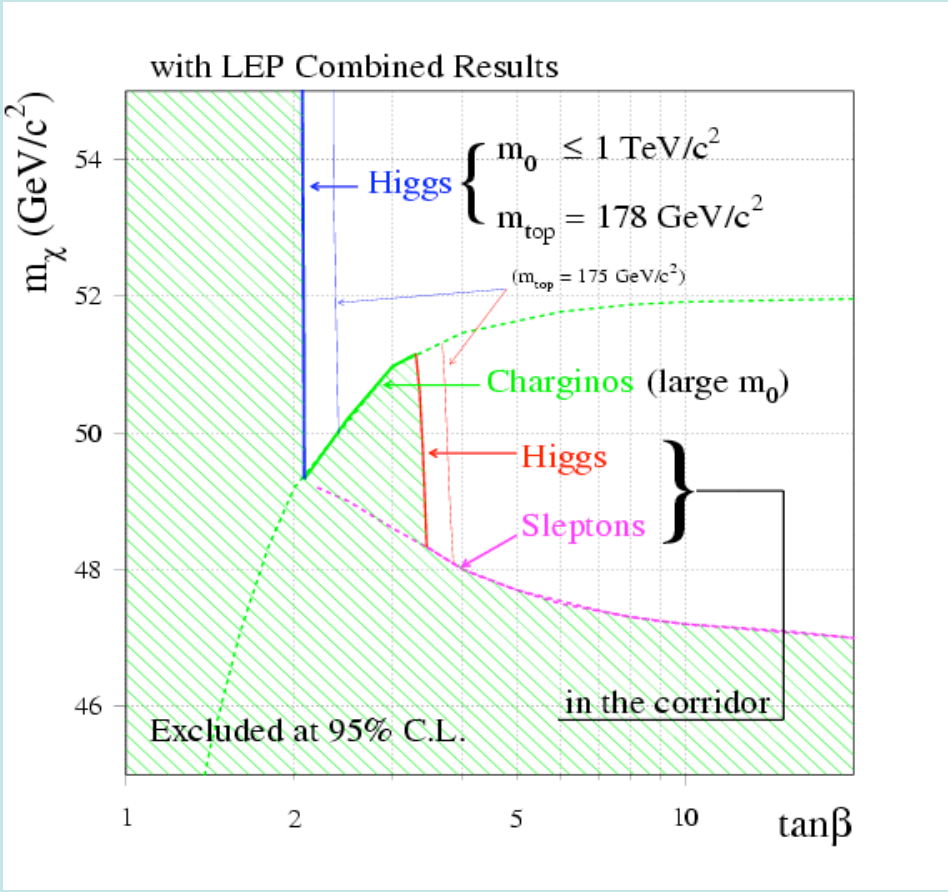




squarks, gluinos

Ergebnisse der LEP SUSY Suchen

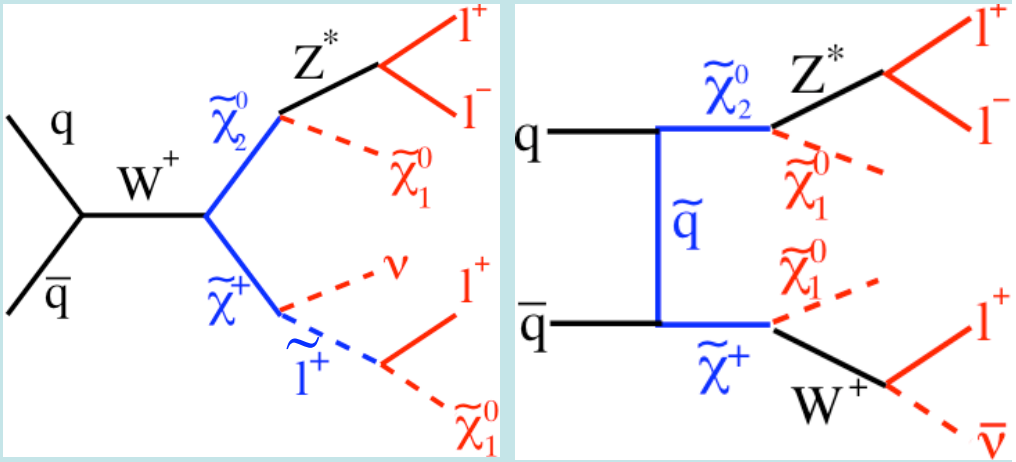
- Charginos und Sfermionen:
  - Ausgeschlossen bis zur kinematischen Grenze:
  - m>103 GeV/c^2
  - Modell-unabhängig!
- Higgs Suche schließt kleine tanβ aus:
  - tanβ>2-4 (Modell-abhängig)
- LSP:
  - mSUGRA: M(χ_1^0)>50-60 GeV/c^2
  - cMSSM: M(χ_1^0)>46-50 GeV/c^2

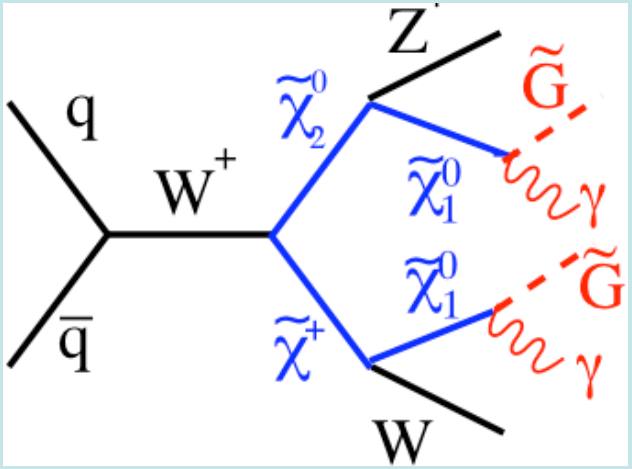


m_0: Sfermion Masse
$m_{1/2}$: Gaugino Masse

Charginos und Neutralinos

- mSUGRA:
  - SUSY gebrochen auf GUT Skala
  - Neutralino $\tilde{\chi}^0_1$ LSP
  - 3 Leptonen + $\not{E}_t$
- GMSB:
  - SUSY gebrochen bei ca. 10 -100 TeV
  - Gravitino $\tilde{G}$ LSP
  - 2 Photonen + $\not{E}_t$



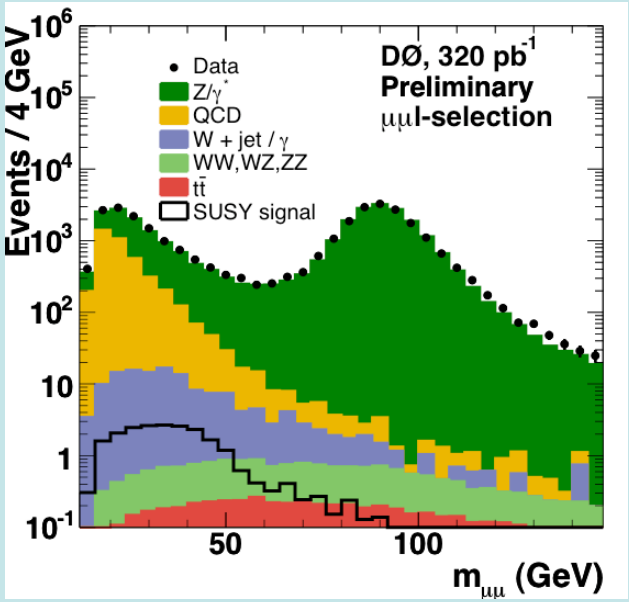


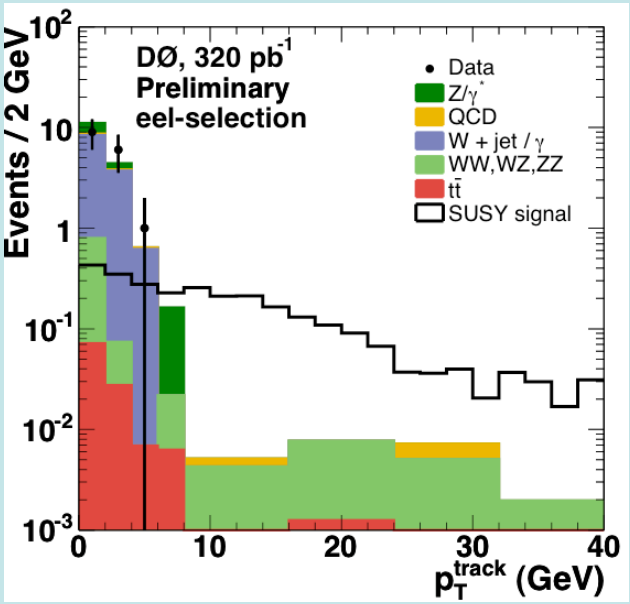
Tevatron: 3 Leptonen + $\not\!\!E_T$

- Herausforderung:
  - σxBR niedrig
  - Lepton p_T niedrig
- DØ Selektion
  - 2 l (l=e,μ,τ) + isolierte Spur oder $\mu^{\pm}\mu^{\pm}$
  - $\not\!\!E_T$ +topologische cuts

