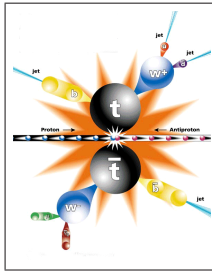


Teilchenphysik mit höchstenergetischen Beschleunigern (Tevatron und LHC)



V11: Top-Quark Physik

8. Januar 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

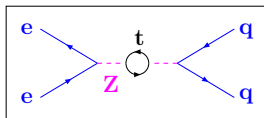
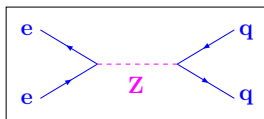
1. Einführung: Stand der Teilchenphysik 16.10.07
 2. Teilchenphysik: offene Fragen und Projekte 23.10.07
 3. Hadronenbeschleuniger: Tevatron und LHC 30.10.07
 4. Teilchendetektoren an Tevatron und LHC (I) 06.11.07
 5. Teilchendetektoren an Tevatron und LHC (II) 13.11.07
 6. Trigger, Datennahme und Computing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

Das Top-Quark im Standardmodell

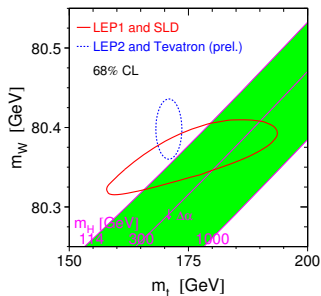
Bekannte Generationen

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	ν_e e-Neutrino	ν_μ μ -Neutrino	ν_τ τ -Neutrino
Leptons	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III

Situation vor der Entdeckung



Einschränkung des Higgs



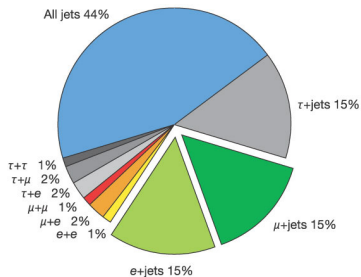
- Nach der Entdeckung des Bottom (1977) war im SM klar, dass es das Top geben muss.
- Da die Beschleunigerenergien zur direkten Produktion nicht ausreichten, kam die einzige Information, $M_t = (172.6^{+13.2}_{-10.2})$ GeV, aus der Größe der virtuellen Korrekturen zum Z^0 .
- Mit dem präzisen Wert von heute, $M_t = (170.9 \pm 1.8)$ GeV, liefert das Top-Quark im SM eine starke Einschränkung auf den erlaubten Massenbereich des Higgs-Bosons.

Wegen seiner großen Masse spielt das Top-Quark eine zentrale Rolle im Standardmodell.

Eigenschaften des Top-Quarks

- Die Zerfallsbreite: $\Gamma = \frac{G_F}{8\pi\sqrt{2}} m_t^3 \cdot \left(1 - \frac{M_W^2}{m_t^2}\right)^2 \cdot \left(1 + 2\frac{M_W^2}{m_t^2}\right) = 1.55 \text{ GeV}$.
- Die Lebensdauer: $\tau = \frac{\hbar}{\Gamma} = \frac{6.58 \cdot 10^{-16}}{1.55 \cdot 10^9} \text{ s} = 4.2 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ ist wesentlich kleiner als die Zeit zur Hadronformation $t \approx \frac{\hbar}{\Lambda} \approx 6 \cdot 10^{-24}$. Das Top-Quark zerfällt also als freies Teilchen.
- Am Tevatron erfolgt die $t\bar{t}$ Produktion zu etwa 85% im Kanal $q\bar{q} \rightarrow Z/\gamma \rightarrow t\bar{t}$.
- Da $V_{tb} \approx 1$ werden die Top-Zerfälle $t\bar{t} \rightarrow W^+W^-b\bar{b}$ durch die W Zerfälle klassifiziert.

