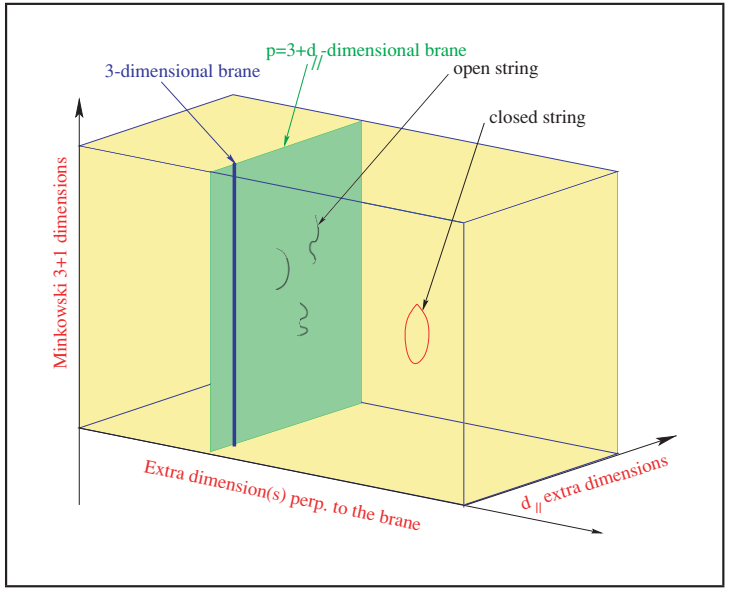
Teilchenphysik mit höchstenergetischen Beschleunigern (Tevatron und LHC)



V15: Andere Erweiterungen des Standard Modells

5. Februar 2008

Richard Nisius (MPP München)

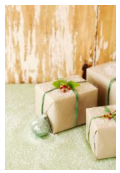
nisius@mppmu.mpg.de

TU München, WS 07/08, S. Bethke und R. Nisius

Max-Planck-Institut für Physik München

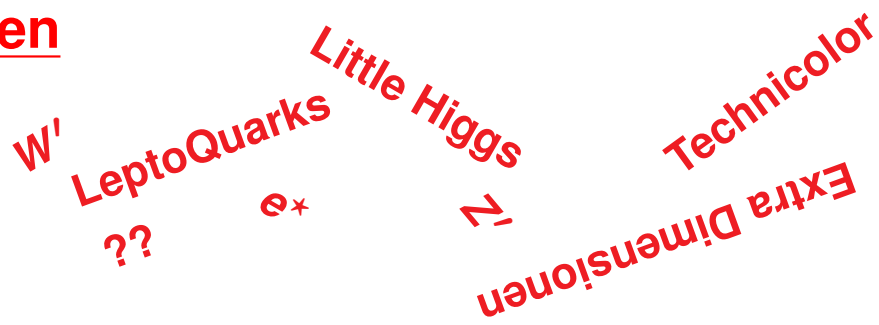
Vorlesungsthemen

1.	Einführung: Stand der Teilchenphysik	16.10.07
2.	Teilchenphysik: offene Fragen und Projekte	23.10.07
3.	Hadronenbeschleuniger: Tevatron und LHC	30.10.07
4.	Teilchendetektoren an Tevatron und LHC (I)	06.11.07
5.	Teilchendetektoren an Tevatron und LHC (II)	13.11.07
6.	Trigger, Datennahme und Computing	20.11.07
7.	Ereignisgeneratoren und Detektor Simulation	27.11.07
8.	QCD, Jets, Strukturfunktionen	04.12.07
9.	Standard Modell Tests	11.12.07
10.	CP-Verletzung	18.12.07


...

11.	Top-Quark Physik	08.01.08
12.	Suche nach dem Higgs-Boson	15.01.08
13.	Supersymmetrie	22.01.08
14.	Ausblick & Zukunftsprojekte	29.01.08
15.	Andere Erweiterungen des Standard Modells	05.02.08

Die Suche nach dem Unbekannten



Generelle Überlegungen

- Der Phasenraum des Unentdeckten ist immens groß.
- Die Möglichkeiten neuer Theorien müssen durch die Forderung nach potentieller Beobachtbarkeit eingeschränkt werden.
- Akzeptable Theorien enthalten im Niederenergielimit das Standard Modell, sind nicht im Konflikt mit existierenden Messungen und sagen neue Ereignisklassen voraus.

Experimentelle Strategien

- **Exklusiv**: Man nehme ein bestimmtes Modell, simuliere das Signal, studiere den Untergrund, prepariere Phasenraum mit gutem $\frac{S}{\sqrt{B}}$, feiere die Entdeckung oder bestimme Ausschlussgrenzen als Funktion der Modellparameter.
- **Inklusiv**: Man prepariere potentiell interessante Phasenraumbereiche, (high p_t Bereiche des Standard Modells, invariante Massenspektren), suche nach Abweichungen vom Standard Modell, interpretiere die Daten im Rahmen verschiedener Modelle.

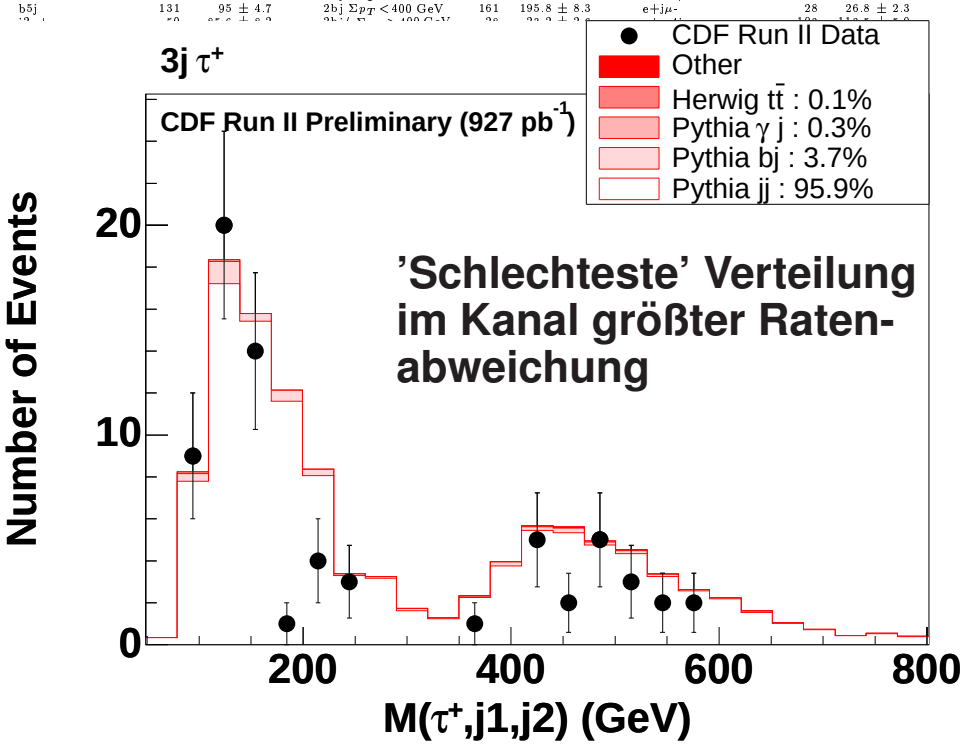
Bei der Suche nach Physik jenseits des SM werden beide Strategien verfolgt.