Update seit ICHEP

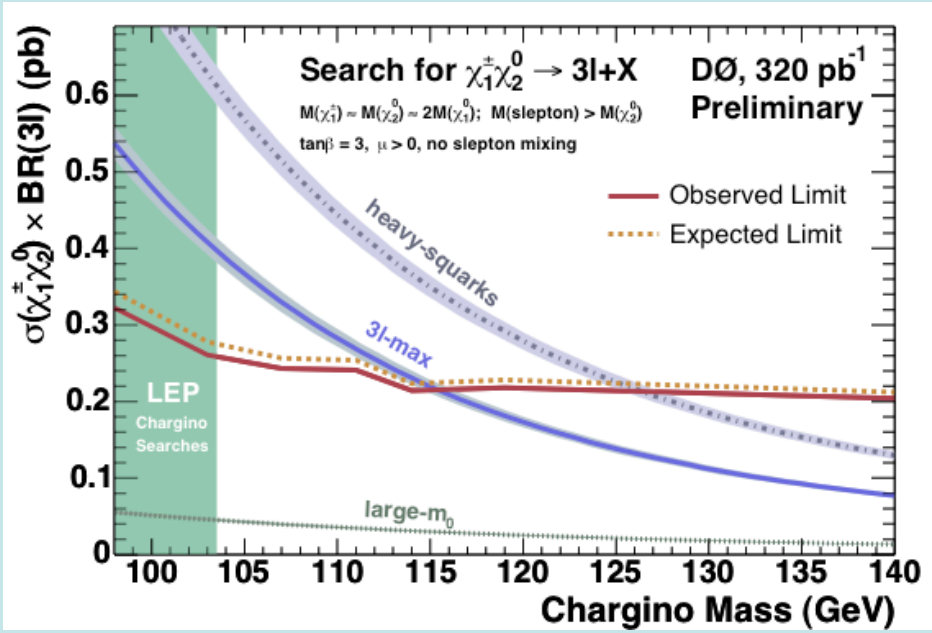
Selektion	SM Untergrund	Daten
ee+l	0.21±0.12	0
eμ+l	0.31±0.14	0
μμ+l	1.75±0.57	2
$\mu^{\pm}\mu^{\pm}$	0.66±0.37	1
eτ+l	0.58±0.11	0
μτ+l	0.36±0.10	1





Ergebnis: 3-Leptonen Suche

- Ergebnis:
  - σxBR<0.2-0.3 pb
- mSUGRA: m($\chi^{\pm}$)>115.4 GeV
  - tanβ=3, A_0=0, μ>0
  - $M(\tilde{\chi}^{\pm}) \approx M(\tilde{\chi}^0_2) \approx 2M(\tilde{\chi}^0_1)$
  - "optimistisches" Modell
- Schwere Squarks: m($\chi^{\pm}$)>126.5 GeV
  - D.h. keine Sfermion-Massen-Vereinheitlichung
  - Reduziert destruktive Interferenz
- Große m_0: keine Sensitivität
  - Sleptonen schwer => leptonische BR klein

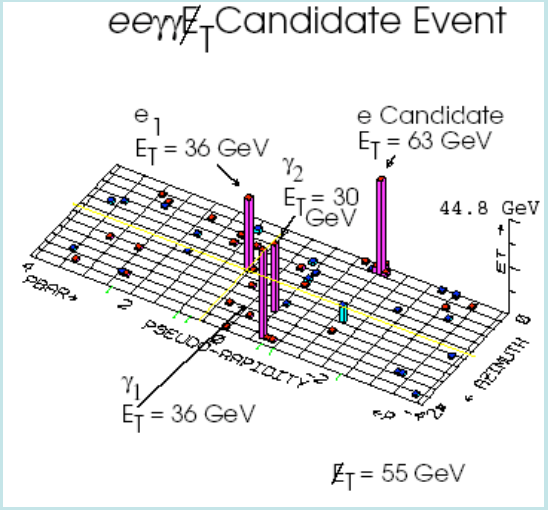


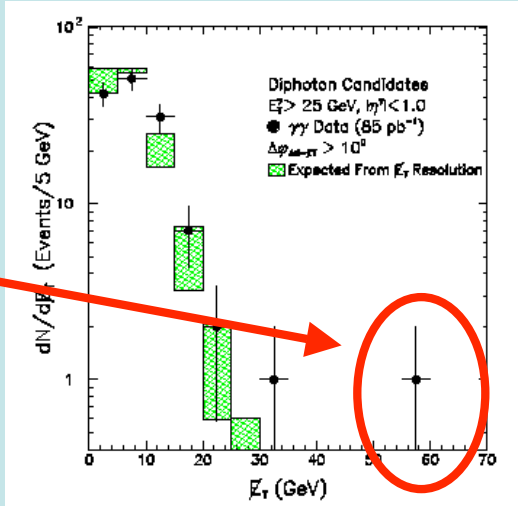
NLO: M. Beenakker et al. (PRL 3780-3783, 1999

- Tevatron beginnt mSUGRA jenseits der LEP-Grenzen zu testen
- höhere tanβ in Arbeit: $\tilde{\tau}$ leicht

Run I CDF Ereignis

- Run I Ereignis:
  - 2 e, 2 γ und $\not\!\!E_t$=56 GeV
  - SM Erwartung: 10^{-6} Ereignisse
- Interpretationen in GMSB:
  - Selektron
  - Chargino/Neutralino
- Sichtbar in inklusivem diphoton $\not\!\!E_t$ Spektrum
- Suchen bei Tevatron Run II, LEP und HERA

