Eigenschaften des Top-Quarks

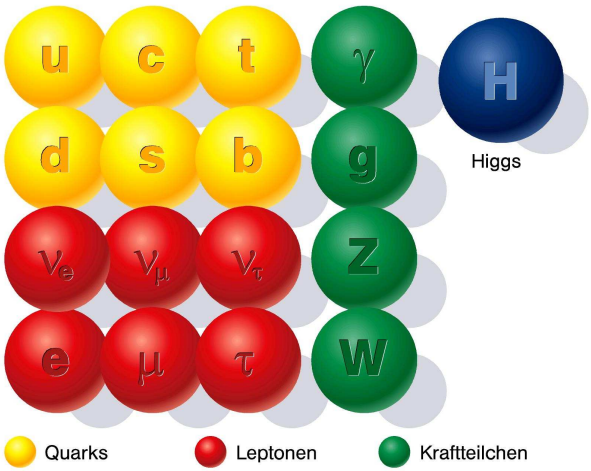
Was wissen wir wirklich über das schwerste bekannte Elementarteilchen?

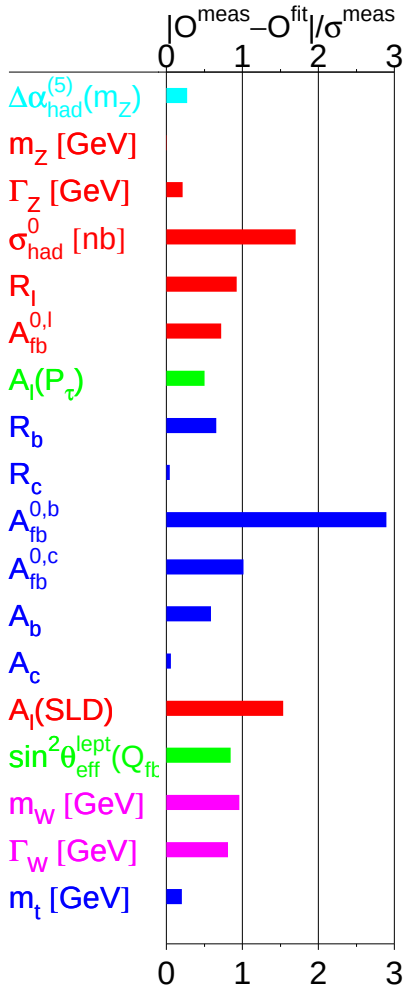
Daniel Wicke
Antrittsvorlesung Bergische Universität

Einleitung

Das Standardmodell der Teilchenphysik

Beschreibung mit nur 12 Fermionen (Materieteilchen),
Eichbosonen von 3 Wechselwirkungen und einem Skalar.





Mehr als 30 Jahre experimentelle Prüfung
mit großer Präzision liefert gute Konsistenz

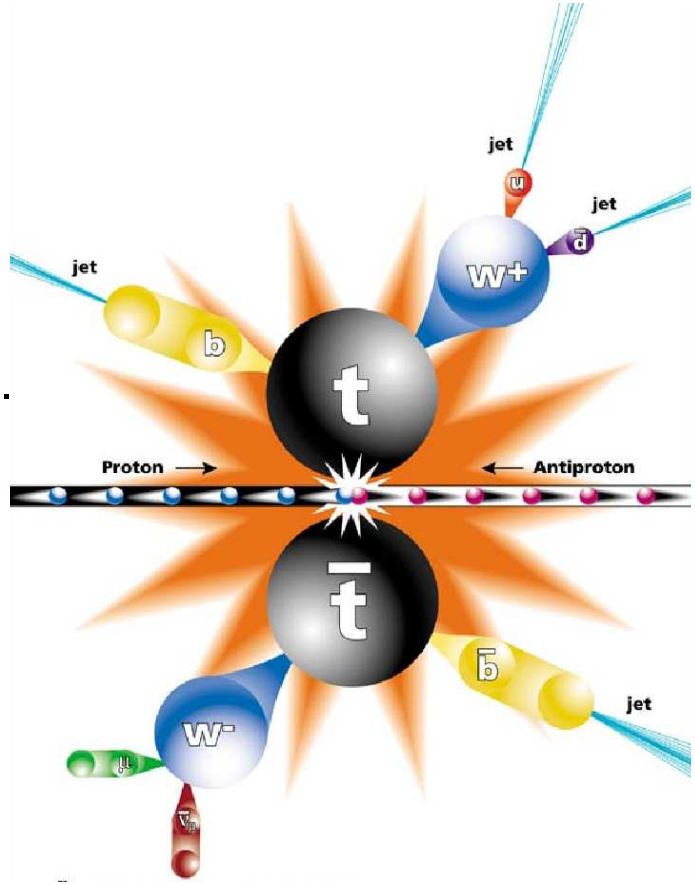
Pulls

Das Top-Quark

- Entdeckung bei CDF und DØ 1995.

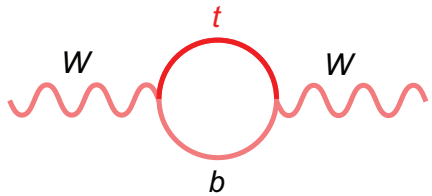
- Komplettiert die Liste von Quarks im SM.
- Quantenzahlen wie bei andern u-artige Quarks.
- Produktions- und Zerfallseigenschaften im Standardmodell vollständig definiert.

- Masse ist der einzige freie Parameter



Nachweis der erwarteten Eigenschaften etabliert das SM Top-Quark;
Abweichungen zeugen von neuer Physik

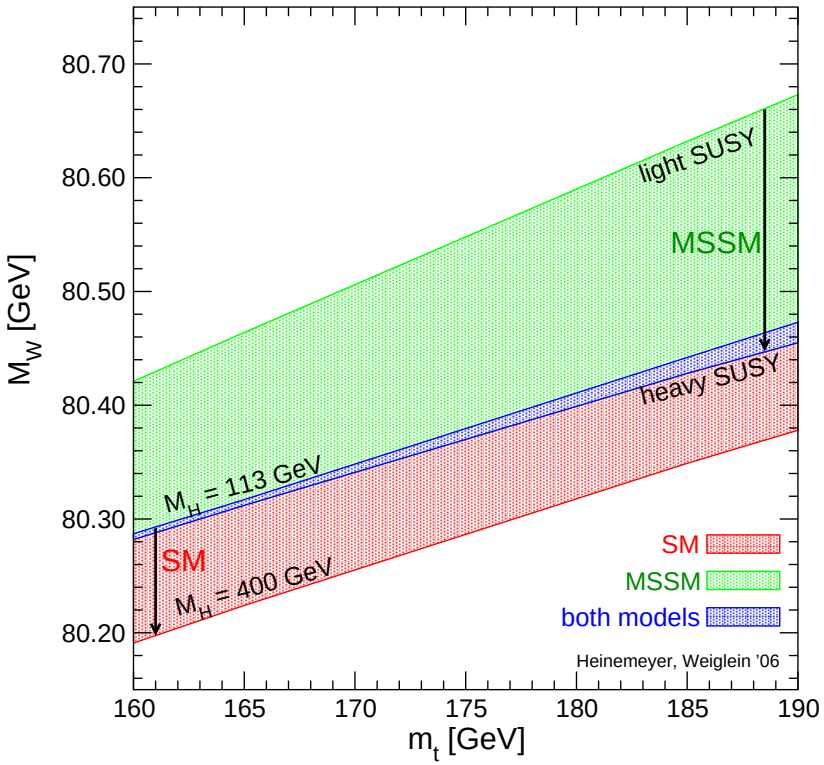
Relevanz der Top-Quarkmasse



- Strahlungkorrekturen elektroschwacher Observablen verbinden die Massen von W-Boson, Top-Quark und Higgs-Boson

- Vorhersage der Higgsmasse aus W-Boson- und Top-Quarkmasse
  - abhängig von betrachteter Theorie

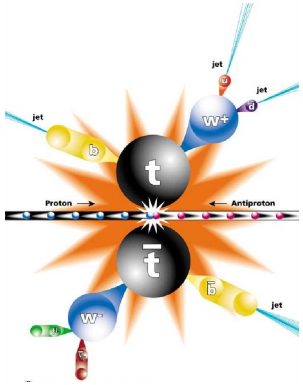
- Nach Endeckung des Higgs-Bosons
  - Konsistenztest des Standardmodells.