Es gilt: $W^+ \rightarrow (e^+\nu_e), (\mu^+\nu_\mu), (\tau^+\nu_\tau), N_c \cdot (u\bar{d}), N_c \cdot (c\bar{s})$.

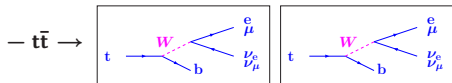


- Das sind 9 Kanäle, also 81 Möglichkeiten für den Zerfall $W^+W^- \rightarrow f\bar{f}$. Man benutzt $q\bar{q}q\bar{q} = 6 \times 6 = 36$, $q\bar{q}l\nu_l = 6 \times 4 = 24$ und $l\nu_l l\nu_l = 2 \times 2 = 4$ mit $l = e, \mu$, da τ Zerfälle in $p\bar{p}$ Reaktionen schlecht zu messen sind.
- Die Bestimmung der Top-Masse ist wichtig, da eine Genauigkeit in der Top-Masse von 1 GeV etwa die selbe Einschränkung der Higgs-Masse liefert wie eine Messung der W-Masse auf 7 MeV.

Die Messung von Leptonen, Jets und fehlender Transversalenergie ist wichtig.

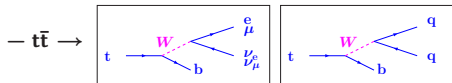
Die verschiedenen Ereignisklassen

Di-lepton Kanäle



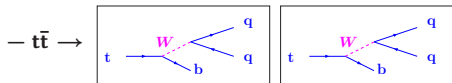
- Elektronen und Myonen sind leicht zu identifizieren, aber kleine Rate. Die Analysen verlangen isolierte Leptonen + E_T^{miss} . Der Hauptuntergrund ist W + N-Jets.

Lepton + Jets (semileptonische) Kanäle



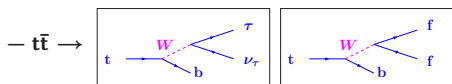
- Klares Signal mit wenig Untergrund. Die Analysen verlangen isoliertes Lepton + Jets ($p_t > 15 - 20 \text{ GeV}$) + E_T^{miss} . Der Hauptuntergrund ist W + N-Jets.

Hadronische Kanäle



- Größte Zerfallsrate, aber riesiger Untergrund von QCD N-Jetproduktion, deswegen größere Unsicherheiten als Lepton + Jets Kanal.

Kanäle mit τ -Leptonen

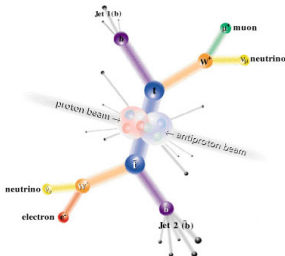


- τ -Zerfälle sind schwer zu identifizieren, deswegen ist dieser Kanal nie Signal, sondern Untergrund in allen Analysen.

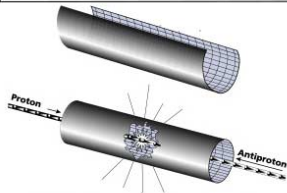
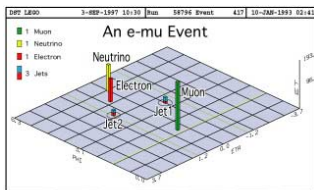
Alle Zerfallskanäle werden im Detail untersucht.

Die Signatur im Di-leptonischen Kanal

Die Prinzipskizze

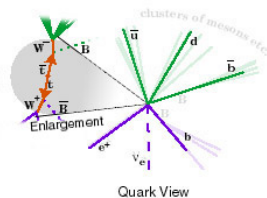


Der Energiefluß



Collision in Calorimeter

Die Rekonstruktion



Quark View

Der Gang der Dinge:

$$1) p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}$$

$$2) t \rightarrow W^+ b$$

$$\bar{t} \rightarrow W^- \bar{b}$$

$$3) W^+ \rightarrow \mu^+ \bar{\nu}_\mu$$

$$W^- \rightarrow e^- \nu_e$$

Die Entdeckung

- Tevatron $p\bar{p}$ bei $\sqrt{s} \approx 1800$ GeV
- Experimente CDF und D0

Das Top-Quark wurde 1995 am Fermilab entdeckt.