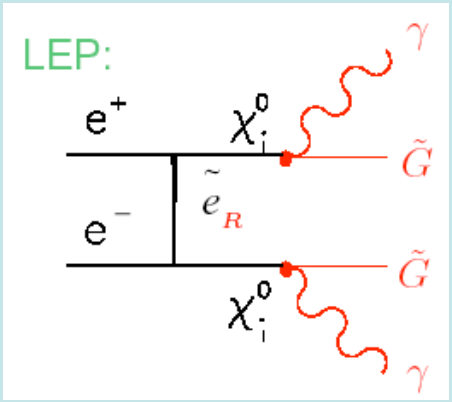


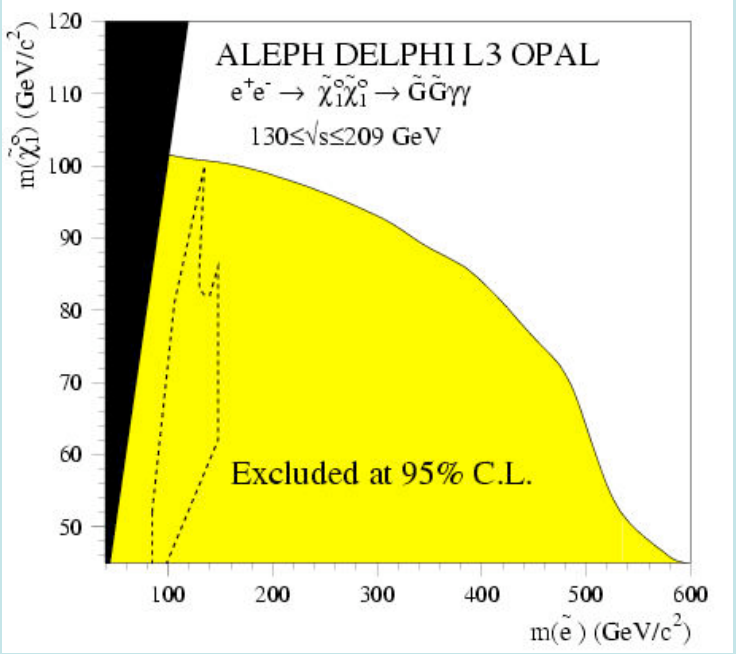


Phys.Rev.Lett.81:1791-1796,1998

GMSB: Selektron-Suche bei LEP

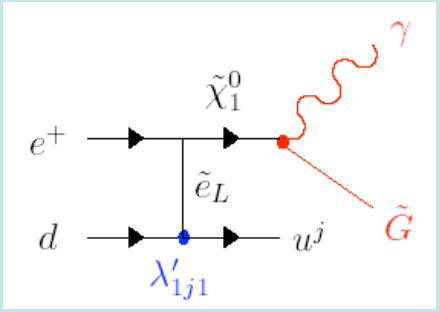
- Paar-Produktion von Selektronen
  - Unabhängig von Squark und Chargino-Massen!
  - Sensitiv auf $\tilde{e}_R$
- Such nach:
  - 2 γ, $\not{E}_t$
- LEP schließt Interpretation des CDF Run I Ereignisses aus

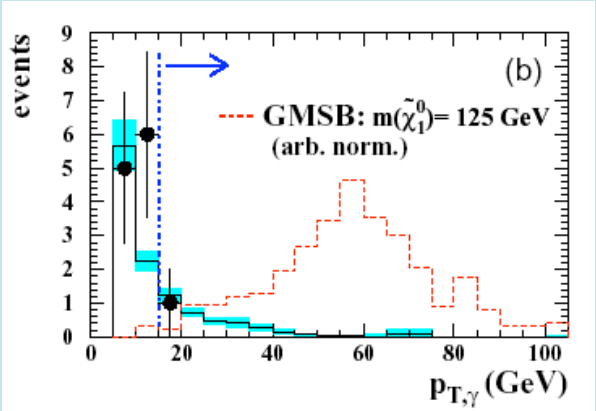


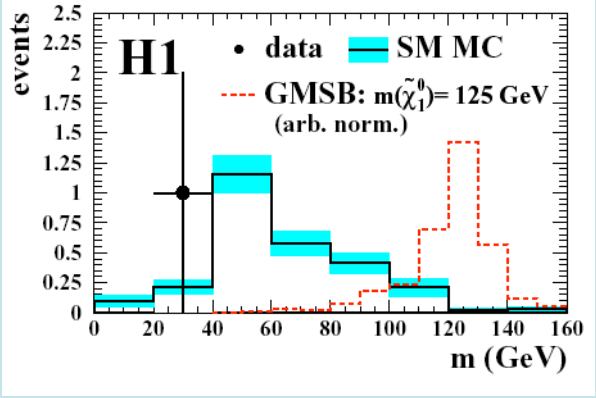


GMSB: Selektron-Suche bei HERA

- Produktion nur wenn R_p nicht erhalten (λ_{1j1} >0):
  - Sensitiv auf $\tilde{e}_L$
  - Unabhängig von Squark und Chargino Massen
- Selektion:
  - Photon E_t>15 GeV, $\not{E}_t$>25 GeV
  - Masse von Neutralino kann rekonstruiert werden
- Für λ_{1j1}=1:
  - M($\tilde{e}_L$)>164 GeV/c²
  - M($\tilde{\chi}^0_1$)>112 GeV/c²

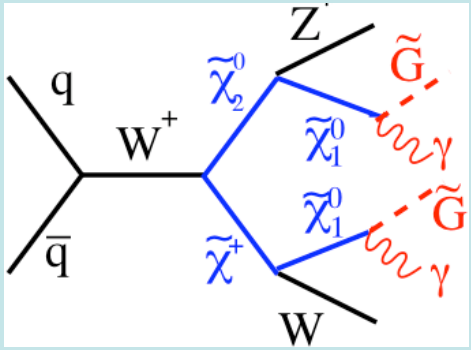


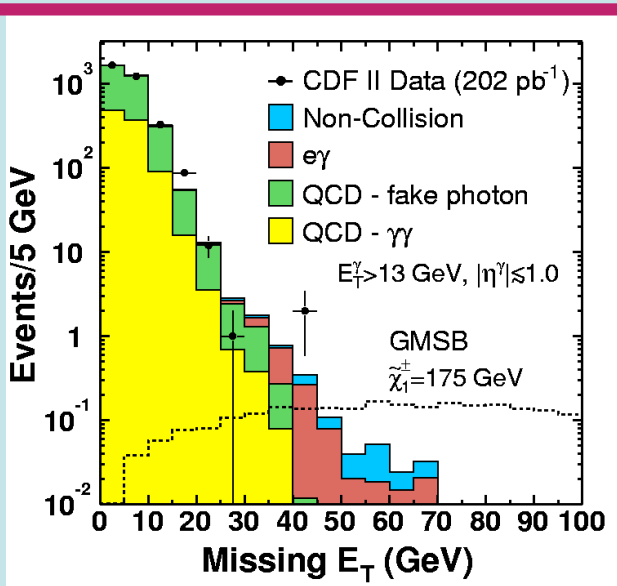




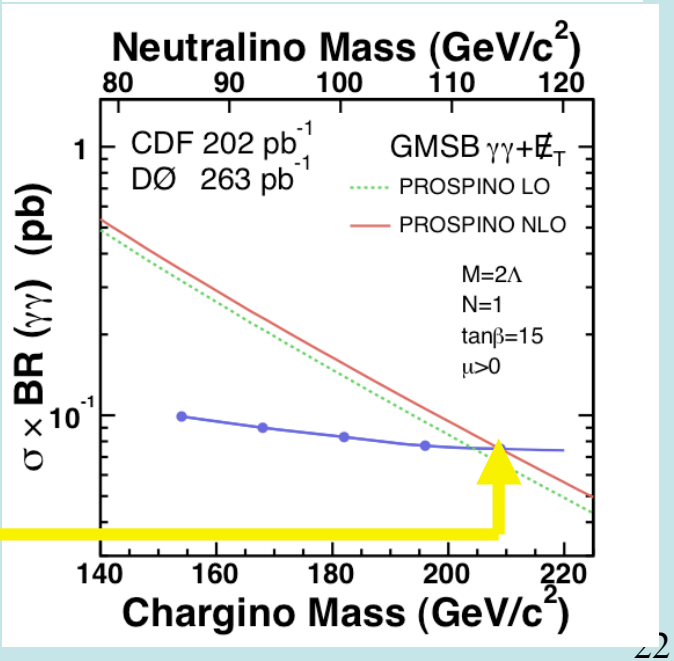
Tevatron GMSB Suche: $\gamma\gamma+\not{E}_t$

- DØ (CDF) Suche:
  - 2 Photonen: $E_t > 20$ (13) GeV
  - $\not{E}_t > 40$ (45) GeV