Messung der Top-Quarkmasse testet SM als Ganzes

Übersicht

- Einführung in die Top-Physik
  - Experimentelles
  - Top-Quark im SM
- Die Top-Quarkmasse
- Weitere Eigenschaften
  - Wie genau kennen wir das Top-Quark?

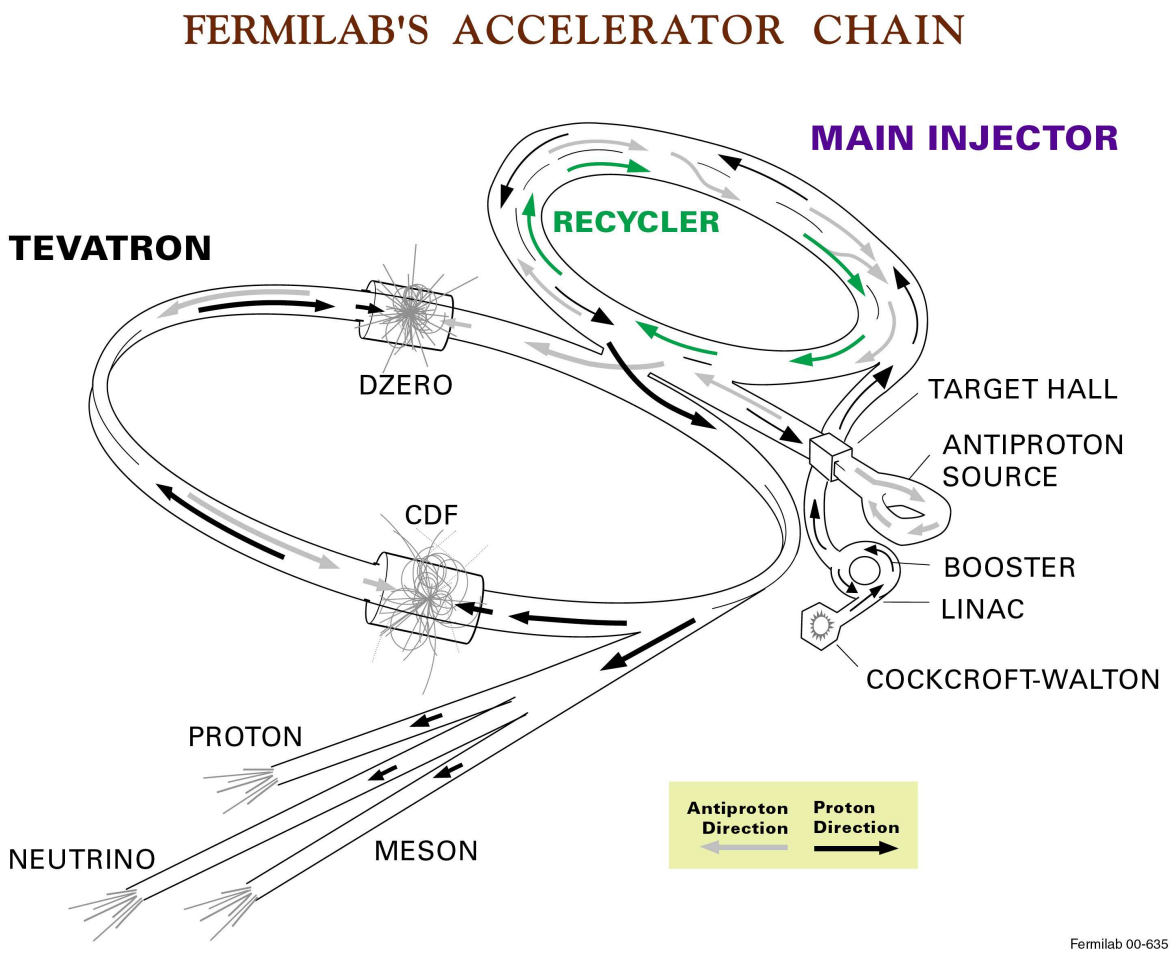


Einführung in die Top-Physik

Der $p\bar{p}$-Beschleuniger Tevatron

Bisher einziges Labor für Top-Quark Physik. (LHC kommt in Kürze dazu.)

- Umfang 7 km.
- $p\bar{p}$ Kollisionen
- Run I (1987-1995)
- Run II (seit 2001)
  Schwerpunktsenergie
  1.96 TeV
- 2 Experimente,
  CDF und DØ.



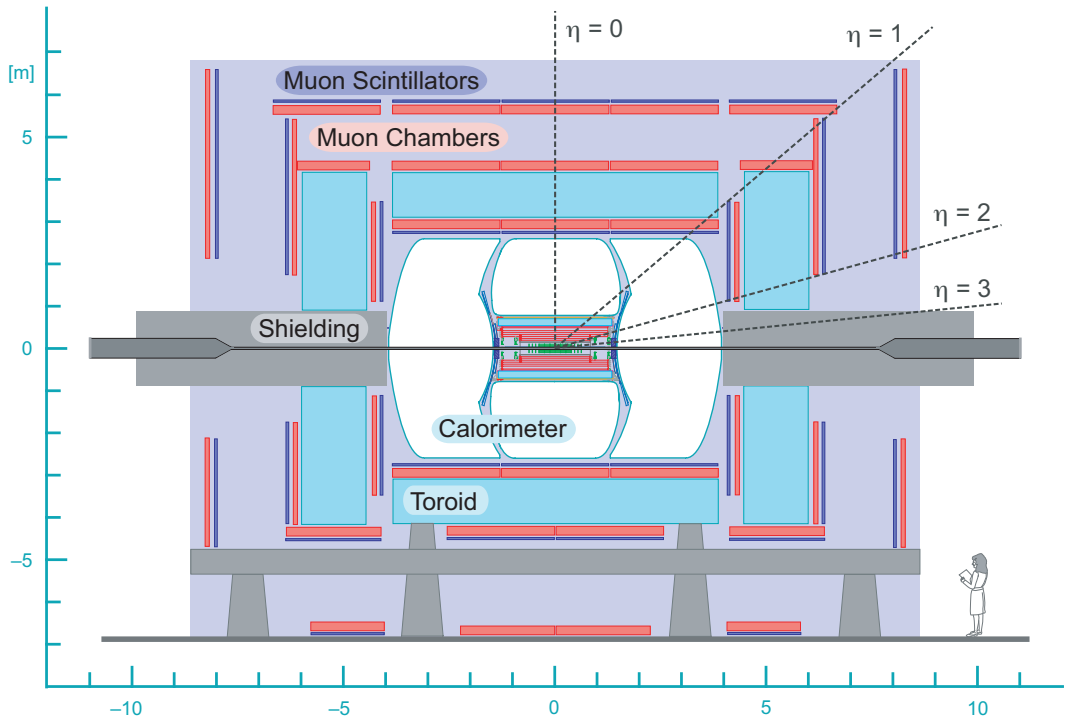
Int. Luminosität $\sim 9\,\mathrm{fb}^{-1}$

The Tevatron

Der DØ Detektor

Universeller Detektor mit 4π Abdeckung: Dimensionen: $12 \times 12 \times 20\mathrm{m}^3$

- Spurdetektoren in 2T Solenoid
  - Silizium Mikrostreifen
  - Szintillierende Fasern
- Kalorimetrie
  - Uran/Flüssigargon
- Myonspektrometer
  - 3 Lagen Drifttubes
  - Toroidales Magnetfeld (1.9T zw. 2 inneren Lagen)



Rekonstruierte Physikobjekte

Myonen

Spur in Myonspektrometer (außerhalb der Kalorimeter)

Elektronen

Energiedeposition im innersten ('em') Kalorimeter.

Jets (Ergebnis von Quarks oder Gluonen)

Ansammlung von Energiedepositionen im 'Hadron'kalorimeters.
CDF and DØ verwenden Cone-Jetalgorithms.