Modellunabhängige Suche exklusiver Endzustände

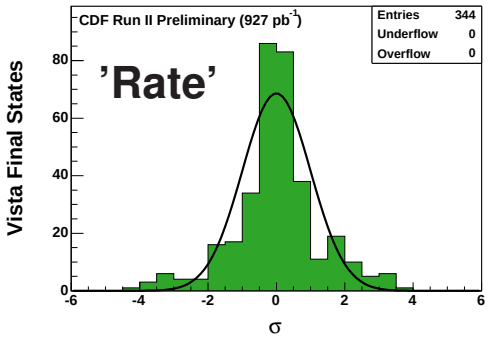
Liste aller untersuchten Topologien

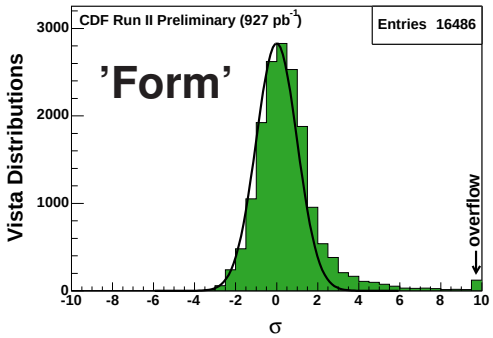
CDF Run II Preliminary (927 pb^{-1})

Final State	Data	Background	Final State	Data	Background	Final State	Data	Background
3jτ+	71	113.7 ± 3.6	2e+j	13	9.8 ± 2.2	e+$\gamma\not{p}$	141	144.2 ± 6
5j	1661	1902.9 ± 50.8	2e+e-	12	4.8 ± 1.2	e+μ-$\not{p}$	54	42.6 ± 2.7
2jτ+	233	296.5 ± 5.6	2e+	23	36.1 ± 3.8	e+μ+$\not{p}$	13	10.9 ± 1.3
be+j	2207	2015.4 ± 28.7	2b $\Sigma p_T > 400$ GeV	327	335.8 ± 7	e+μ-	153	127.6 ± 4.2
3j $\Sigma p_T < 400$ GeV	35436	37294.6 ± 524.3	2b $\Sigma p_T < 400$ GeV	187	173.1 ± 7.1	e+j	386880	392614 ± 5031.8
e+3j$\not{p}$	1954	1751.6 ± 42	2b3j $\Sigma p_T < 400$ GeV	28	33.5 ± 5.5	e+j2γ	14	15.9 ± 2.9
be+2j	798	695.3 ± 13.3	2b2j $\Sigma p_T > 400$ GeV	355	326.3 ± 8.4	e+jτ+	79	79.3 ± 2.9
3j$\not{p}$ $\Sigma p_T > 400$ GeV	811	967.5 ± 38.4	2b2j $\Sigma p_T < 400$ GeV	56	80.2 ± 5	e+jτ-	162	148.8 ± 7.6
e+μ+	26	11.6 ± 1.5	2b2jγ	16	15.4 ± 3.6	e+j$\not{p}$	58648	57391.7 ± 661.6
e+γ	636	551.2 ± 11.2	2bγ	37	31.7 ± 4.8	e+j$\gamma\not{p}$	52	76.2 ± 9
e+3j	28656	27281.5 ± 405.2	2bj $\Sigma p_T > 400$ GeV	415	393.8 ± 9.1	e+jμ-$\not{p}$	22	13.1 ± 1.7
b5j	131	95 ± 4.7	2bj $\Sigma p_T < 400$ GeV	161	195.8 ± 8.3	e+jμ-	28	26.8 ± 2.3



Normierte Abweichungen



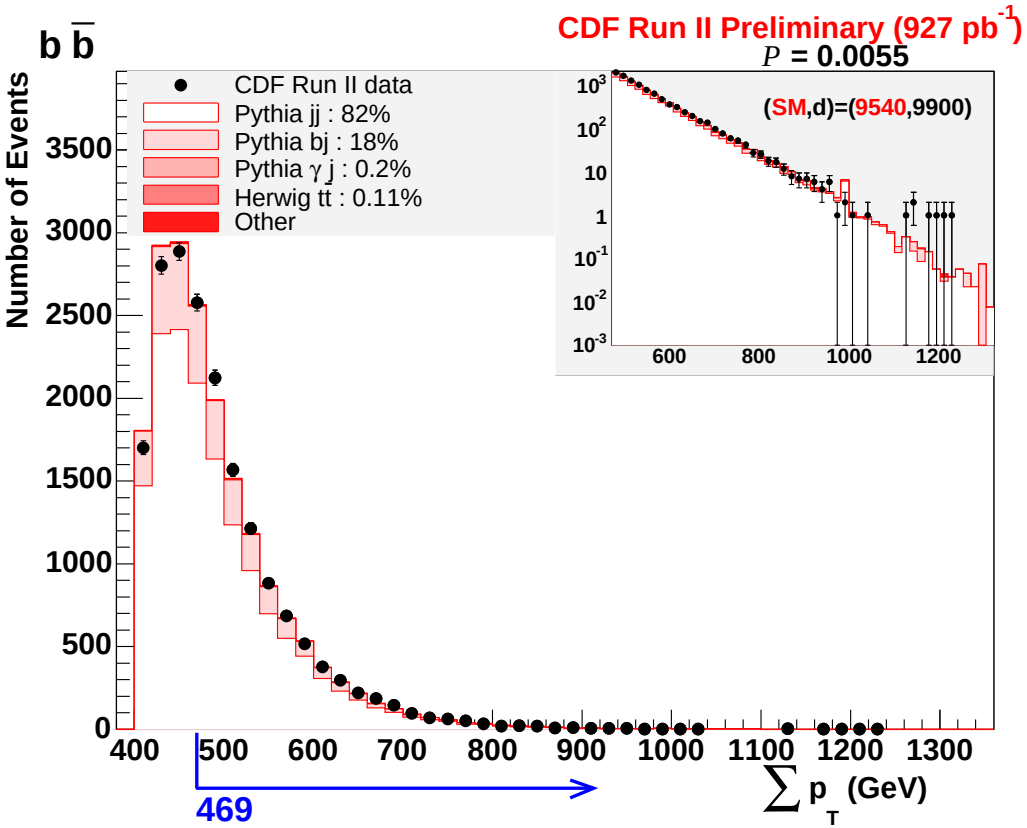


- Identifikation isolierter Objekte: $e^{\pm}$, $\mu^{\pm}$, $\tau^{\pm}$, γ, Jet, b-Jet mit $p_t > 17$ GeV.
- Insgesamt werden 344 exklusive Endzustände mit 16486 Verteilungen untersucht.
- Simulation des vollen Standard Modell Untergrunds plus Korrekturfaktoren.
- χ^2-Vergleich von Raten und Verteilungen, wobei eine Wahrscheinlichkeit kleiner als 1 Promille eine Entdeckung bedeutet.

Es wurden keine signifikanten Abweichungen gefunden.

Suche nach Abweichungen im Bereich hoher Transversalimpulse

Die Verteilung mit der größten Abweichung

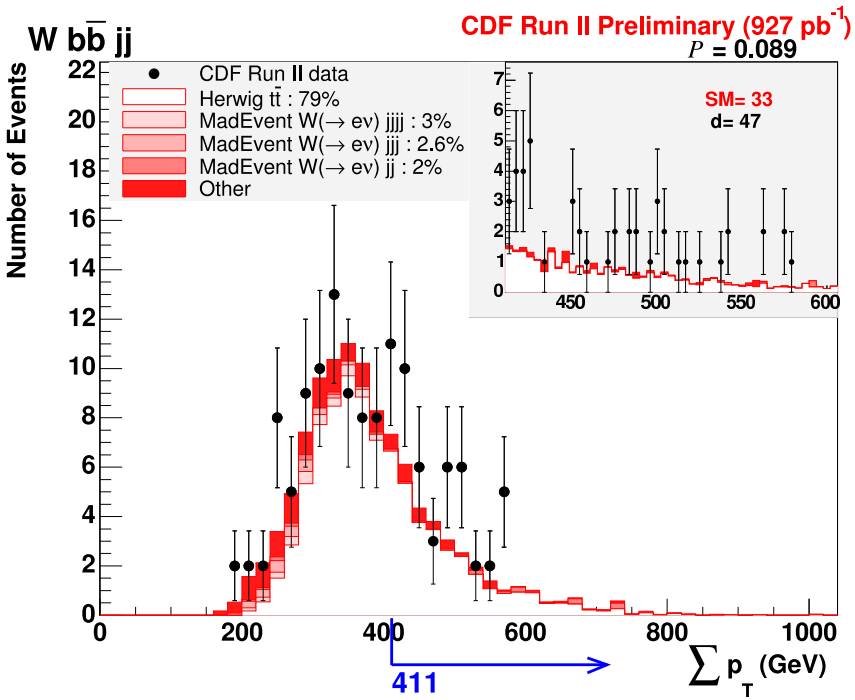


- Annahme: Neue Physik befindet sich bei hohen Transversalimpulsen $\Rightarrow$ studiere die Σp_t Verteilung.
- Kombiniere e und μ Endzustände, nehme nur Topologien mit gerader Anzahl Jets.
- Suche nach $p_{t,i}$ mit maximaler Abweichung in N für $\Sigma p_t > \Sigma p_{t,i}$ mittels der Poissonwahrscheinlichkeit P dafür dass das SM $\geq$ N Ereignisse zu liefert. Resultat: $p_{t,i} = 469\text{GeV}$.
- Nehme Pseudoexperimente aus SM und bestimme P, dass das SM etwas signifikanteres in dieser Verteilung lieferte. Dies ergibt hier $P = 0.55\%$
- Die Wahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Anzahl der untersuchten Verteilungen ist aber bereits $P = 46\%$.