	SM Untergrund	Daten
DØ	3.7±0.6	2
CDF	0.3±0.1	0



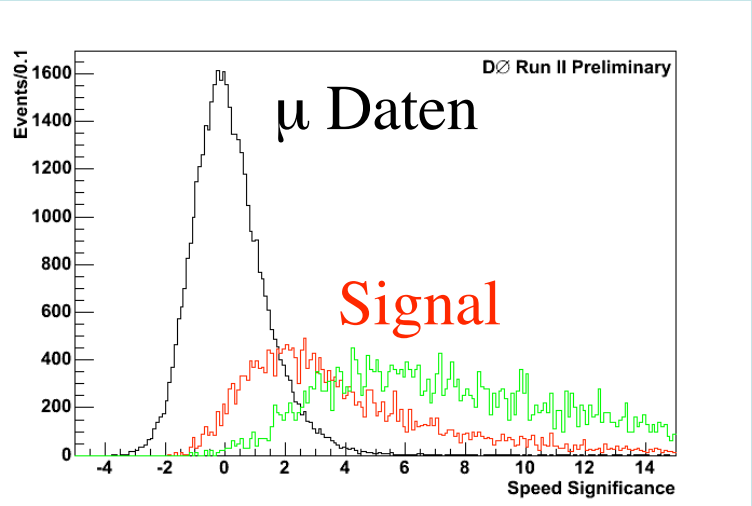
Erstes Run II Resultat kombiniert von DØ und CDF:

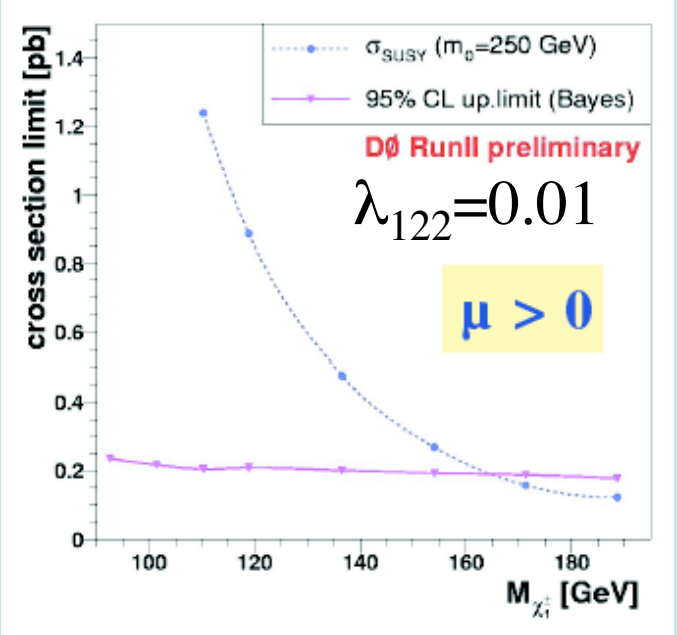
$m(\tilde{\chi}^\pm) > 209$ GeV/c^2, $m(\tilde{\chi}^0) > 114$ GeV/c^2

Weitere Chargino und Neutralino Suchen

Neu seit ICHEP

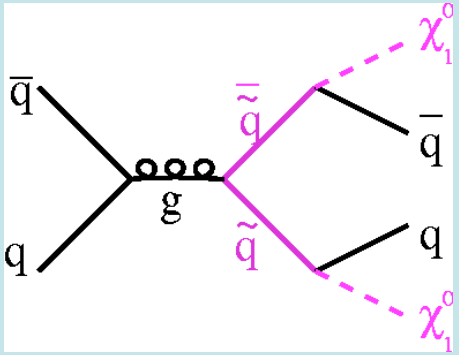
- Chargino könnte quasi-stabil sein:
  - Z.B. $m(\chi^{\pm}_1)$-$m(\chi^0_1)$<150 MeV
  - Signatur wie μ aber langsam: v<c
  - Messe Zeitdifferenz zwischen Kollision und Hit in Myon-Kammern
  - Kein Ereignis gefunden
  - $m(\tilde{\chi}^{\pm}_1)$>140-174 GeV/c^2 (modellabh.)
- RPV SUSY:
  - $\tilde{\chi}^0_1$ nicht stabil => Zerfall in Leptonen
  - 4 Leptonen im Endzustand
  - Daten konsistent mit Untergrund
  - λ_{112}=0.01: $m(\tilde{\chi}^{\pm}_1) \gtrsim 180$ GeV/c^2
  - λ_{122}=0.01: $m(\tilde{\chi}^{\pm}_1) \gtrsim 160$ GeV/c^2

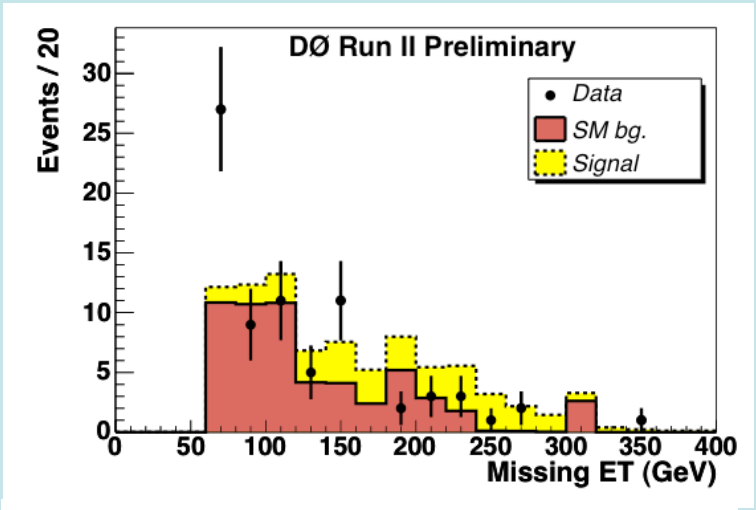


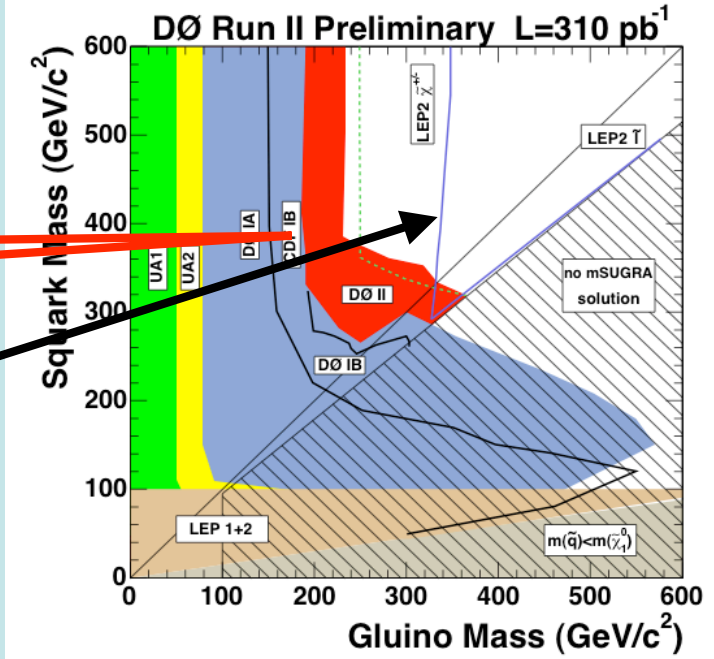


Squarks und Gluinos

- Signatur:
  - 2 jets und $\not\!\!E_t$
  - $\sum P_t^{jet} > 250$ GeV
  - $\not\!\!E_t > 175$ GeV
- Ereignisse:
  - **Daten: 12, SM: 12.8±5.4**
- + Ähnliche Analysen =>
  - $m(\tilde{g}) > 250$ GeV/c^2
  - $m(\tilde{q}) > 318$ GeV/c^2
- In mSUGRA:
  - Indirektes LEP-limit aus $\chi^{\pm}$ Suche
  - $m(\tilde{g})>320$ GeV/c^2