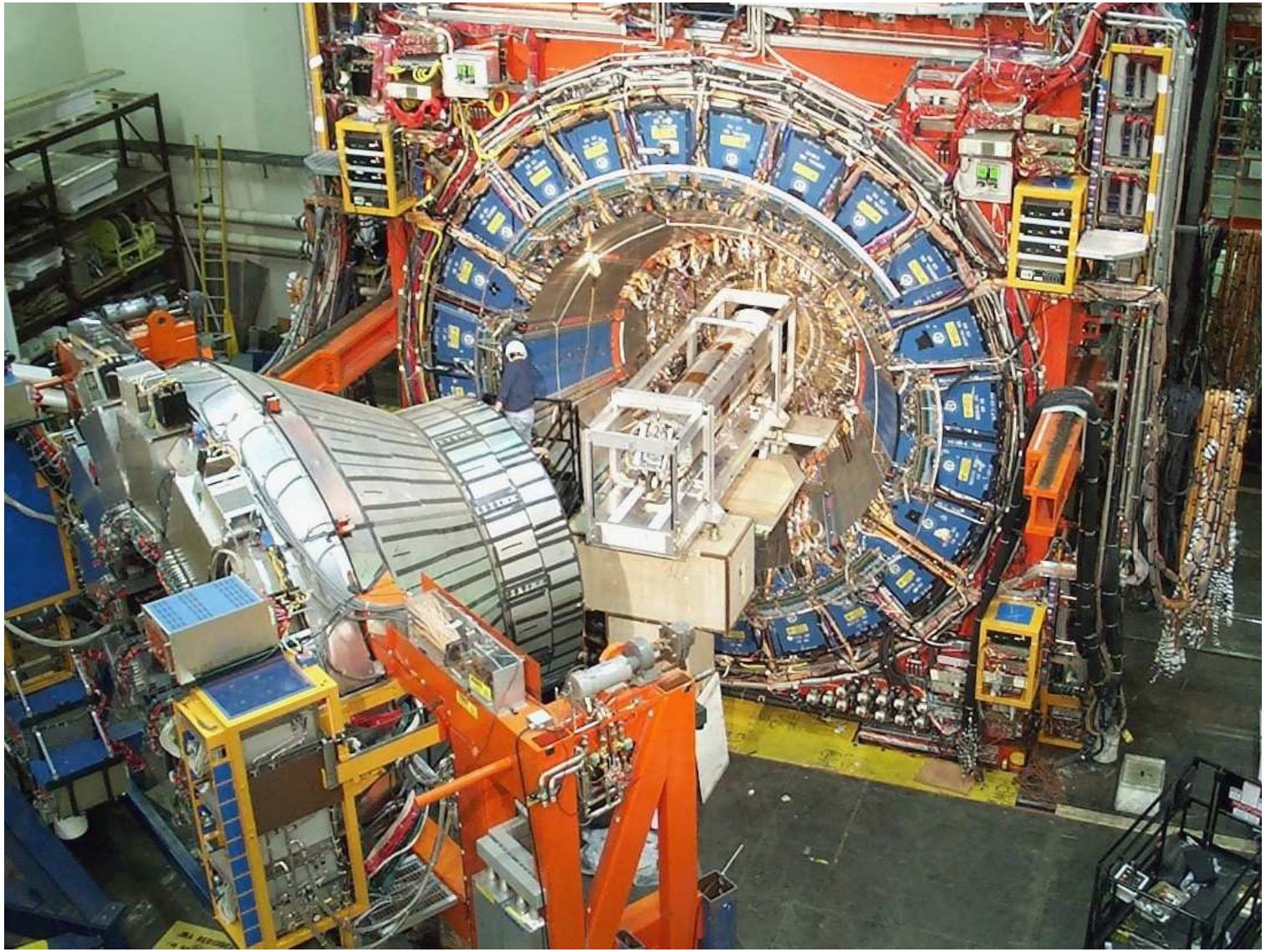
B-Tag (Zeichen von b-Quarks)

Lange Lebensdauer von B-Hadronen führt zu Sekundärvertizes,
die aus Spuren rekonstruiert werden.

Fehlende Transversale Energie, $\not{E}_T$ (Zeichen f. Neutrinos)

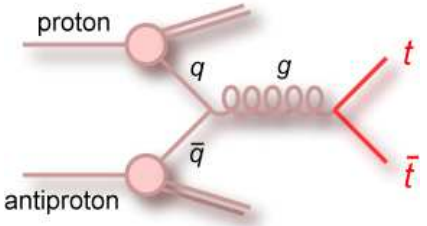
Negative Summe aller Energie die transversal zum Strahl gemessen wurde.

Der CDF Detektor

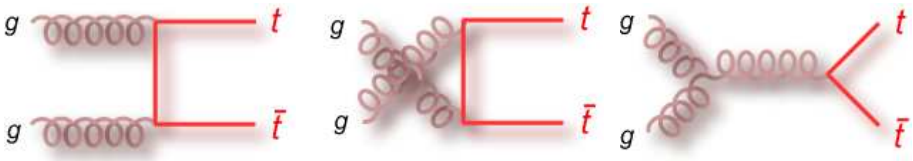


Top-Quark Produktion am Tevatron

Starke Top Produktion



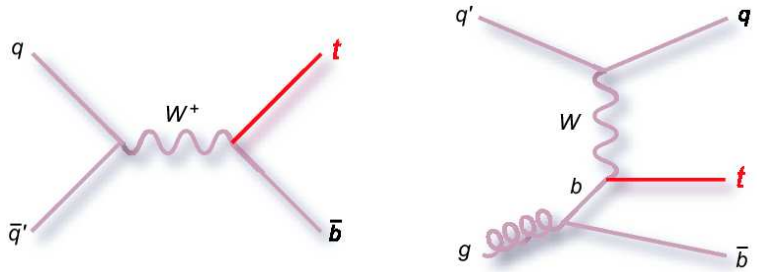
$$85\% \quad q\bar{q} \to t\bar{t}$$
$$15\% \quad gg \to t\bar{t}$$



$\sigma(t\bar{t}) \simeq 7.46$pb

Moch and Uwer; $m_t = 172.5$ GeV
PRD 78, 034003 (2008)

Schwache Top Produktion



Drell-Yan s-channel

W-g fusion t-channel

$\sigma(t) = 3.46\text{pb} = 1.12\text{pb} + 2.34\text{pb}$

Kidonakis; $m_t = 170$ GeV
PRD 74, 114012 (2006)

Pro integrierter Luminosität von $1\,\text{fb}^{-1}$
um die 7500 Top Paare und 3500 einzeln produzierte Tops erwartet.

Top-Quarkzerfall

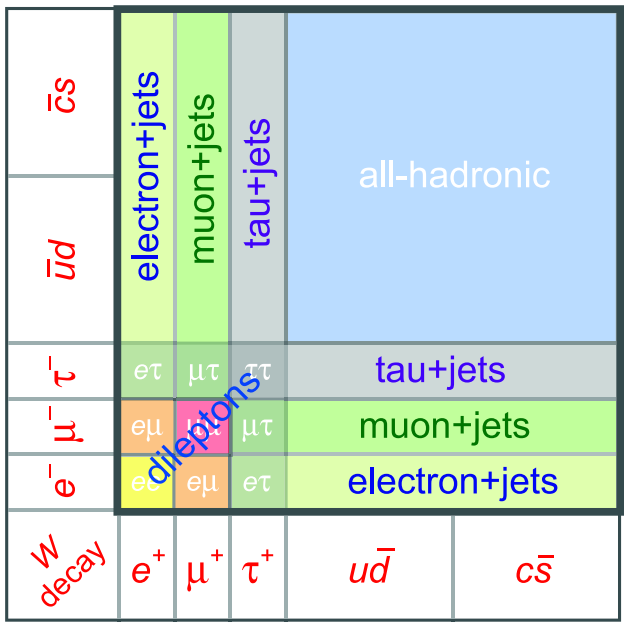
Top-Quarks zerfallen in bW (fast) 100%.