Erste Hinweise of das Top

Ein Ereignis aus dem Jahr 1992

$e + 4$ jet event

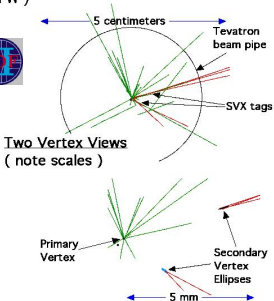
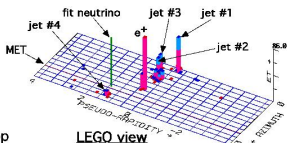
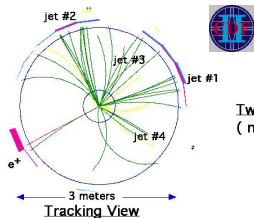
40758_44414

24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

fit top mass is 170 ± 10 GeV e^+ , Missing E_T , jet #4 from top

jets 1,2,3 from top (2&3 from W)



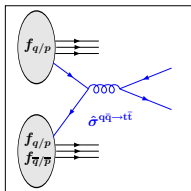
Die Selektionskriterien

- Messung eines isolierten Leptons zur Ereigniskennzeichnung.
- Indiz auf Neutrino durch fehlende Transversalenergie.
- 4-Jet Ereignisse für $b\bar{b}$ und $W \rightarrow qq'$.
- b-Quark Hinweise aus sekundären Zerfallspunkten.
- W-Boson aus der Resonanzstruktur in der 2-Jet invarianten Masse.
- Top-Masse aus der Resonanzstruktur in der 3-Jet invarianten Masse.
- Hauptuntergrund is W + N-Jets mit nicht resonanter Massenverteilung.
- Effizienz $\approx 7\%$ und S/N ≈ 2.4 .

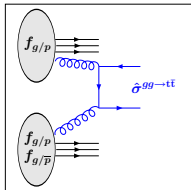
Eine recht klare Signatur mit beherrschbarem Untergrund.

Top-Quark Paar Wirkungsquerschnitt am Tevatron und LHC

Häufigkeit der Produktionskanäle

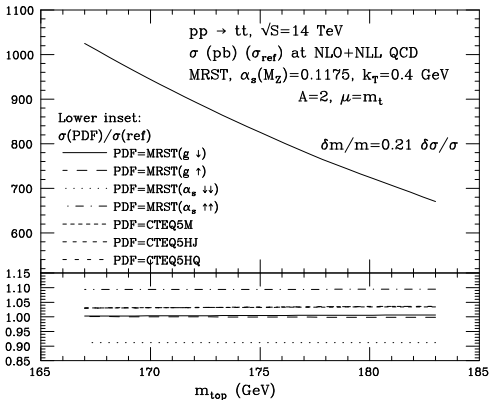


$q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}$: Tevatron: 85%, LHC 5%.



$gg \rightarrow t\bar{t}$: Tevatron: 15%, LHC 95%.

Der Wirkungsquerschnitt am LHC

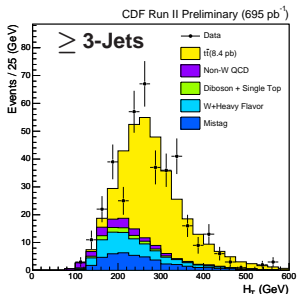


$\mathcal{L}_{\text{int}} = 5$ (500)/fb und $\sigma(t\bar{t}) = 8$ (800) pb ergeben
 40k (400M) Ereignisse bei Tevatron (LHC).