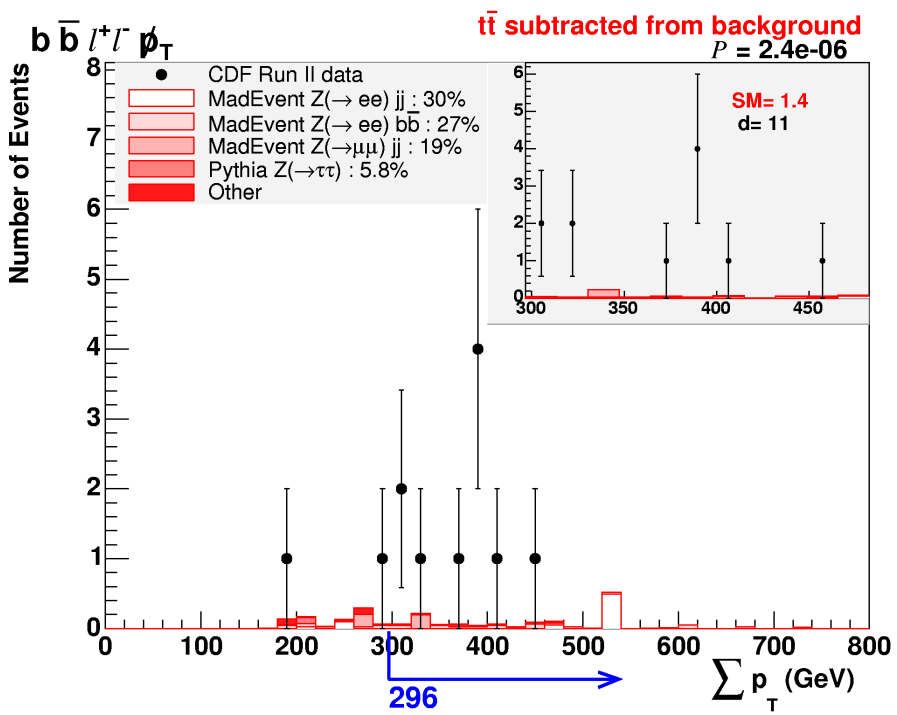
Auch hier wurden keine signifikanten Abweichungen gefunden.

Test der Sensitivität der Suche

Die $t\bar{t}$ Topologie ...



...ohne $t\bar{t}$ Ereignisse

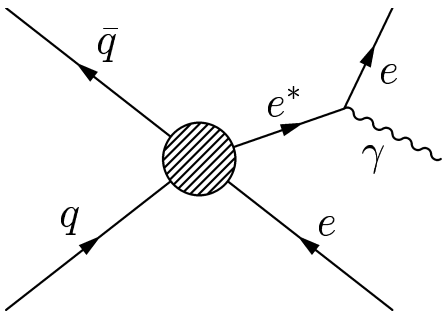


- Die Ereignistopologie $W\,b\bar{b}\,q\bar{q}$ ist durch die $t\bar{t}$ Produktion dominiert ist. Die Wahrscheinlichkeit eine signifikantere Abweichung vom Standard Modell zu finden ist 9%.
- Wenn die $t\bar{t}$ Produktion im Standard Modell vernachlässigt wird, fällt die Wahrscheinlichkeit eine signifikantere Abweichung zu finden auf $2.4 \cdot 10^{-4}$ % $\Rightarrow$ Es existiert ein Signal.

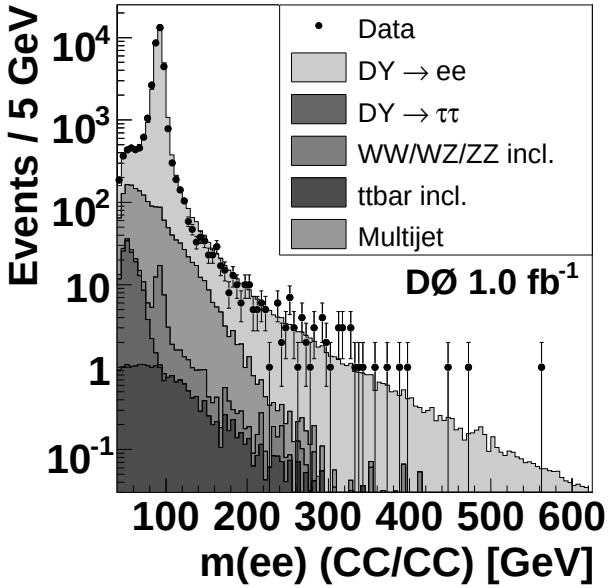
Das Top-Quark Signal wäre bei dieser Analyse entdeckt worden.