Signaturen der Paarproduktion

Zerfallsmoden definiert durch W-Zerfälle:

- Dilepton $(2b + 2l + 2\nu)$
- Lepton+jets $(2b + 2q + l\nu)$
- Alljets $(2b + 4q)$

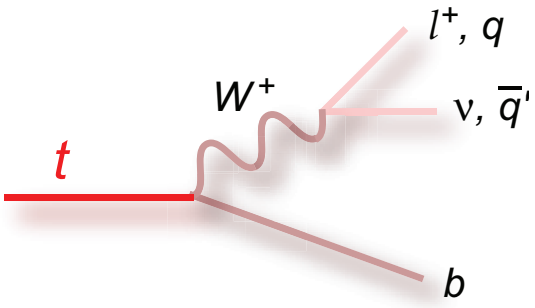
Top Pair Decay Channels



Signaturen von Single Tops

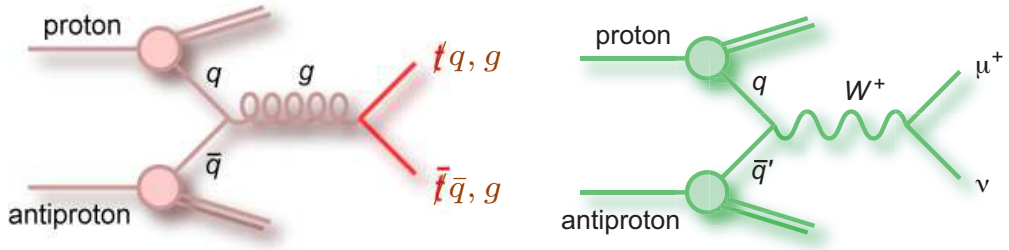
Definiert durch W-Zerfälle und Kanal;
z.B. leptonischer Zerfall:

- s-Kanal $(2b + l + \nu)$
- t-Kanal $(b + q + l + \nu)$



Untergründe in der Top-Quark Paarproduktion

Gleiche Signatur bzw.
Fehlrekonstruktion von Jets
als ℓ oder $\not{E}_T$

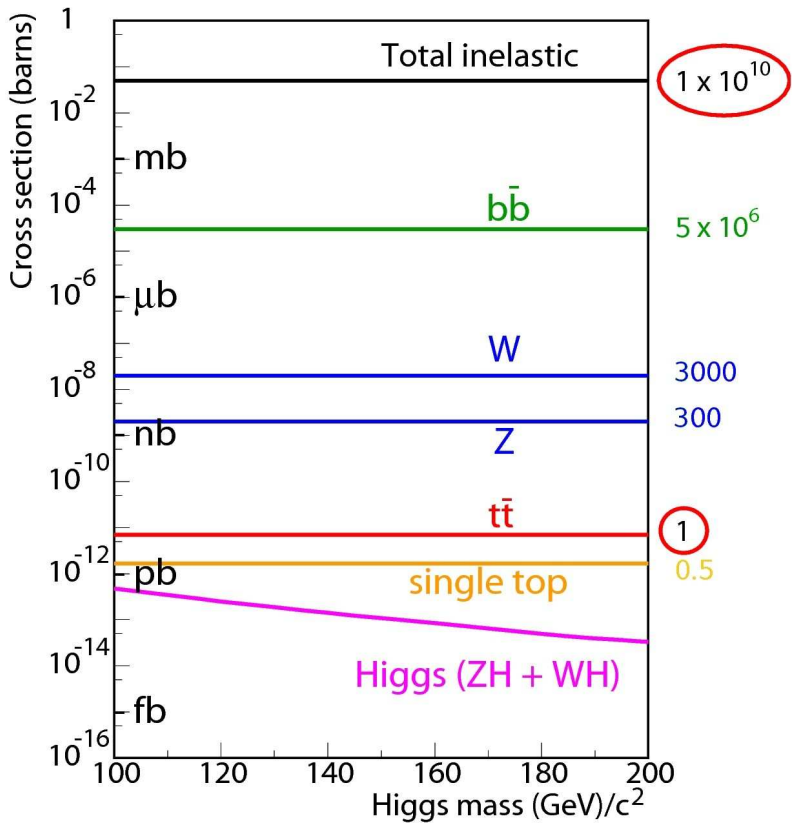


- Multijet Ereignisse
  ($q\bar{q}$ oder gg + gluon radiation)
- W+jets
- Z+jets

das "+jets" hilft bei Unterdrückung.

Simulation von Multijet Ereignissen
und Fehlrekonstruktionen schwierig/ungenau

$\Rightarrow$ Abschätzung aus Daten



Die Masse des Top-Quarks

Messungen der Top-Quarkmasse

Template Methode (CDF)

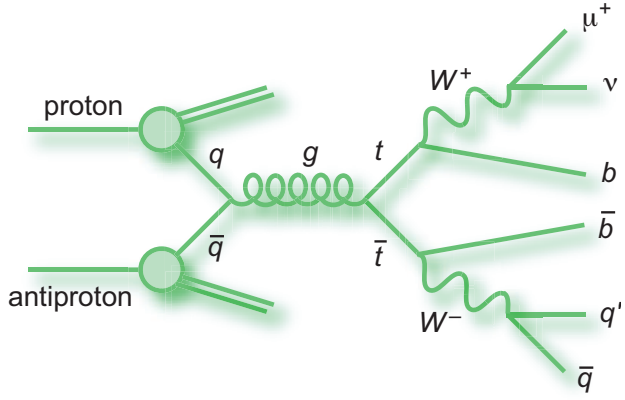
- 4 jets, 1 Lepton & $\not{E}_T$ (Neutrino)

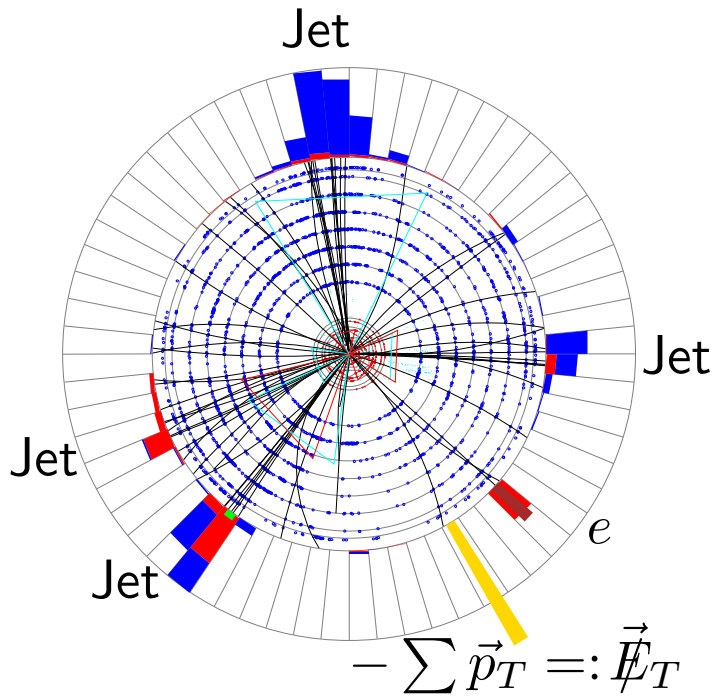
Bestimmung der Topmasse

Rekonstruktion der Viererimpulse der t-Quarks in jedem einzelnen Ereignis

- Rekonstruktion des ν Impulses
- Assoziation von $l\nu$ und 4 Jets zu 2 Tops
- Summe der assoziierten Viererimpulse ergibt $m^2 = E^2 - \vec{p}^2$

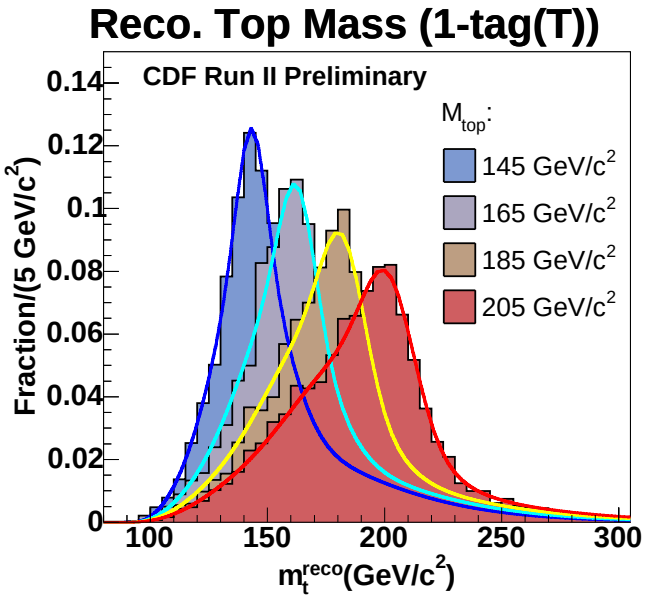
In realitas: Fit mit Nebenbedingungen:
Gleiche Topmassen, m_W nominal.
Impulsmessung & richtige Zuordnung entscheidend:
min. χ^2 Lösung verwendet.