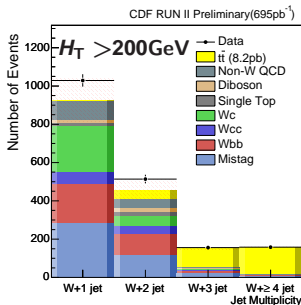
Die Ereignisrate der Top-Quark Paarproduktion ist sehr hoch.

Wirkungsquerschnitt im semileptonischen Kanal

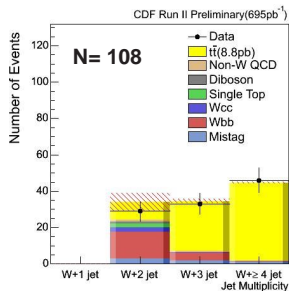
Die selektierten Ereignisse



Mindestens 1 b-Jet



Ereignisse mit 2 b-Jets

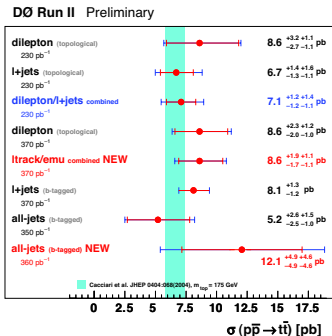


- **Signal:** $E_T^\ell > 20 \text{ GeV}$, $E_T^{\text{miss}} > 20 \text{ GeV}$, $E_T^{\text{jet}} > 15 \text{ GeV}$. **Hauptuntergrund:** W + N-Jets.
- Gute Unterscheidung durch $H_T = \sum_{\text{Jets}}^{E_T > 8, |\eta| < 2.4} E_T + E_T^\ell + E_T^{\text{miss}}$.
- b-Jet Identifizierung durch sekundäre Zerfallspunkte mit $L > 7.5 \sigma_L$.
- Gefordert wird entweder $H_T > 200 \text{ GeV}$ und ein identifizierter b-Jet, oder zwei b-Jets.
- **Resultat:** $\sigma_{t\bar{t}} = 8.2 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 1.0(\text{sys}) \text{ pb}$.

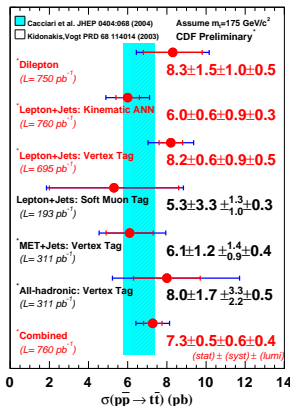
Dies ist mit etwa 14% Genauigkeit die zur Zeit präziseste Messung.

Zusammenfassung aller Messungen des Wirkungsquerschnitts

Resultate von D0



Resultate von CDF



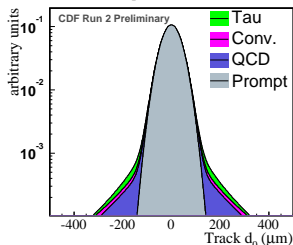
- Laufende Verbesserung der Messungen unter Einschluss von immer mehr Daten.
- Konsistente Messungen mit verschiedenen Methoden in allen Zerfallskanälen.
- Die präzisesten Resultate erzielt man im semileptonischen Kanal.

Der Paarwirkungsquerschnitt am Tevatron ist auf etwa 10% genau bestimmt.