Compositeness - Suche nach angeregten Elektronen

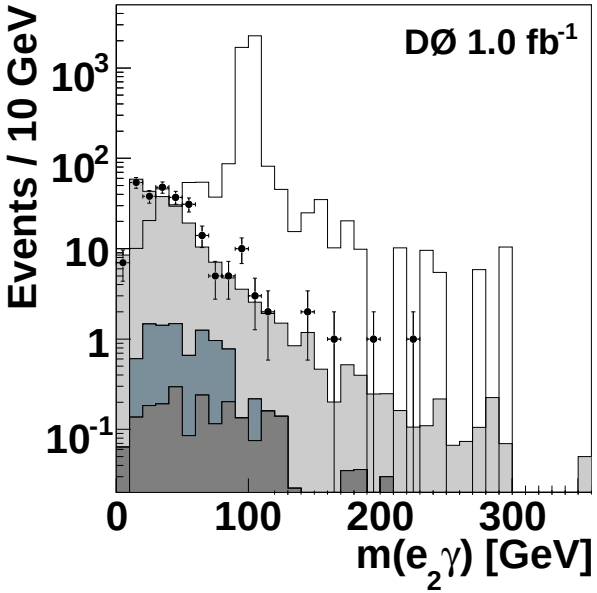
Feynman-Diagramm



Die invariante ee Masse



Die invariante e* Masse

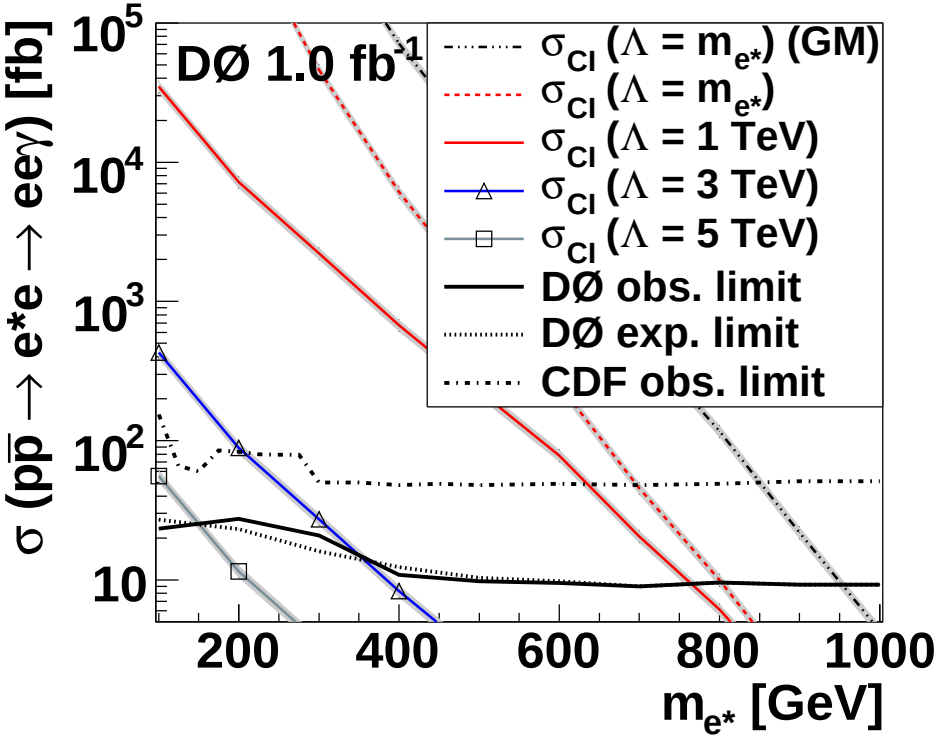


- Annahme: Produktion angeregter Elektronen, $e^\star$, in einer 4-Fermion-Wechselwirkung mit Standard Modell Zerfall des $e^\star \rightarrow e\gamma$. Der WQS ist proportonal zur Compositenessskala Λ.
- Der Untergrund kommt haupsächlich aus der Drell-Yan Reaktion: $p\bar{p} \rightarrow \gamma^*/Z^0 \rightarrow ee\gamma$.
- Suche nach isolierten e e γ im Endzustand mit $p_{t,e_1} / p_{t,e_2} / p_{t,\gamma} > 25 / 15 / 15$ GeV.
- $N_{\text{Daten}} = 259$, $N_{\text{SM}} = 239 \pm 36$ Ereignisse plus zusätzlichem Signal mit $m_{e^\star} = 100$ GeV.

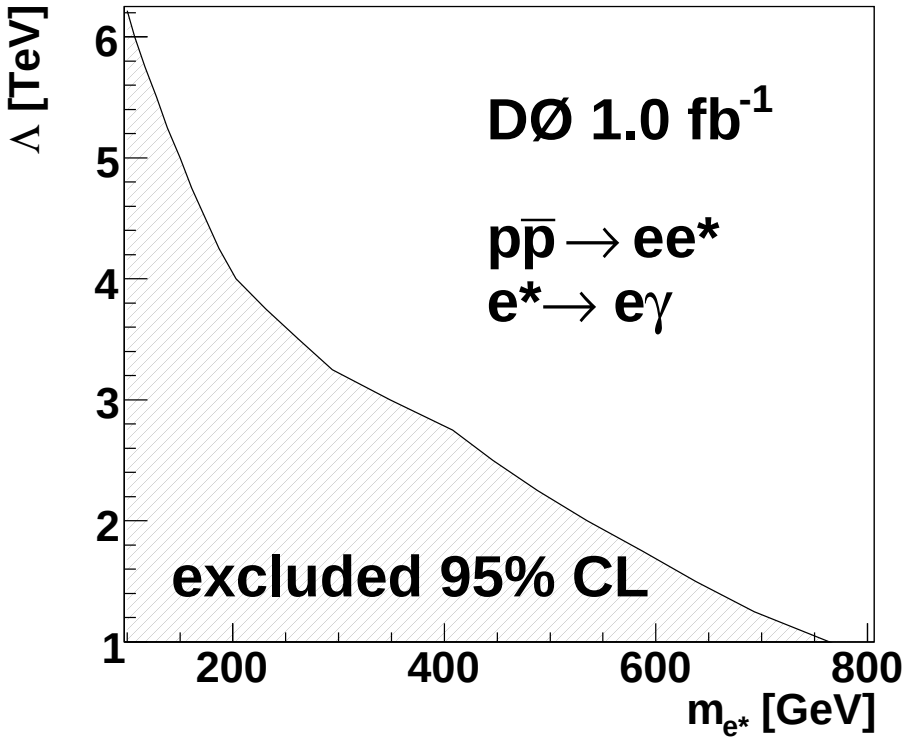
Die Signalregion zeigt keinerlei Überhöhung.

Compositeness - die Ausschlussgrenzen

Grenzen auf $\sigma \cdot BR$



Die Λ — $m_{e^\star}$ Ebene

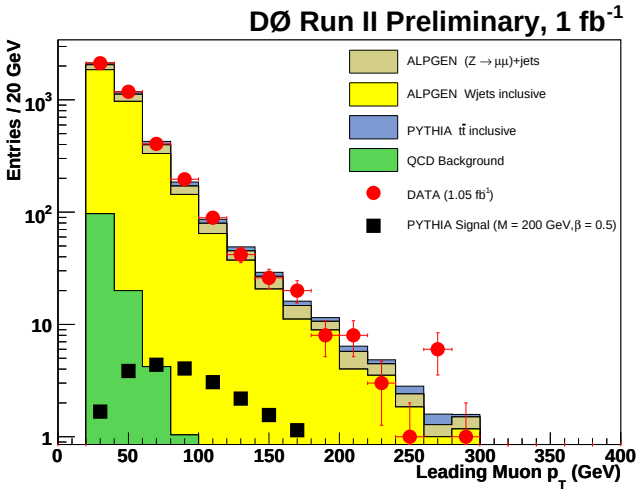


- Die ausgeschlossenen Werte hängen sehr stark von den Modellparametern ab.
- Der ausgeschlossene Bereich reicht von $\Lambda = 6$ TeV bei kleinen Massen, $m_{e^\star}$, für das angeregte Elektron, bis zu $m_{e^\star} > 796$ GeV bei einer Skala von $\Lambda = 1$ TeV.

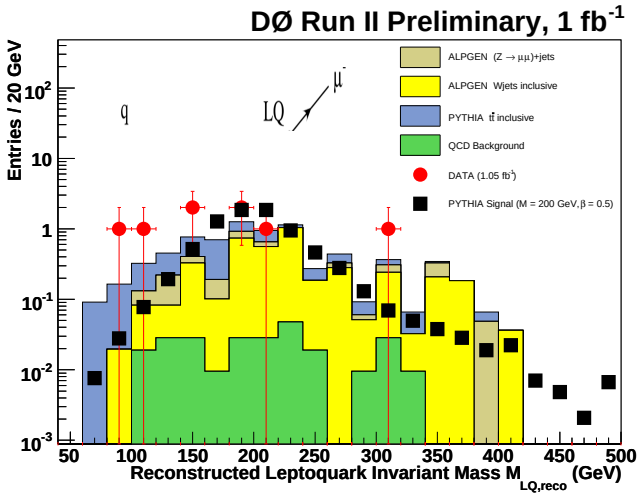
Auch hier wurde kein Signal gefunden.