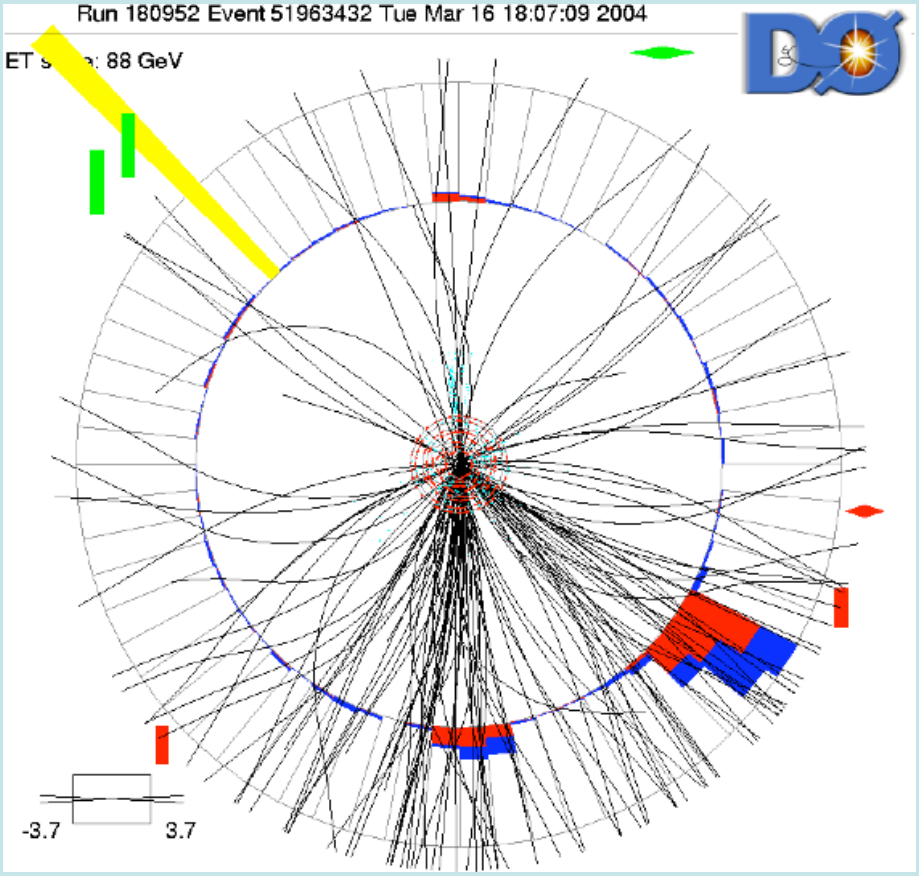


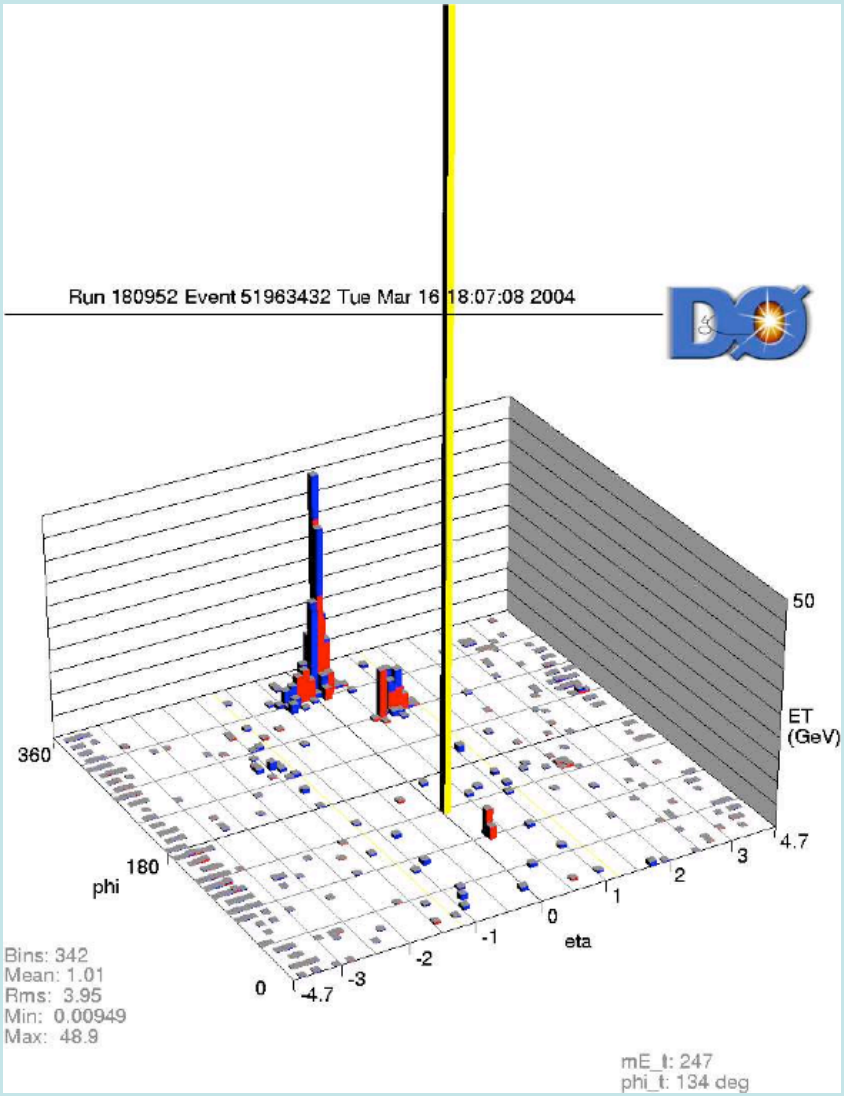




Update seit ICHEP

Das Ereignis mit höchstem $\not{E}_t$



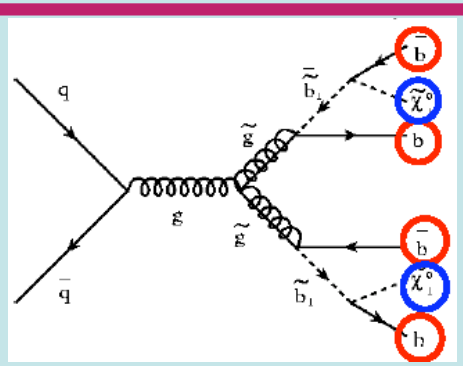


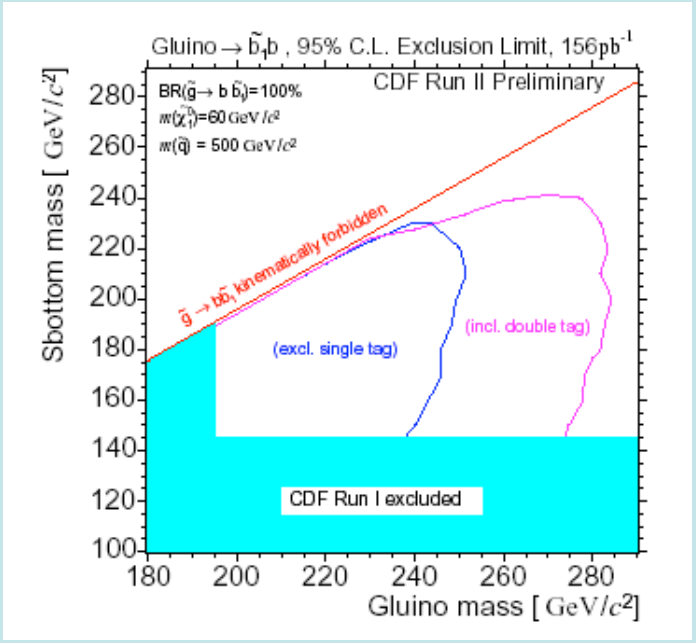
$\not{E}_t$=354 GeV

Jets: E_t=264 GeV, E_t=106 GeV

Bottom Squarks

- Hohes tanβ Szenario:
  - Sbottom kann leicht sein
- In dieser Analyse:
  - BR($\tilde{g}$->$\tilde{b}$b)~100% angenommen
- Spektakuläre Signatur:
  - 4 b-quarks + $\not{E}_t$
- 2 b-Jets and $\not{E}_t$>80 GeV + keine isolierten Leptonen