Bestimmung der Lebensdauer

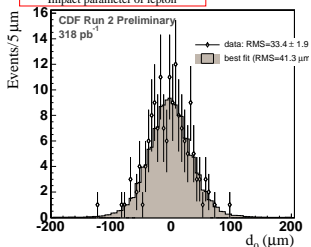
Elektron Untergrund

Electron BG Template

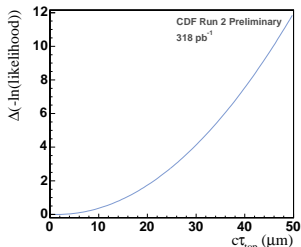


Die Datenverteilung

Impact parameter of lepton



Likelihood vs Zerfallslänge

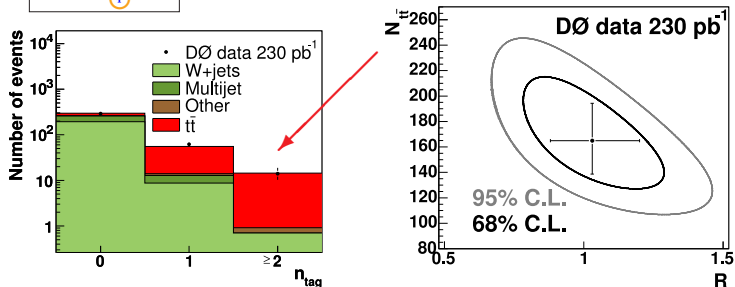


- Falls das Top-Quark eine längere Lebensdauer hat, oder langlebige Teilchen in Top-Quarks zerfallen, starten die Leptonen aus dem W-Zerfall nicht vom $p\bar{p}$ Wechselwirkungspunkt.
- Die Güte der Lebensdauerermesung wird durch die Impaktparameterauflösung σ_{d_0} bestimmt.
- **Signal:** Semileptonische (97 e, 68 μ) Ereignisse mit identifizierten b-Jets für $\mathcal{L}_{\text{int}} = 318/\text{pb}$.
- Auflösung aus den $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ Daten, d_0 Templates aus Simulationen für verschiedene $c\tau$ Werte, Anpassung von wahrscheinlichstem $c\tau$ durch Likelihood Funktion.
- **Resultat:** $c\tau < 52.2 \mu\text{m}$, bei einer Standard Modell Erwartung von $c\tau \approx 10^{-10} \mu\text{m}$.

Kein Hinweis auf langlebige Top-Quarks oder neue schwere Teilchen mit Topzerfällen.

Das Verzweigungsverhältnis $t \rightarrow b$ im $e(\mu)+$ Jets Kanal

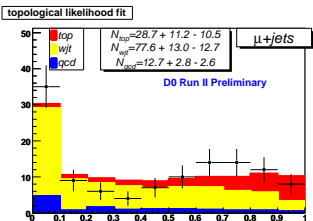
$$R = \frac{\text{Diagramm 1}}{\text{Diagramm 2}} = \frac{|V_{tb}|^2}{|V_{tb}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{td}|^2}, \quad \text{SM: } 0.9980 \leq R \leq 0.9984 \text{ mit } 90\% \text{CL.}$$



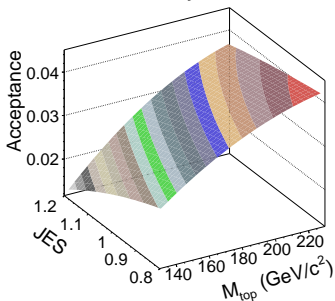
- Simulation von $t\bar{t} \rightarrow W^+W^- + b\bar{b} / bq / q\bar{q}$ Ereignissen zur Bestimmung der (Mis)-Tag-Wahrscheinlichkeiten. Simultane Anpassung von $N_{t\bar{t}}$ und R .
- **Resultat:** $R = 1.02^{+0.19}_{-0.17}$ Dies bedeutet: $R > 0.61$ und $|V_{tb}| > 0.78$ mit 95%CL.

Auch hier wurde keine Abweichung vom Standardmodell gefunden.

Top-Quark Massenbestimmung



CDF Run II Preliminary



Generelle Überlegungen

- Die Top-Quark Masse ist ein wichtiger Parameter des SM.
- Es gibt Messungen in allen Kanälen: Di-Lepton = $\ell\nu_\ell \ell\nu_\ell$, Lepton + Jets = $\ell\nu_\ell q\bar{q}$ und Hadronisch = $q\bar{q} q\bar{q}$.
- Es gibt eine Reihe von Methoden: Template, ...
- Die beste Genauigkeit erzielt man mit Anpassungen in multidimensionalen Räumen.
- In den genauesten Messungen ist die Messgenauigkeit durch systematische Unsicherheiten limitiert.