Suche nach Skalaren Leptoquarks der 2. Generation

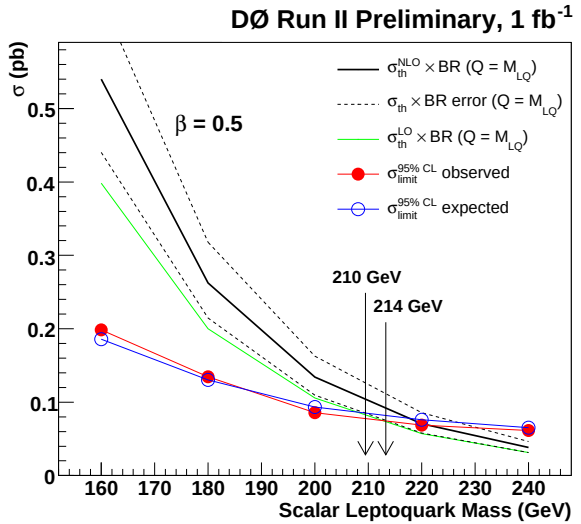
Transversalimpuls des μ



Invariante Masse des LQ



Die Ausschlussgrenzen

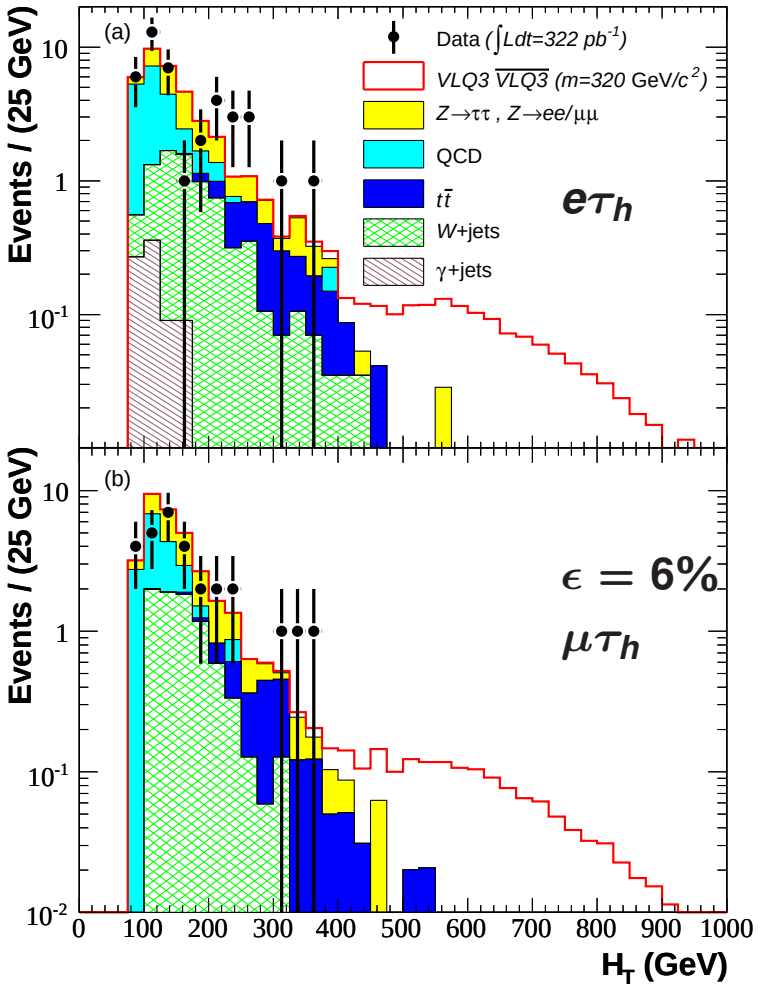


- Die Ladungssumme einer Familie verschwindet, z.B. $\Sigma\,(Q_e + Q_{\nu_e} + 3Q_d + 3Q_u) \equiv 0$.
- Dies muss eine tiefere Bedeutung haben. In vielen Grand Unified Theories (GUT) sind Quarks und Leptonen deswegen in gemeinsamen Multiplett angeordnet, und es werden gebundene Lepton-Quark-Zustände vorhergesagt, die LeptoQuarks (LQ).
- QCD s-Kanal Produktion via $g \to LQ\overline{LQ} \to \mu c\,\nu_\mu \bar{s}$, Zerfall mit $\beta = BR(LQ \to \mu q) \equiv 1$.
- Schnitte: $p_{t,\mu}$ / $p_{t,jet}$ / $E_T^{miss} > 20$ / 25 / 30 GeV und $M_{T,\mu\nu_\mu} > 160$ GeV.
- Hauptuntergrundreaktionen: W+Jets, Z+Jets, $t\bar{t}$. Ergebnis: Es wurde kein Signal gesehen.

Diese Sorte Leptoquarks ist damit bis zu einer Masse von 214 GeV ausgeschlossen.

Suche nach Vektor (S=1) Leptoquarks der 3. Generation

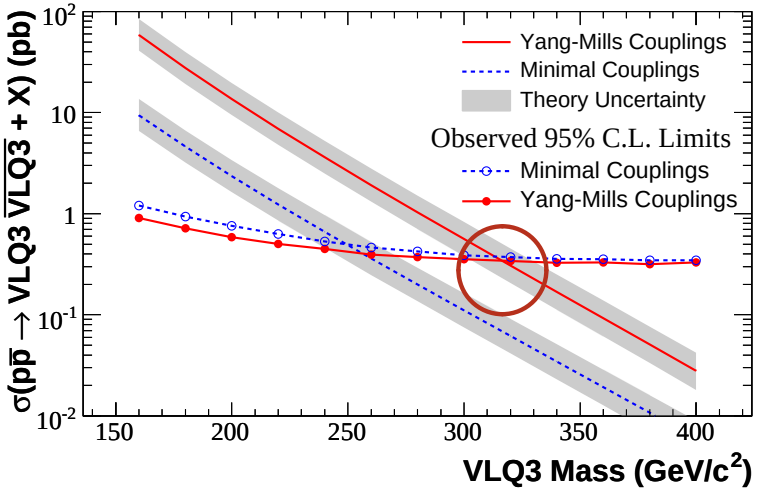
Die Datenverteilung



Details der Analyse

- Annahme: Nur ein Zerfallskanal $BR(LQ \to \tau\, b) = 1$.
- Signal: $LQ\overline{LQ} \to (e/\mu\, b)\,(\tau_h\, b)$ mit $\tau_h = \tau \to$ had.
- Schnitte: $p_{t,jet} > 15$ GeV, $E_T^{miss} > 10$ GeV, kein b-tag aber Z-Veto: $76 < m_{\ell,\chi}/\text{GeV} < 106$.
- Das Signal mit $m_{LQ} = 320$ GeV wäre gut zu sehen.
- Die Daten sind mit der SM Vorhersage verträglich.

Die Grenzen auf $\sigma \cdot BR$



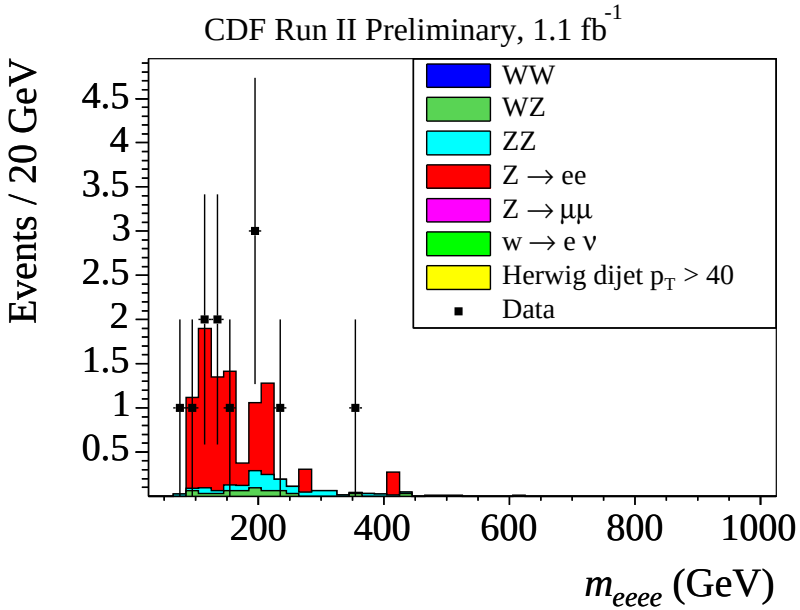
$\sigma < 344$ fb

$m_{LQ} > 317$ GeV

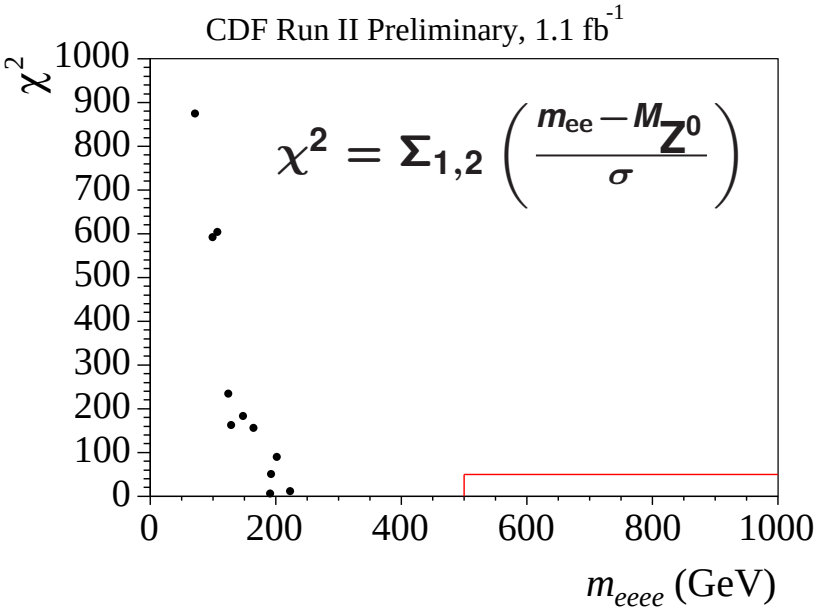
Es wurden keine Leptoquarks entdeckt.