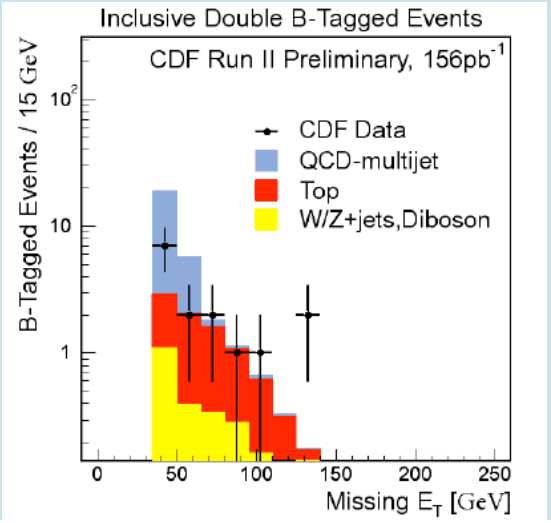




Ereignisse:

SM:2.6±0.7

Daten: 4

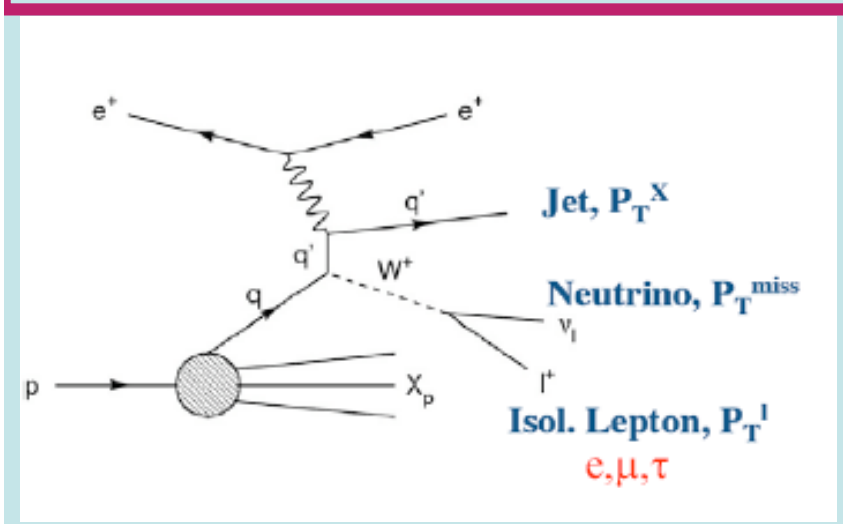


- Schließe m($\tilde{g}$)<280 GeV aus für m($\tilde{b}$)<240 GeV

Weitere Suchen

- W's bei HERA
  - "Isolierte Leptonen"
- neue Eichbosonen (W',Z')
- Extra Dimensionen
- Magnetische Monopole

HERA I: "Isolierte Leptonen"



Run I Ergebnisse (e und μ)

e+μ	H1:I Daten/SM	ZEUS:I Daten/SM
P_T^X>0	19/14.4±1.6	36/32.5 ±3.3
P_T^X>25 GeV	11/3.4 ±0.4	7/5.7 ±0.5

- HERA Run I (~120 pb^{-1}):
  - H1 sah Daten-Überschuß bei hohen jet P_T (P_T^X)
  - ZEUS sieht gute Übereinstimmung mit SM
- Haupt-Prozeß im SM:
  - W-Produktion (NLO: Diener, Schwanenberger, Spira, Eur. Phys. J C25: 405-411 (2002))

NB: τ -Kanal auch analysiert aber Statistik noch gering

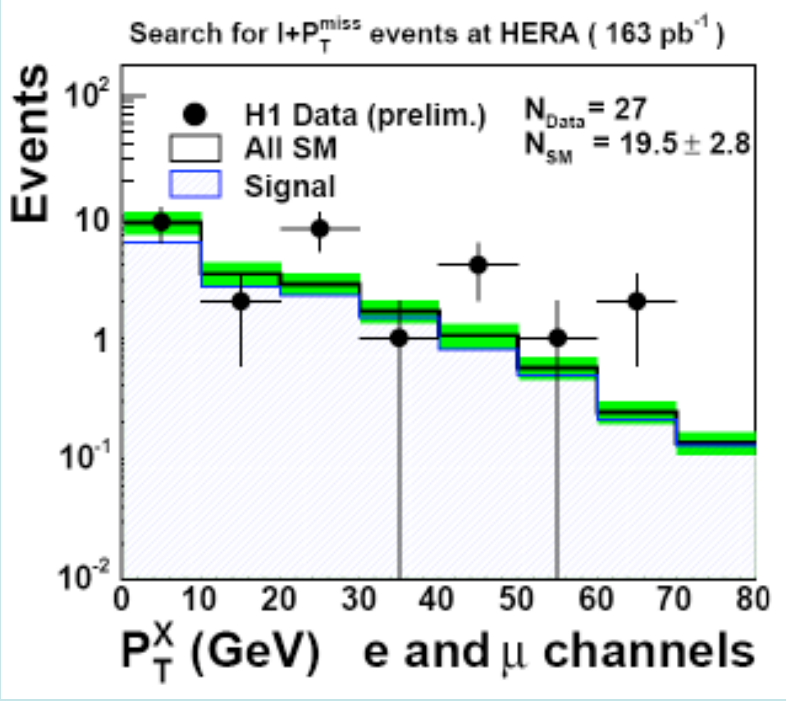
Wie sieht's in Run II aus?

HERA II: "Isolierte Leptonen"

e+μ	H1: Run I Daten/SM	H1: Run II Daten/SM	ZEUS: Run I Daten/SM
$P_T^X>0$	19 / 14.4±1.6	10 / 6.1 ±0.9	36/32.5±3.3
$P_T^X>25$ GeV	11 / 3.4 ±0.4	5 / 1.7 ±0.3	7/5.7±0.5

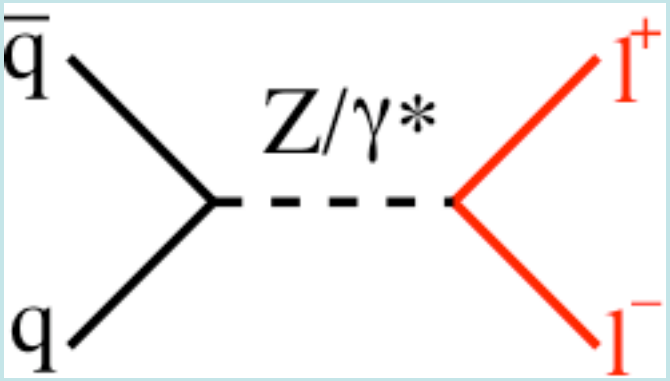
Update seit ICHEP

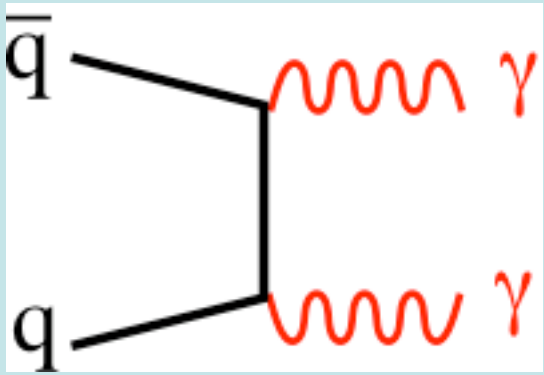
- Neue Run II Daten (53 pb^{-1}):
  - H1 sieht weiterhin höhere Rate als SM
- Naïve Poisson Probability:
  - H1: Run I+II: ≈ 0.01% (!!!)
  - H1: Run I: ≈ 0.1%
  - H1+ZEUS: ≈ 0.1%
- Bisher kein Modell, das Daten plausibel erklärt