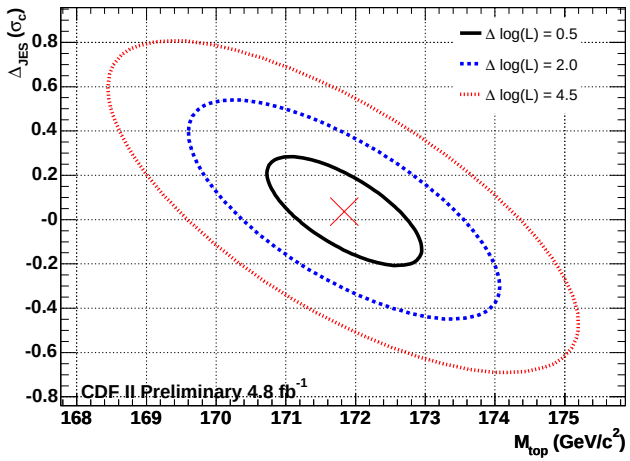
Bestimmung der Topmasse (2)

- Histogrammiere Topmassen.
- Vergleiche mit Simulation (Templates)
  - für verschiedene m_t und JES.
  - mit erwartetem Untergrundanteil
- Wähle m_t mit bester Übereinstimmung



Einschränkung der JES

- Templates für m_W rekonstruiert aus m_{jj}.
- Fit ohne Zwangsbedingung
- Alle Paarungen für nicht b-tagged Jets

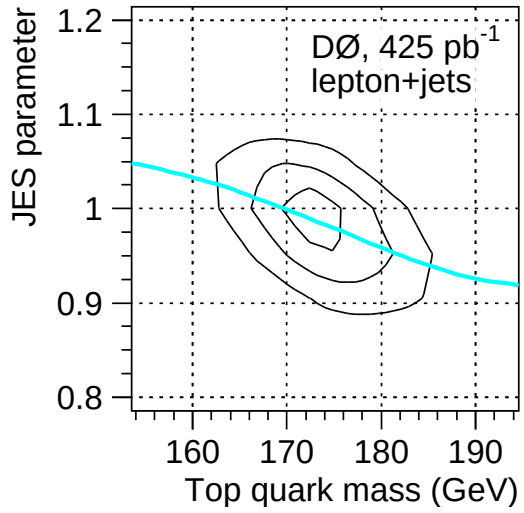


Topmasse und JES aus 2d-Fit ($4.8\,\mathrm{fb}^{-1}$):

$$m_t = 171.9 \pm 1.1(\mathrm{stat} + \mathrm{JES}) \pm 0.9(\mathrm{syst})\ \mathrm{GeV}$$

Ideogramm Methode (DØ)

Kann man gut vermessene Ereignisse stärker gewichten?



Rekonstruiere m_t wie zuvor in jedem Ereignis
für alle Jet-Parton-Zuordnungen: $x = (m_1, m_2, ...)$

Wahrscheinlichkeit x zu beobachten

$$P_{\mathrm{evt}}(x; m_t, \mathrm{JES}) = f_{\mathrm{top}} P_{\mathrm{sig}}(x; m_t, \mathrm{JES}) + (1 - f_{\mathrm{top}}) P_{\mathrm{bkg}}$$

$$P_{\mathrm{sig}}(x; m_t, \mathrm{JES}) =$$

$$\sum_{\text{Kombinationen}} w_i(\mathrm{JES}) \left(f \int \underbrace{\mathbf{G}(m_i, m', \sigma_i)}_{\text{exp. Auflösung}} \underbrace{\mathbf{BW}(m', m_t)}_{\text{rel. Breit-Wigner}} \mathrm{d}m' + \underbrace{(1-f)\, S(m_i, m_t)}_{\text{falsche Kombinationen}} \right)$$

$$173.7 \pm 4.4(\mathrm{stat} + \mathrm{JES}) \pm 2.1(\mathrm{syst})\ \mathrm{GeV} \qquad (470\,\mathrm{pb}^{-1})$$

Ereignisse mit schlechter Auflösung tragen wenig zur m_t-Abhängigkeit bei.

Matrix Element Methode (DØ)

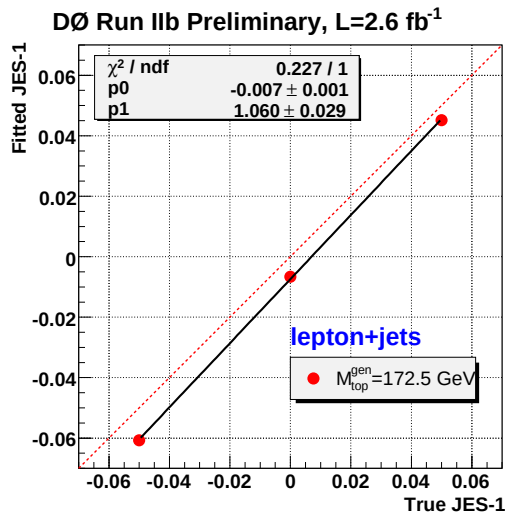
Bestimmung der Topmasse aus Likelihood

Wahrscheinlichkeit für kinematische Konfiguration x abhängig von m_t und JES:

$$P_{\mathrm{evt}}(x; m_t, \mathrm{JES}) = f_{\mathrm{top}} P_{\mathrm{sig}}(x; m_t, \mathrm{JES}) + (1 - f_{\mathrm{top}}) P_{\mathrm{bkg}}(x, \mathrm{JES})$$

$$P_{\mathrm{sig}} = \frac{1}{\sigma_{t\bar{t}}(m_t)} \int \mathrm{d}q_1\, \mathrm{d}q_2\, \underbrace{\mathrm{d}^n\sigma(q\bar{q} \to t\bar{t} \to y; m_t)}_{\text{Matrix Element}}\, \underbrace{f(q_1) f(q_2)}_{\text{PDFs}}\, \underbrace{W(y, x; \mathrm{JES})}_{\text{Auflösung}}$$

- Maximierung der Likelihood liefert m_t und Energieskala (JES).
- Kalibration durch Vergleich mit **MC**



Topmasse nach Kalibration ($3.6\,\mathrm{fb}^{-1}$):

$$m_t = 173.7 \pm 0.8(\mathrm{stat}) \pm 1.6(\mathrm{syst})\ \mathrm{GeV}$$

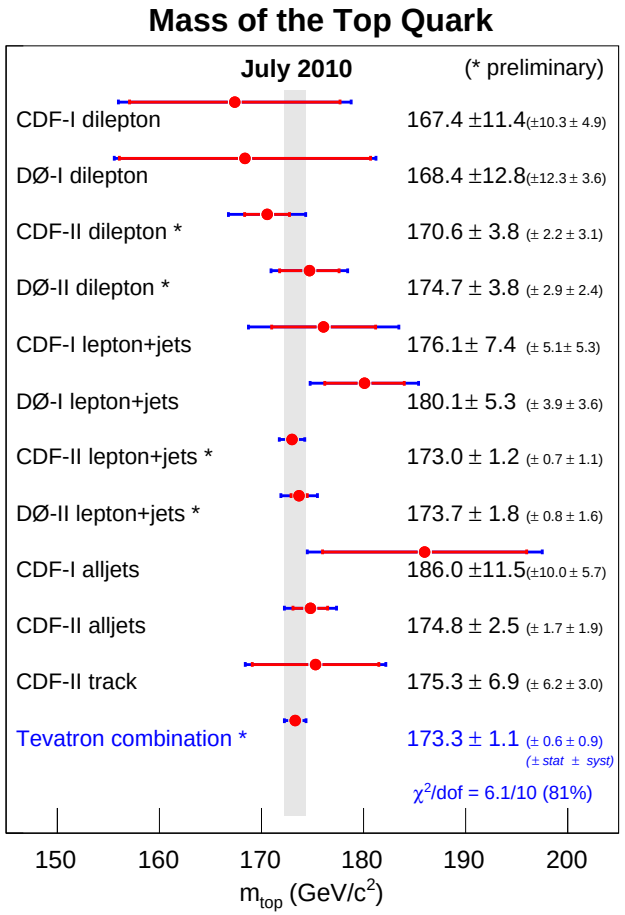
Kombination der direkten Messungen der Topmasse

Kombination der RunI und RunII Ergebnisse beider Experimente:
Best Linear Unbiased Estimator (BLUE), d.h. berücksichtigt Korrelationen.