Gravitonzerfall in vier Elektronen - die Suche

Invariante Masse der 4-Elektronen



Güte der Z-Fits

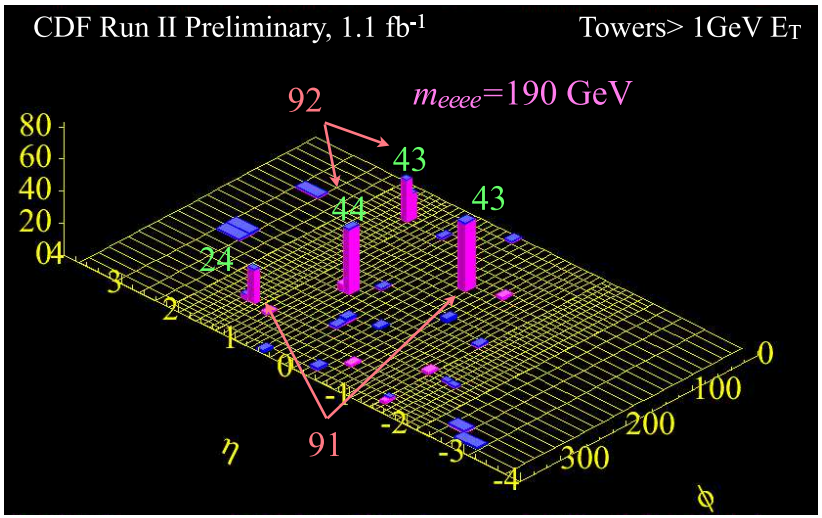


- Signal: $G \rightarrow Z^0Z^0 \rightarrow$ 4e mit $m_G > 500$ GeV, $\sigma \approx 0.5$ fb. Deswegen ist hohe Elektronselektionseffizienz nötig. Die Reinheit wird durch eine Z-Massenzwangsbedingung erreicht.
- Selektion: $m_{Z^0Z^0} > 500$ GeV und $\chi^2 < 50$. Dies ergibt $\epsilon = 50\%$ aber kein Signalereignis.
- Untergrund: Z^0 Z^0 Produktion $\sigma \approx 0.007$ fb zu klein. Deswegen erfolgt die Abschätzung aus hadronischen Fakes mit ähnlicher Kinematik zu $Bgd = 0.02 \pm 0.02$ Ereignissen.

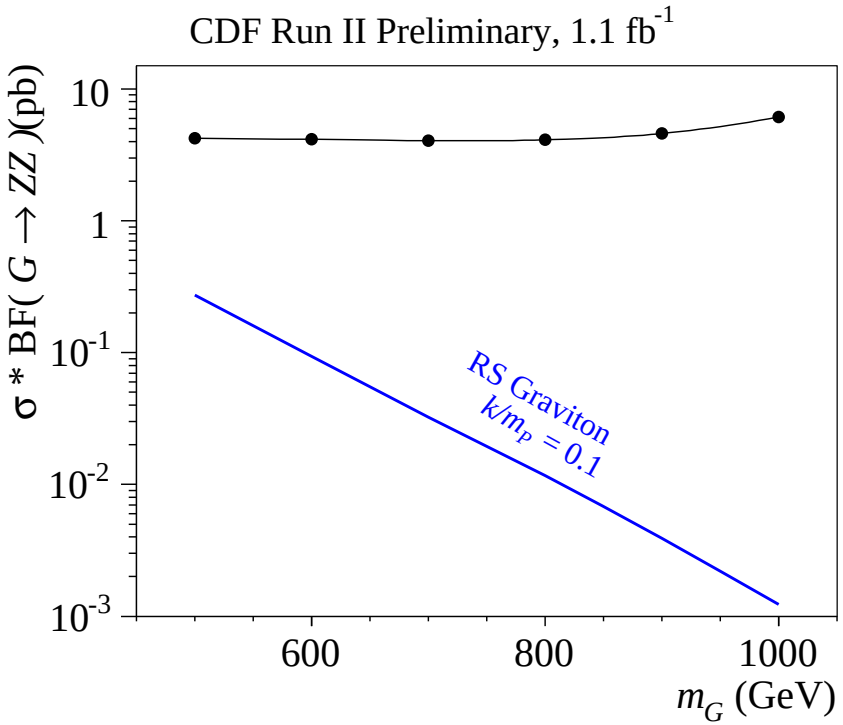
Die Signalregion zeigt keinen Hinweis auf Gravitonzerfälle.

Gravitonzerfall in vier Elektronen - das Resultat

Das Ereigniss mit dem besten χ^2



Die Ausschlussgrenzen



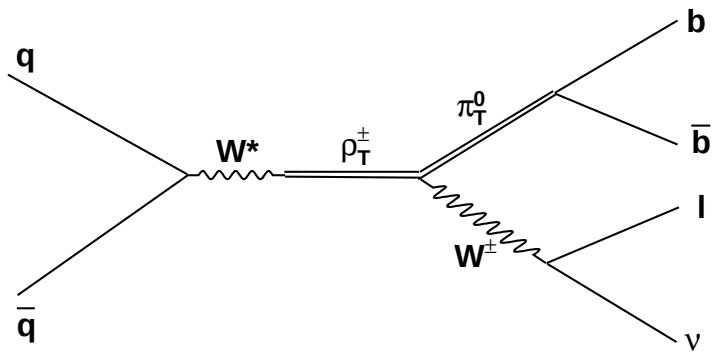
— $M_{4e} = 190$ GeV. Das Ereignis ist konsistent mit Z^0 Z^0-Produktion.

— Die obere Grenze für $\sigma \cdot BR$ liegt bei etwa 4 pb für $500 < M_G < 100$ GeV. Dies ist weit oberhalb der Erwartung.

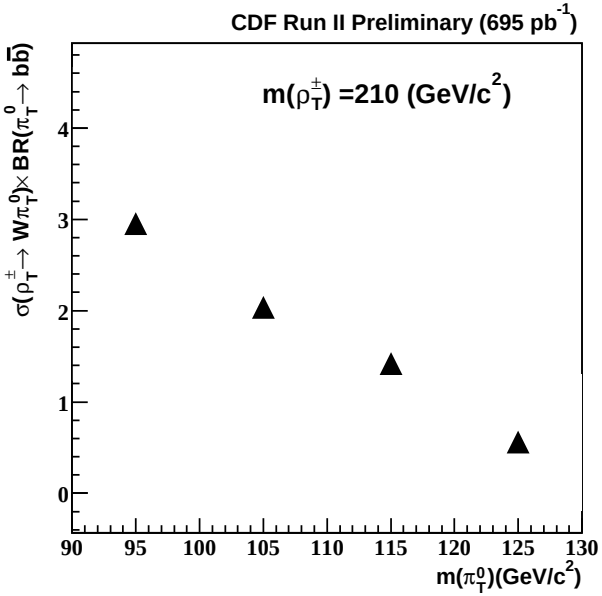
Die Suche ist erfolglos gewesen, und auch noch nicht sensitiv genug.