Tevatron 2-Lepton und 2-Photon Produktion

- Produktion von 2 Leptonen oder 2 Photonen in SM

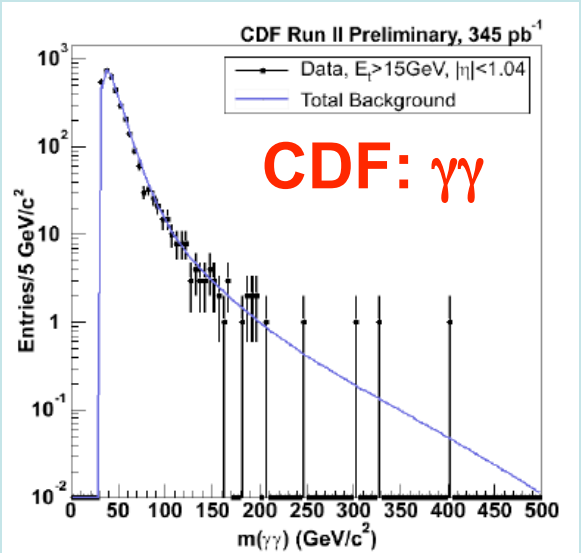


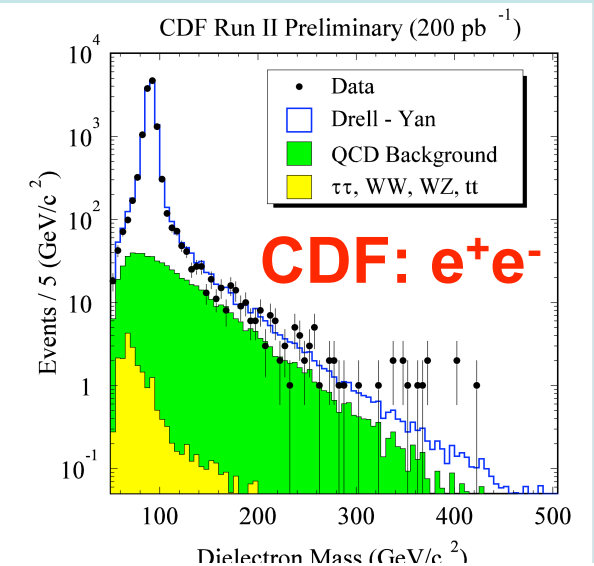


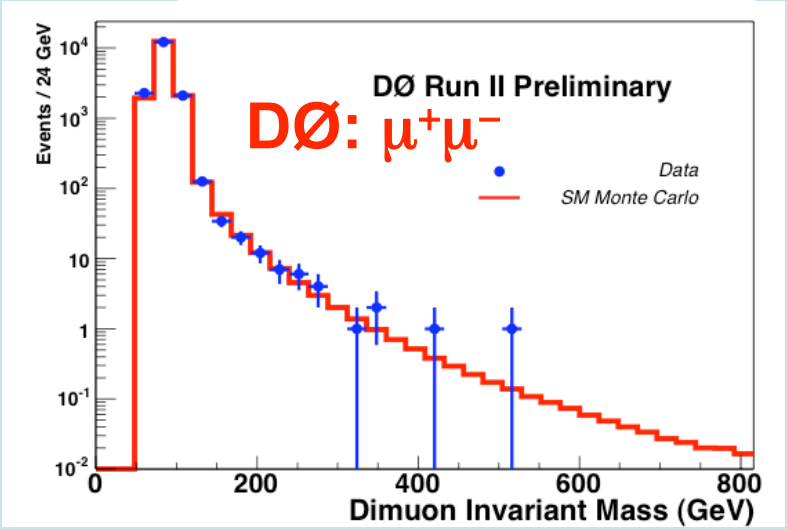
Neue Teilchen bei höchsten Massen ?

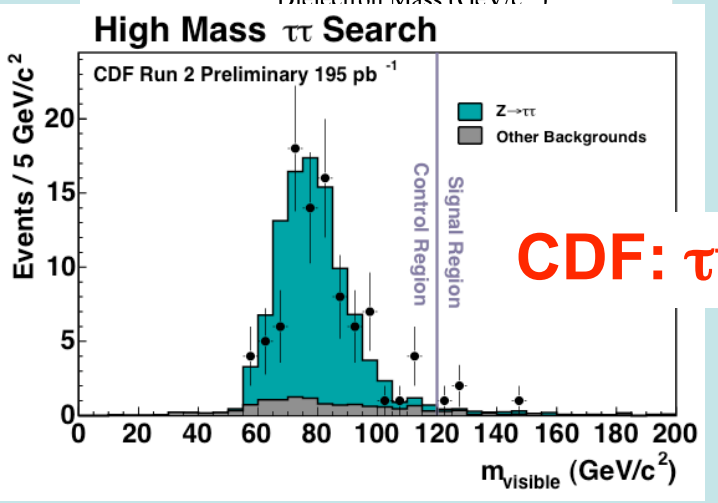
- Schmale Resonanz:
  - Spin-1: Z'
  - Spin-2: Randall-Sundrum (RS) Graviton
  - Spin-0: RPV $\tilde{\nu}$, Higgs
- Härtere Verteilung:
  - Grosse Extra Dimensionen: Arkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali (ADD)
  - Kontakt-Wechselwirkungen

Massenspektren: $\gamma\gamma$, e^+e^-, $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$









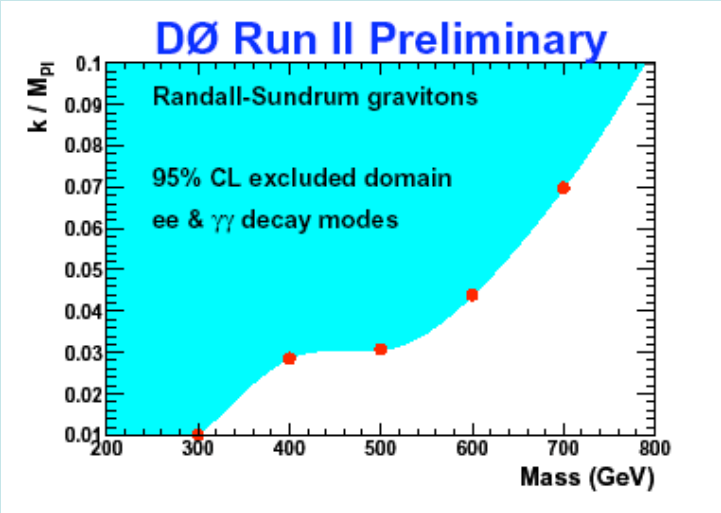
Daten von Standardmodell beschrieben: >4 Größenordnungen!

Spin-1 und Spin-2: Z' und G

- 95% C.L. Limits für SM-ähnlichen Z' (in GeV/c^2):

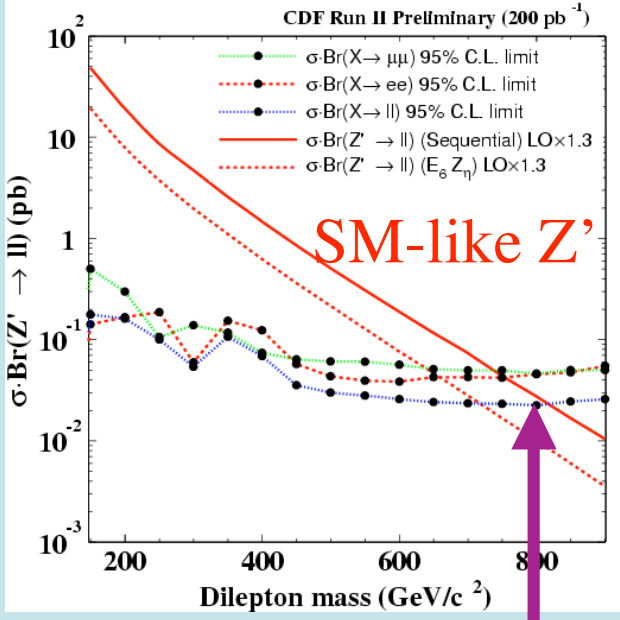
	ee	μμ	ee+μμ	ττ
CDF	>750	>735	>815	>395
D0	>780	>680	-	-