Systematische Unsicherheiten

- Jet Energie Skala (leichte Quarks)
  weiterhin dominierend
- Jet Energie Skala in b-jets
- Signal, Untergrund, . . .

arXiv:1007.3178



Aktueller Weltmittelwert (7.2010)

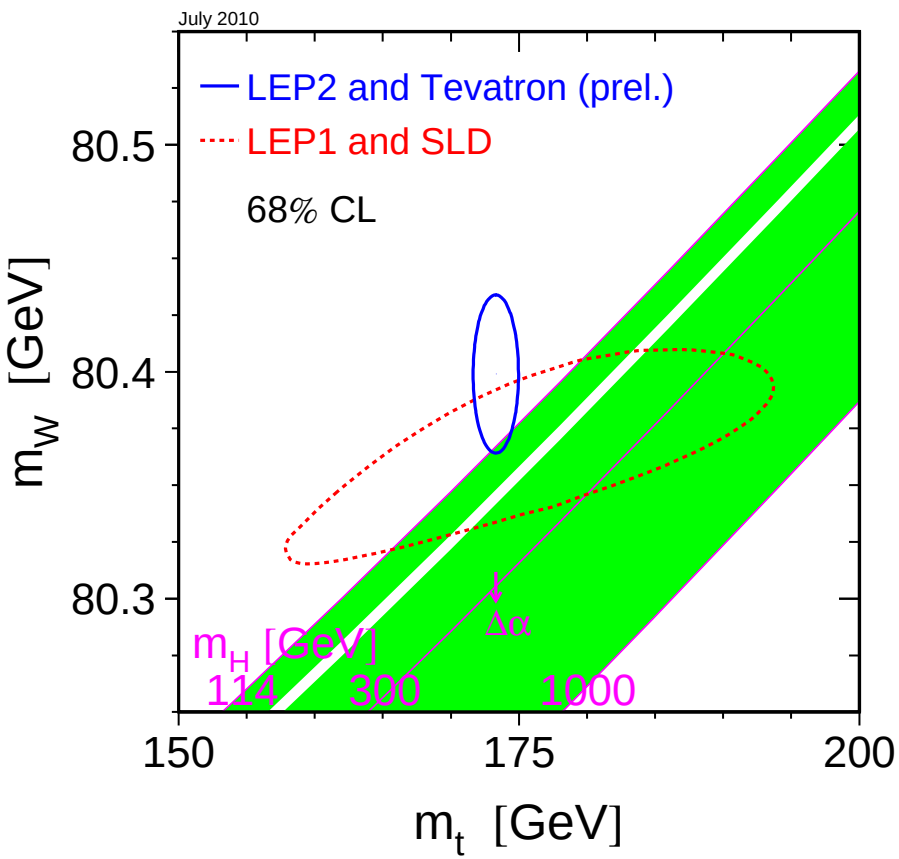
$$173.3 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 0.9(\text{syst})\ \text{GeV}$$

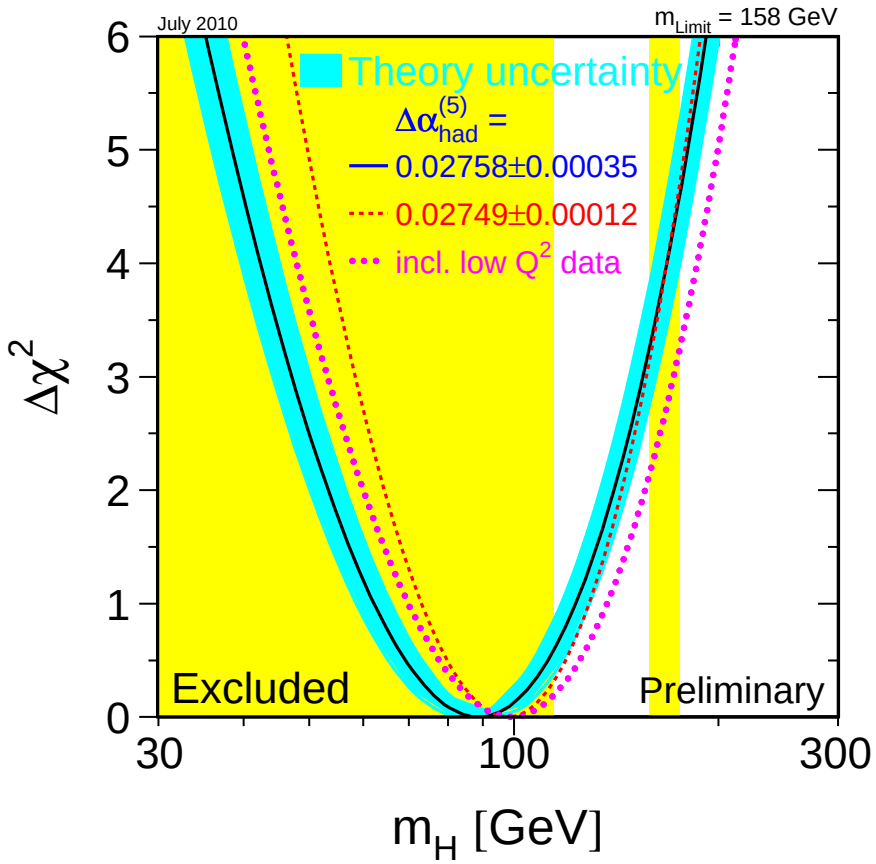
Totale Unsicherheit: 1.1 GeV oder 0.7%

Dilepton	171.1 ± 2.5 GeV
l+jets	173.0 ± 1.1 GeV
Alljets	175.2 ± 2.6 GeV

Best bekannte Quarkmasse

Die Top-Quarkmasse in elektroschwachen Fits





Kombinierte m_W und m_t Resultate berühren SM-Bereich nur knapp

Higgsmassen Projektion

$M_H \leq 158$ GeV (95%CL)

Massendifferenz

Entsprechend dem CPT-Theorem $m_t = m_{\bar{t}}$

Analyse

- Top bzw. Antitop entsprechend Leptonladung
- Adaption der Massenmessung
  - DØ: Matrix Element Methode
  - CDF: Kinematischer Fit (Template)

  Abhängigkeit von Δm statt von m_t.

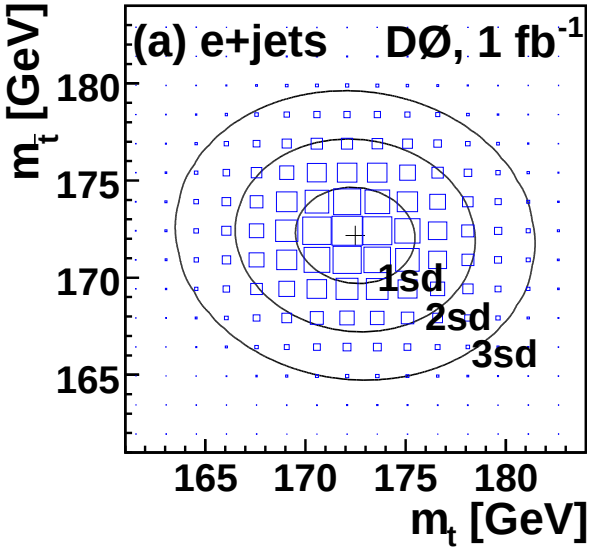
Resultate

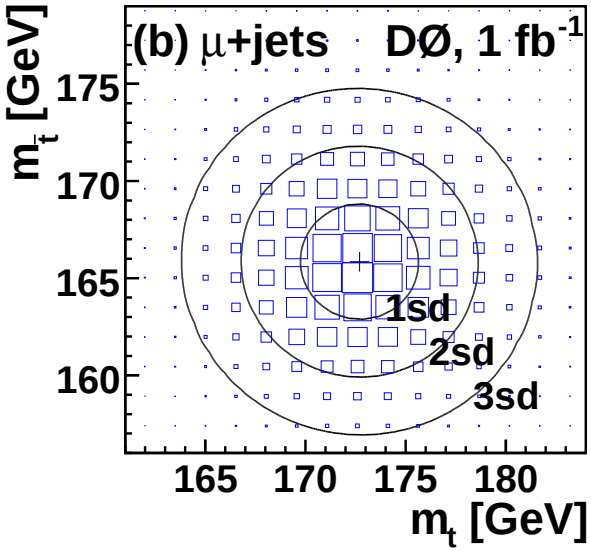
DØ: $\Delta m = +3.8 \pm 3.7\,\text{GeV}$

CDF: $\Delta m = -3.3 \pm 1.7\,\text{GeV}$

$$\frac{\Delta m}{m} = 2.2 \pm 2.2\%$$

Top-Quark und Top-Antiquark sind gleich schwer.
Einzigartiges Resultat im Quarksektor des SM.