Technicolor - Die Idee

Das Feynman Diagram



Vorhersage für $\sigma \cdot BR$



— Die Brechung der elektroschwachen Theorie erfolgt dynamisch durch eine neue Wechselwirkung, Technicolor. Die Goldstone Bosonen der Theorie werden in die longitudinalen Freiheitsgrade der Eichbosonen transformiert.

— Die Theorie enthält neue Teilchen, Skalare- wie das π_T, und Vektor-Technifermionen wie das ρ_T. Diese Technifermionen zerfallen dann in Standard Modell Teilchen.

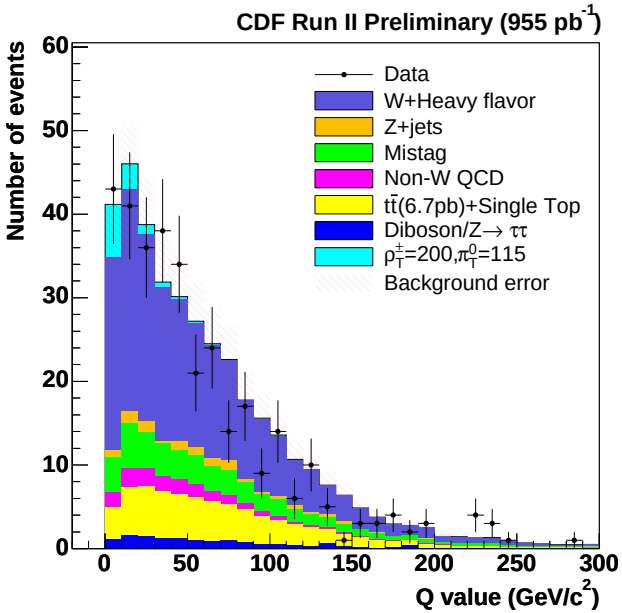
— Der Wirkungsquerschnitt ist eine Funktion der Massen der Technifermionen.

— Typische Schnitte am Tevatron: $p_{t,\ell} > 20$ GeV, $E_T^{miss} > 25$ GeV und $p_{t,jet} > 15$ GeV. Das ergibt eine Selektionseffizienz von etwa 1%.

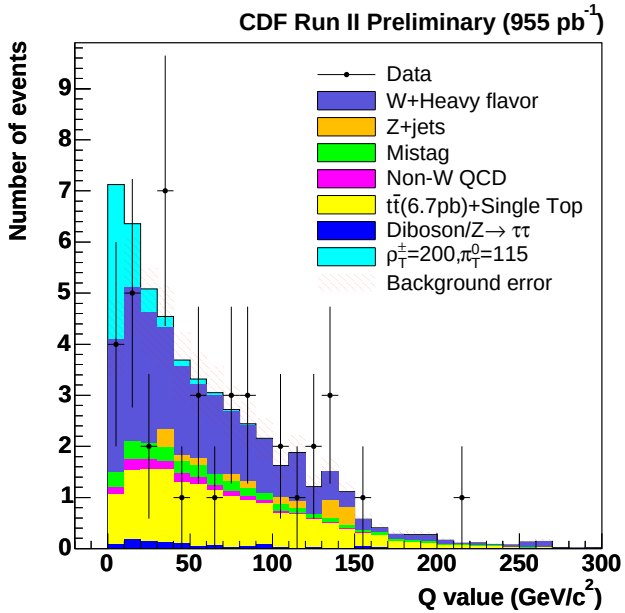
Technicolor wurde schon 1979 von Weinberg und Susskind vorgeschlagen.

Technicolor - Suche nach einer Resonanz im e+Jets Kanal

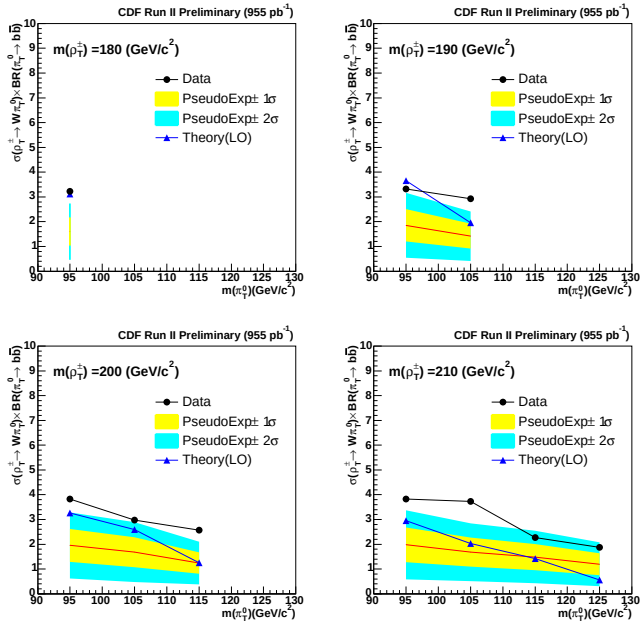
Ereignisse mit einem b-Jet



Ereignisse mit zwei b-Jets



Die Ausschlussgrenzen

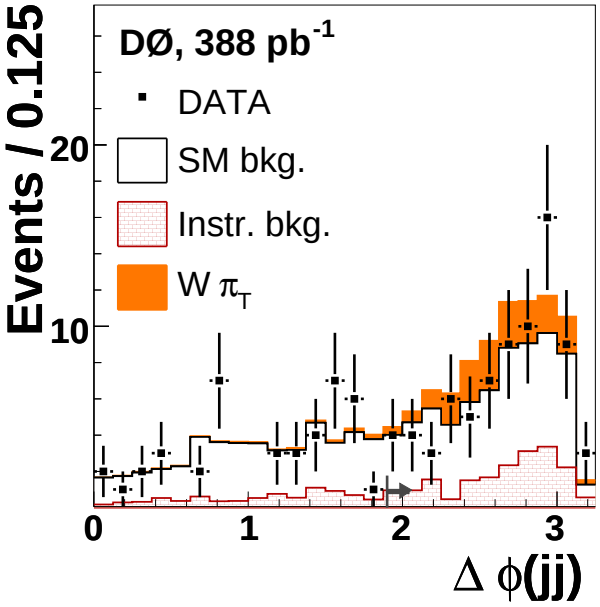


- Der Q-Wert des Zerfalls $Q = m_{\rho_T} - m_{\pi_T} - m_W$ sollte für das Signal verschwinden.
- Die Ereignissklasse mit zwei b-Jets hat eine bessere Sensitivität für das Signal.
- Da die Daten mit der Untergrunderwartung verträglich sind, werden Ausschluss-grenzen als Funktion der Massen m_{ρ_T} und m_{π_T} bestimmt.
- Die erreichten Limits sind vorallem bei kleinem m_{π_T} leicht besser als die aus Pseudoexperimenten erwarteteten Limits.

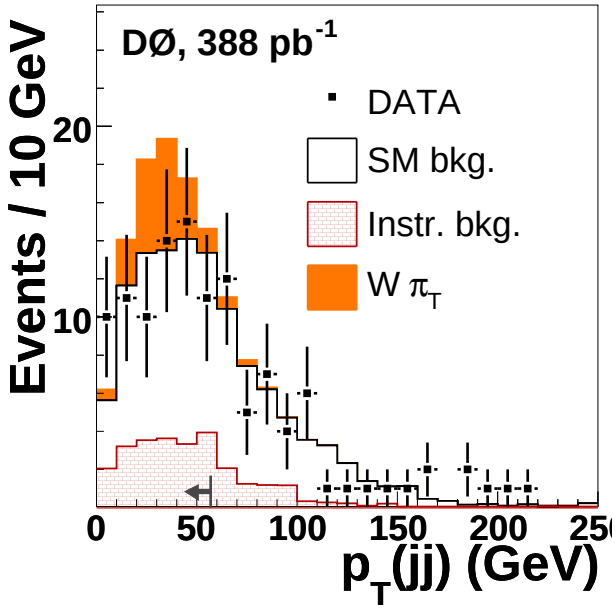
Die Limits auf $\sigma \cdot BR$ ist nur leicht schlechter als die theoretische Vorhersage.