Systematische Limitierung

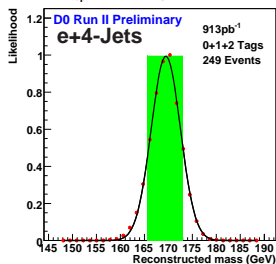
- Der wichtigste Beitrag kommt von der Jet-Energie-Skala (JES), die oft zusammen mit der Masse angepasst wird.
- Messungen mit verschiedenen systematischen Unsicherheiten werden als Konsistenzproben der präzisesten Messungen verwendet.

Die Messungen werden Schritt um Schritt genauer.

Top-Quark Massenbestimmung - Matrixelement Methode

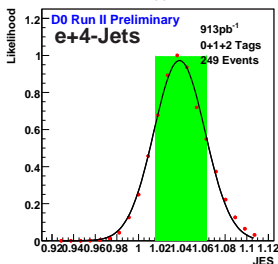
Angepasste Masse

$$M_{\text{top}} = (169.4 \pm 3.7) \text{ (stat.) GeV}$$

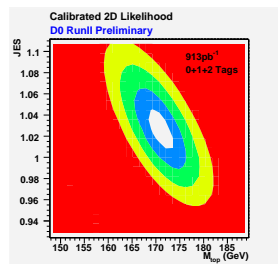


Angepasste JES

$$\text{JES} = (1.039 \pm 0.024) \text{ (stat.)}$$



2-dimensionales Resultat



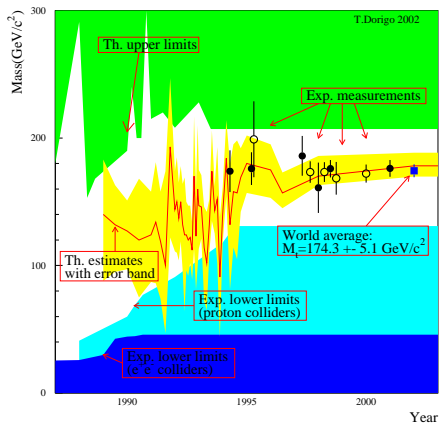
- **Selektion:** Lepton + 4-Jets Ereignisse mit b-Tagging. **Hauptuntergrund:** W + 4-Jets.
- Die Ereigniswahrscheinlichkeit: $P(\vec{x}, m_t, \text{JES}, f_{\text{t}\bar{\text{t}}}) = f_{\text{t}\bar{\text{t}}} P_{\text{t}\bar{\text{t}}}(\vec{x}, m_t, \text{JES}) + (1 - f_{\text{t}\bar{\text{t}}}) P_{\text{bgd}}(\vec{x})$.
- Die Signalwahrscheinlichkeit wird durch das LO Matrixelement aus PYTHIA angenähert:

$$P_{\text{t}\bar{\text{t}}} = \frac{1}{\sigma_{\text{t}\bar{\text{t}}}(m_t, \text{JES})} \times \sum_{\text{perm}}^{\text{jet}} \omega_i \int \sum_{\text{flav}} dq_1 dq_2 f_{q_1/p} f_{q_2/\bar{p}} \frac{\mathcal{M}(q_1 q_2 \rightarrow \text{t}\bar{\text{t}} \rightarrow \vec{y})}{2q_1 q_2 s} d\Phi_6 W(\vec{x}, \vec{y}, \text{JES})$$
- Simultane Anpassung von m_t und JES liefert das Resultat.
- **Resultat:** $m_t = 170.9 \pm 2.4 \text{ (stat + JES)} \pm 1.2 \text{ (syst)}$