Weitere Eigenschaften des Top-Quarks

Fragen zum Top-Quark

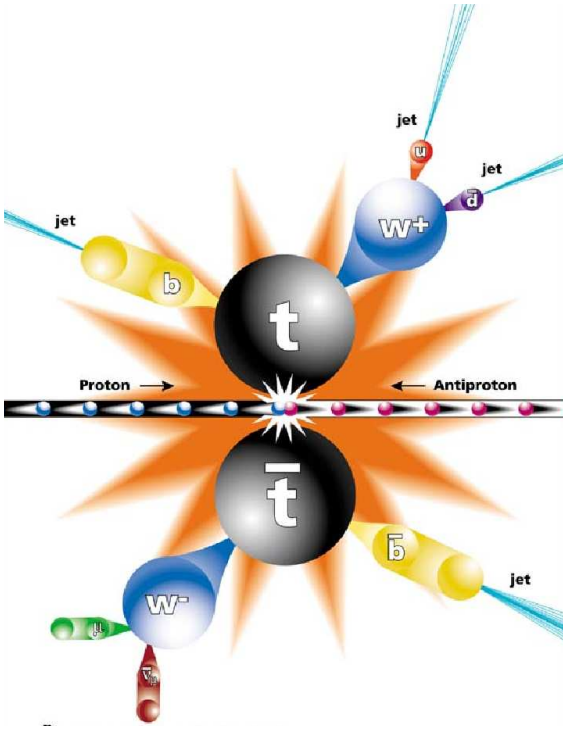
Man kann die SM-artigkeit des Top-Quarks verschieden in Frage stellen:

a) Sehen wir wirklich (zu 100%) das Top-Quark?

b) Wird es (exakt) wie vom SM erwartet produziert?

c) Hat es die erwarteten Quantenzahlen?

d) Zerfällt es (exakt) so wie im SM erwartet?



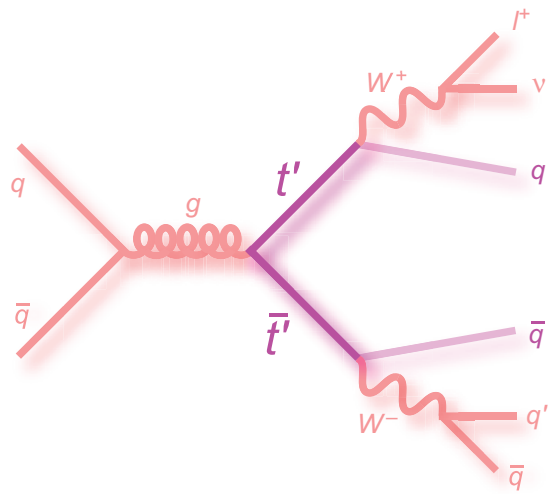
Im Folgenden: Beispiele zu jedem dieser Punkte geben...

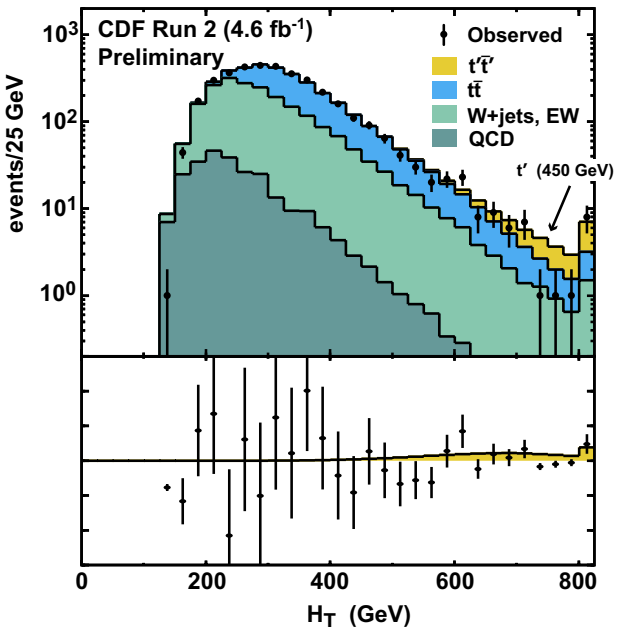
a) Top-Quark oder unbekannte Teilchen

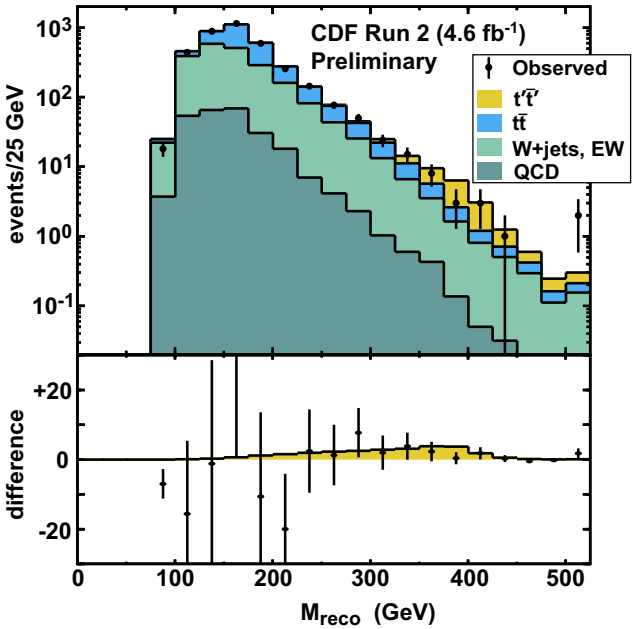
Quark der 4. Generation: t'

„Top“-ereignisse könnten Quark der 4. Generation enthalten, t'

- Semileptonische Ereignisse
- Trennung von t' und t:
  - Summe der Beträge der transveral Impulse, H_T
  - $t^{(\prime)}$-Masse aus kinematischem Fit.

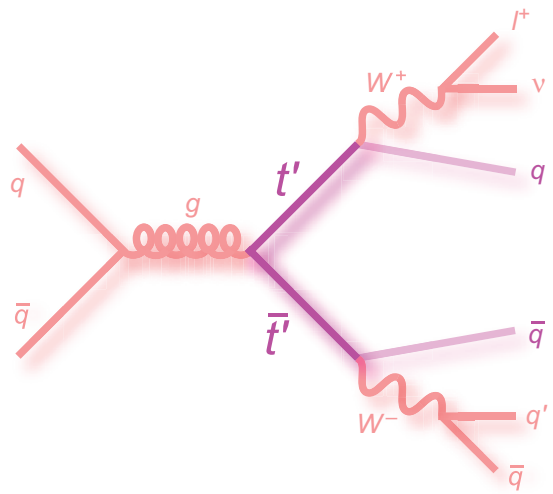






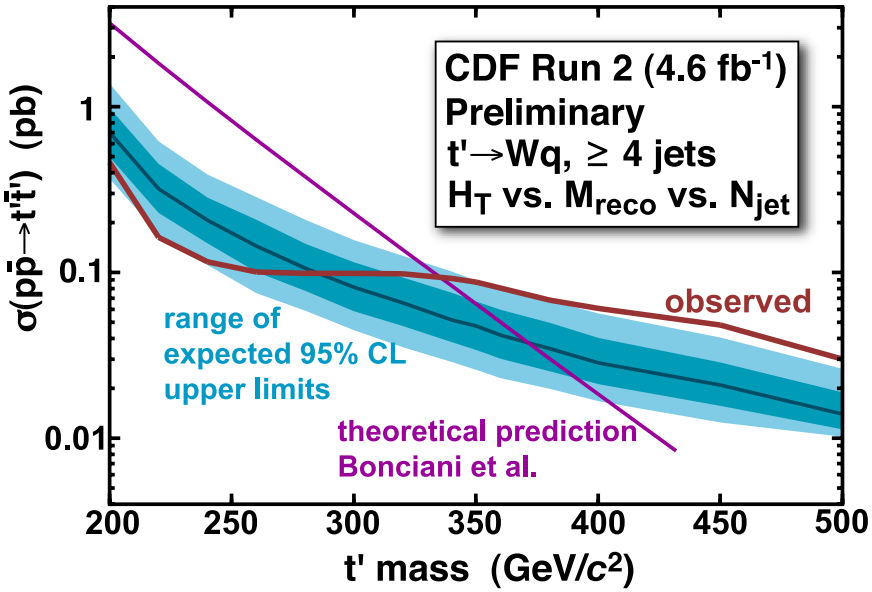
Quark der 4. Generation: t'

„Top“-ereignisse könnten Quark der 4. Generation enthalten, t'.