Technicolor - Suche nach einer Resonanz im e+Jets Kanal

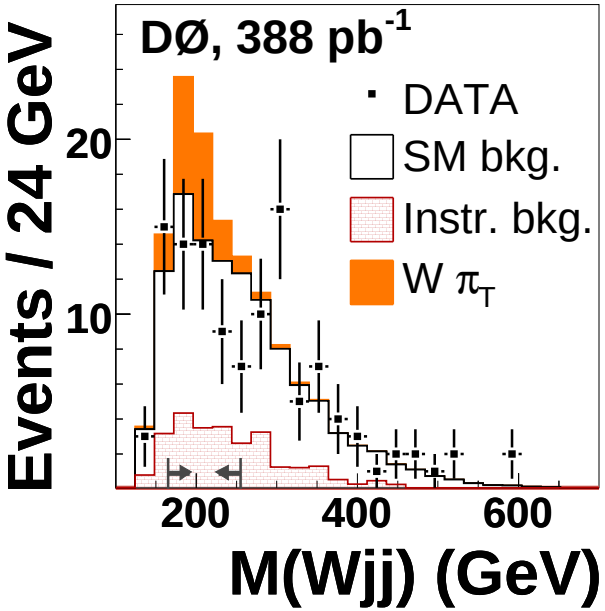
Jet Öffnungswinkel



Tranversalimpuls des Jetpaars



Masse des Technirhos

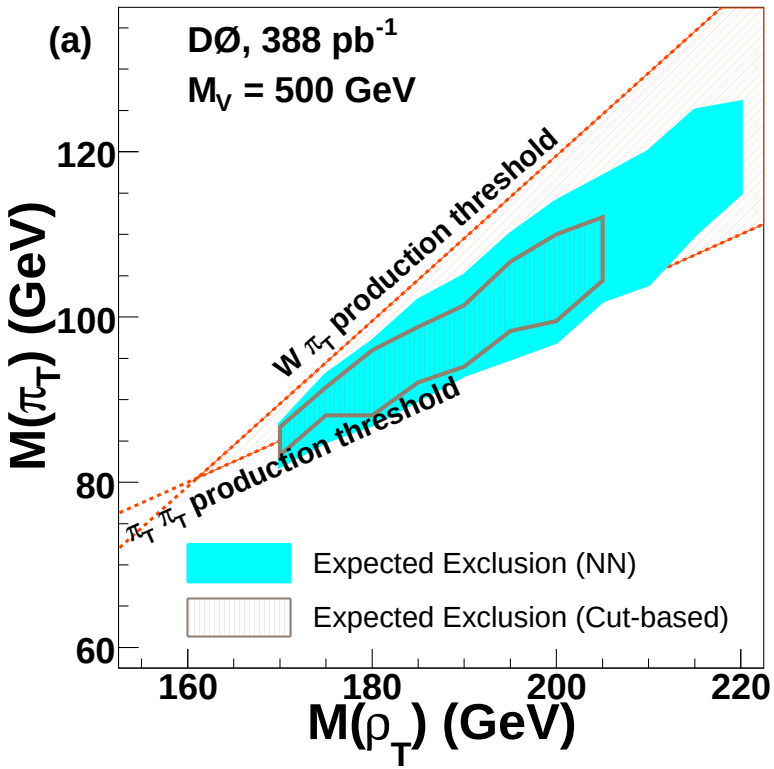


- Die Signalreaktion ist: $\rho_T \rightarrow W\pi_T \rightarrow e\nu_e$ ($b\bar{b}$, $b\bar{c}$, $c\bar{b}$).
- Die Selektionsschnitte sind $p_{t,e}$ / $p_{t,jet}$ / $E_T^{miss} > 20$ / 20 / 20 GeV, $M_{T,e\nu_e} > 30$ GeV, genau 2-Jets und davon mindestens ein identifizierter b-Jet.
- Das simulierte Signal mit $M_{\rho_T} = 210$ GeV wäre gut sichtbar.
- Es wurde eine schnittbasierte und eine Analyse mit einem Neuronalem Netzt durchgeführt.

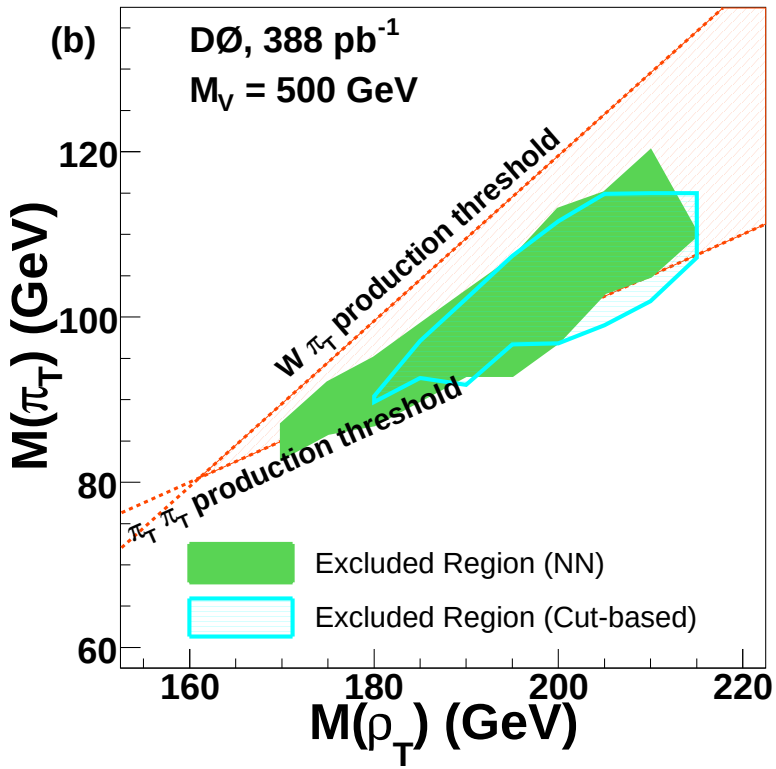
Die Daten zeigen keinen Hinweis auf ein mögliches Signal.

Technicolor - erwartete und tatsächliche Ausschlussgrenzen von D0

Erwarte Ausschlussgrenzen



Gemessene Ausschlussgrenzen



- Die Massenskala für die Vektorkopplungen wurde zu $M_V = 500$ GeV angenommen.
- Wenn der Zerfall $\rho_T \rightarrow \pi_T \pi_T$ möglich ist, fällt die Zerfallsrate für $\rho_T \rightarrow W\pi_T$ stark ab.
- Die erwarteten und tatsächliche Ausschlussgrenzen stimmen recht gut überein.

Die Analyse mit dem Neuronalen Netz hat eine leicht höhere Sensitivität.

Zusammenfassung

- Das Standard Modell ist sehr erfolgreich, hat aber einige fundamentale Schwächen. Deswegen ist es unumgänglich, dass das SM erweitert werden muss.
- Zulässige Modelle für Physik jenseits des SM müssen das SM bei niedriger Energie enthalten, nicht im Widerspruch zu den Daten stehen und Neue Phänomene vorhersagen.
- Es wurde im Rahmen von GUTs nach LeptoQuarks gesucht, so wie unter der Annahme, dass die SM Teilchen nicht elementar sind, nach angeregten Zuständen wie dem $e^{\star}$.
- String Theorie und Extra Dimensionen erlauben eventuell eine Vereinheitlichung des SM mit der Gravitation. Die vorhergesagten Zustände wurden aber nicht entdeckt.
- Technicolor liefert eine Möglichkeit die spontane Symmetriebrechung dynamisch zu generieren. Die vorhergesagten Technifermionen wurden aber bis heute nicht gefunden.
- Alle Suchen nach Neuer Physik waren bis heute negativ. Mit dem LHC wird in diesem Jahr die Tür zu höheren Energien und großen Luminositäten weit aufgestossen.

Nächste Vorlesung: SS08, Vorlesung 1, Do 17. April 10:15 Uhr.