- RS Graviton: M>785 GeV/c^2 für k/M_{Pl}=0.1



Update seit ICHEP

CDF: ee+ μμ

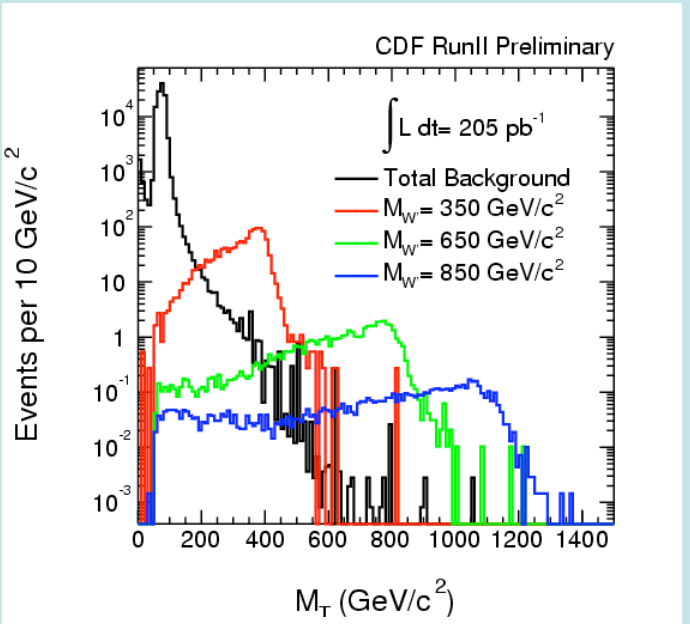


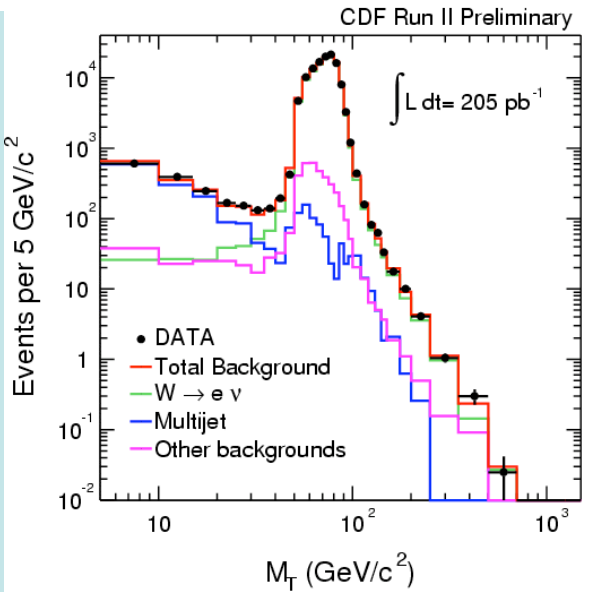
815 GeV/c^2

Geladenes Spin-1 Boson: W'

- Suche nach W'->ev
  - Electron + $\not{E}_t$
- Transversale Masse (e,ν)
- Daten stimmen mit SM uberein:
  - 6 Größenordnungen!
- Können Daten benutzen um W' auszuschließen:
  - M(W')>842 GeV/c²

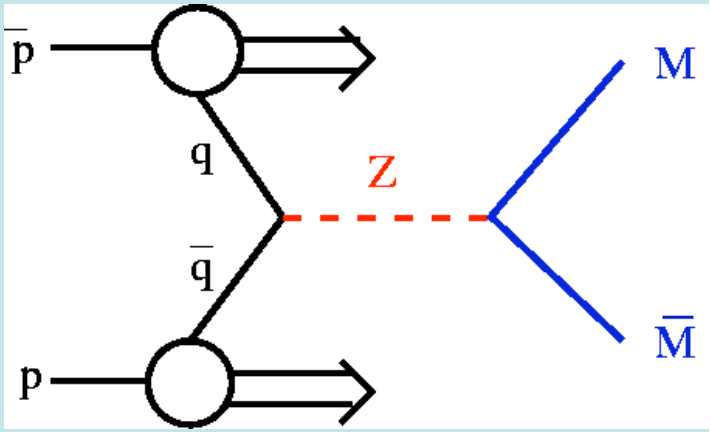
Neu seit ICHEP

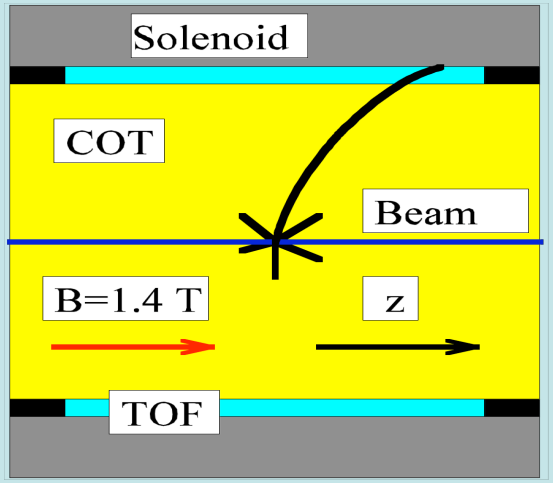




Magnetische Dirac-Monopole

- Magnetische Ladung:
  - $g = n\hbar c/(2e)$ mit n=1: Dirac-Ladung g_D
- hohe Ionisierungsenergie
  - Energieverlust in Materie $\propto$ n (Ladung)
- CDF: $p\bar{p}$->MM+X
  - Hohe Energie TOF Detektor (Trigger)
  - Spur konsistent mit Monopol
- H1: ep->eMMp oder ep->eMMX
  - Monopole, die in Strahlrohr gestoppt haben
- Spins 0 und 1/2





	n=1	n=2	n=6
CDF: $100<m_M<900$ GeV/c^2	<0.25 pb	-	-
H1 : $5<m_M<140$ GeV/c^2	<1-100 pb	<0.1 pb	<0.05 pb

Zusammenfassung

- Breites Spektrum an neuen Resultaten:
  - Higgs, SUSY, Z' und W', Extra Dimensionen, magnetische Monopole + mehr:
    - Stop Produktion: RPV und RPC bei Tevatron
    - Neue und angeregte Fermionen: e*, b', t' bei Tevatron
    - Kontaktwechselwirkungen bei Tevatron
    - Lepton-Flavour Verletzung bei HERA
    - $H^{\pm}$ und $H^{\pm\pm}$ bei Tevatron
    - ...siehe webpages der Experimente

Ausblick

- Kein klarer Hinweis auf neue Teilchen
- Run II läuft gut:
  - Tevatron verdoppelt Datensätze jedes Jahr
  - HERA nimmt jetzt $e^{-}p$ Daten (schon $L \approx 20\ pb^{-1}$)
- Hoffnung auf Hinweise auf neue Teilchen
  - vor dem LHC oder
  - überhaupt

Weitere Informationen in Parallelsitzungen

- T114, Mo 14.00:
  - Neue Ergebnisse vom D0 Experiment (A. Quadt)
- T406, Mo 16.30:
  - Wh->evbb: V. Meder-Marouelli et al. (D0)
  - H->WW->lvlv: M. Hohlfeld et al. (D0)
  - H->WW->mvjj: A. Grohsjean et al. (D0)
- T605, Di 16.45:
  - Gaugino Suchen: C. Nahn Nguyen (ZEUS)
  - Bosonic Stop: A. Vest (H1)
  - GMSB selekrtonen: V. Horn (ZEUS)
- T708, Mi 14.00:
  - RPV neutralinos: D. Kaefer et al. (D0)
  - RPV smuon: C. Autermann (D0)
  - GMSB Selektronen: C. Schwanenberger (H1)
  - SUSY trileptonen ($e\mu$): U. Blumenschein (D0)
  - SUSY trileptonen (τ): C. Noeding (D0)
  - SUSY trileptnonen ($\mu\mu$): M. Binder (D0)
  - Z' Suche: C. Magass (D0)
  - 2. Generation Leptoquarks: R. Stroehmer (D0)