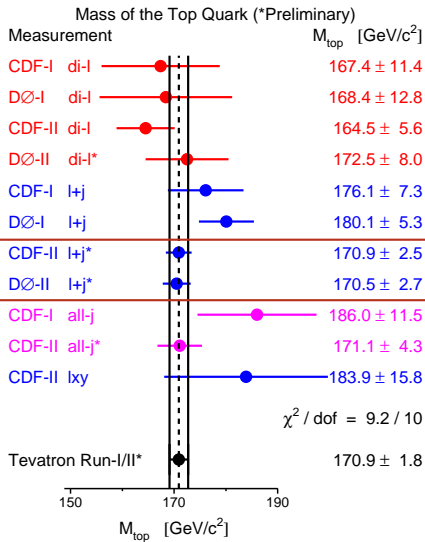
Dies ist die genaueste D0 Messung von m_t .

Die Kombination der Massenmessungen

Ein langer Weg

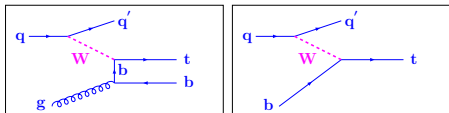


Die Top-Masse ist heute auf 1.1% bekannt.

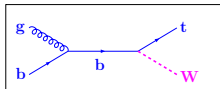


Single-Top Produktion - eine erste Evidenz

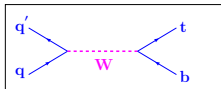
t-Kanal Produktion



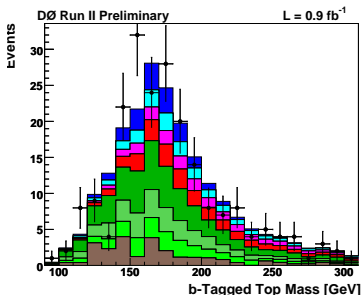
Wt-Produktion



S-Kanal Produktion



$$- \text{Erwartung: } \sigma(m_t = 175 \text{ GeV}) = \begin{cases} 2 \text{ pb} \\ 245 \text{ pb} \end{cases} + \begin{cases} 0 \text{ pb} \\ 62 \text{ pb} \end{cases} + \begin{cases} 1 \text{ pb} \\ 10 \text{ pb} \end{cases} \begin{array}{l} \text{für Tevatron} \\ \text{für LHC} \end{array}$$



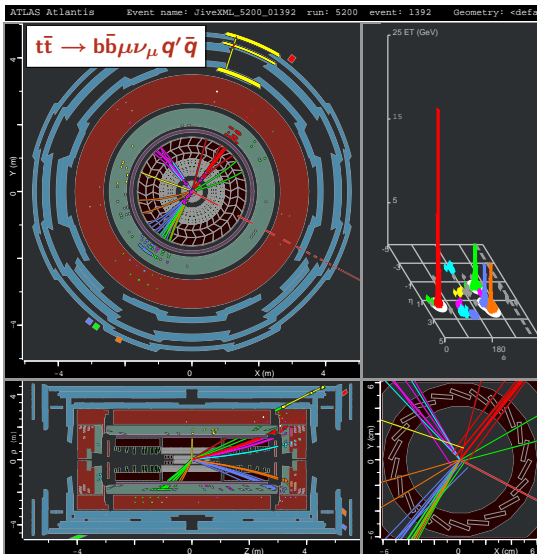
Interpretation der Daten

- Ein leichter Überschuss in den Daten.
- Interpretiert als Single-Top Produktion, mit $\sigma_t/\sigma_s = 0.44$, liefert:

$$\sigma(p\bar{p} \rightarrow tb + tq) = 4.8^{+1.6}_{-1.4}$$
- Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit einer Fluktuation des Untergrunds ohne Signal liefert eine 3.2σ Evidenz.

Eine genaue Messung erst am LHC.

Die Top-Quark Messungen am LHC



Veränderungen zu Tevatron

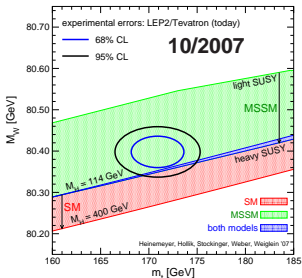
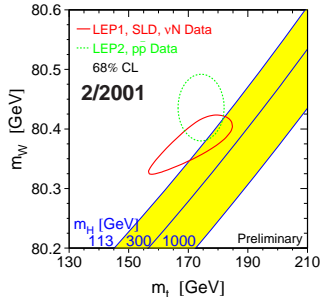
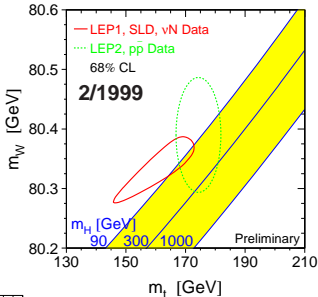
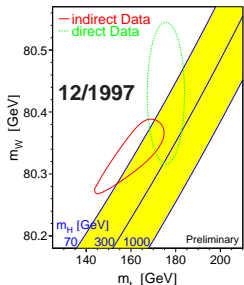
- Höhere \mathcal{L}_{int} und $\sigma_{t\bar{t}}$.
- Weniger Untergrund aus W+N-Jets aber mehr Untergrund durch MI.
- Bessere b-Jet Erkennung (boost).
- Feiner segmentiertes Kalorimeter.

Erwartete Resultate

- $\sigma_{t\bar{t}}$ in allen Kanälen
- m_t auch Konsistenz, $m_t \leftrightarrow \sigma_{t\bar{t}}$.
- Spin, W-Helizität.
- Seltene Zerfälle $R = \frac{|V_{tb}|^2}{|V_{tb}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{td}|^2}$.
- Single-t, Trennung der Diagramme.
- FCNC $t \rightarrow Z^0 q?$
- $t\bar{t}$ Resonanzen?
- ...

Ab Herbst kann die Jagd beginnen.

Die Bedeutung der Top-Masse für das SM und seine Erweiterungen



- **1997:** $m_W = (80.41 \pm 0.09)$ GeV, $m_t = (175.6 \pm 5.5)$ GeV
- **2007:** $m_W = (80.374 \pm 0.015)$ GeV, $m_t = (170.9 \pm 1.8)$ GeV

Ein Ausblick in die Zukunft

- Mit immer genaueren Werten für m_W und m_t kann die Higgs-Masse eingeschränkt, oder Hinweise auf Physik jenseits des SM gewonnen werden.

In ein paar Jahren wissen wir deutlich mehr.

Zusammenfassung

- Nach der Entdeckung des Bottom-Quarks 1977 war im Standard Modell klar, dass es das Top-Quark geben musste und die Suche war eröffnet.
- Erst 1995, mit der Entdeckung des Top-Quarks durch CDF und D0 am Tevatron wurde dieser bis heute letzte Quark Baustein gefunden.
- Mit seiner großen Masse und kurzen Lebensdauer hat das Top-Quark Alleinstellungsmerkmale im SM. Es zerfällt als freies Quark, und bildet keine gebunden Zustände. Es sollte die stärkste Kopplung an dem Mechanismus zur Massenerzeugung haben.
- Die Tevatron Experimente haben schon einige Eigenschaften des Top-Quarks wie Masse und Produktionswirkungsquerschnitt bestimmt, leiden aber unter kleinen Ereignisraten.
- Am LHC erwarten wir uns wesentlich verbesserte Messungen der Top-Quark Eigenschaften, und mit ein wenig Glück auch Kopplungen an das Higgs-Boson, oder an Physik jenseits des Standardmodells.

Nächste Vorlesung: Vorlesung 12, 15. Januar 9:15 Uhr, Prof. S.Bethke.