- Semileptonische Ereignisse
- Trennung von t' und t:
  - Summe der Beträge der transveral Impulse, H_T
  - $t^{(\prime)}$-Masse aus kinematischem Fit.
- Beobachteten Grenzen f. $m_{t'} > 300\,\text{GeV}$ hinter Erwartungen zurück (auch DØ)

CDF: $4.8\,\text{fb}^{-1}$: t' Masse $> 335\,\text{GeV}$
DØ: $4.3\,\text{fb}^{-1}$: t' Masse $> 295\,\text{GeV}$
@ 95%C.L.



Weniger als 2% Beitrag durch t'

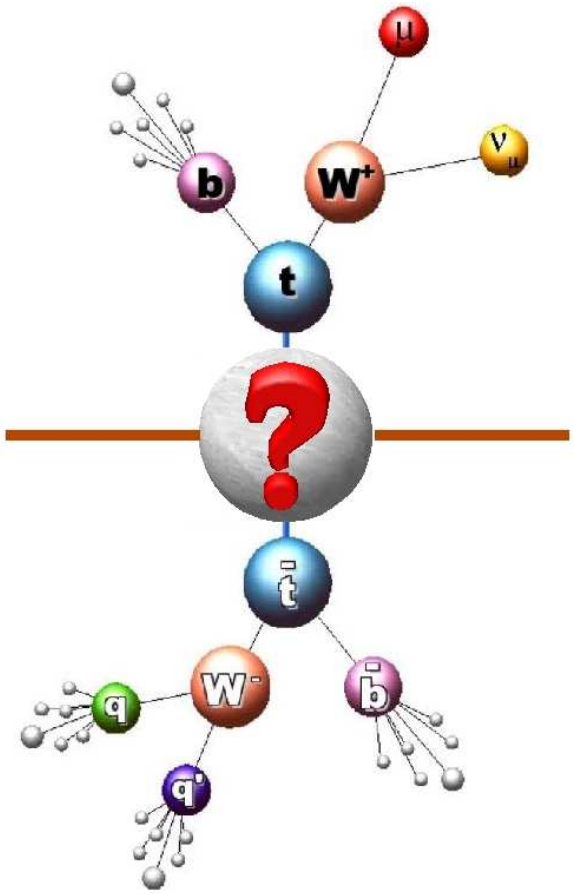
b) Top-Quark Produktion

Resonante Produktion von Top-Quarkpaaren

Das Standard Modell erwartet keine $t\bar{t}$ Resonanzen,
aber einige Modelle für neue Physik tun dies

Zum Beispiel:

- Neue Eichsymmetrie mit starker Kopplung speziell an dritte Generation
- Top-color assisted technicolor: Z'



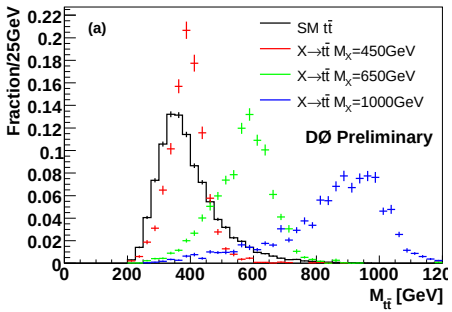
Resonanzen würden einen Buckel
im differentellen Wirkungsquerschnitt $\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}M_{t\bar{t}}}$
erzeugen.

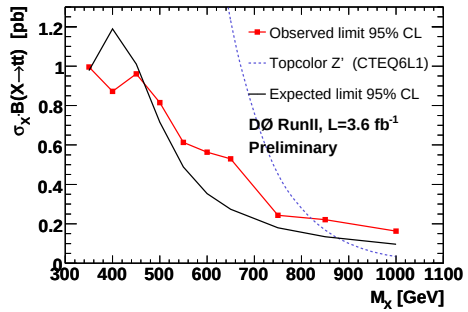
Betrachte Resonanzen schmaler als Detektorauflösung

Suche nach schmaler $t\bar{t}$ Resonanz

Selektion semi-leptonischer Toppaare.

- Rekonstruktion invarianten Masse $M_{t\bar{t}}$
- Vergleich mit Simulation
- Grenzen an $\sigma_X \mathcal{B}(X \to t\bar{t})$.

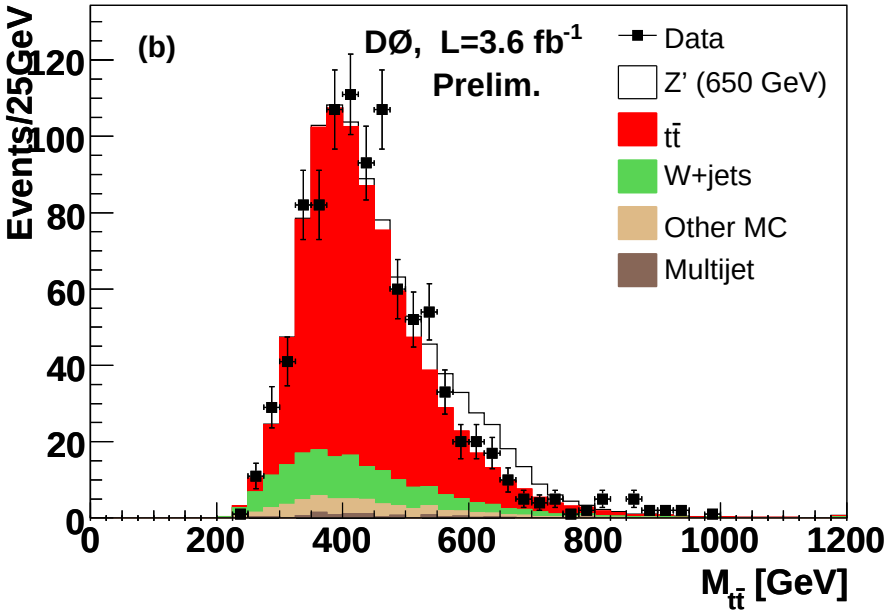




Z.B. Topcolor-assisted technicolor:

DØ: $L = 3.6\,\text{fb}^{-1}$
$M_{Z'} > 820\,\text{GeV}$ (erwartet 870 GeV)

CDF: $L = 2.8\,\text{fb}^{-1}$
$M_{Z'} > 805\,\text{GeV}$

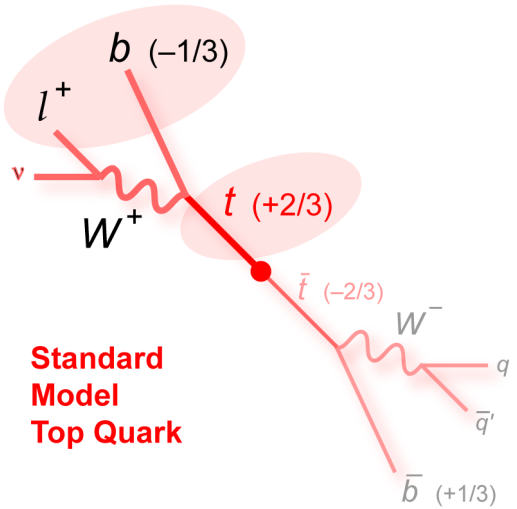


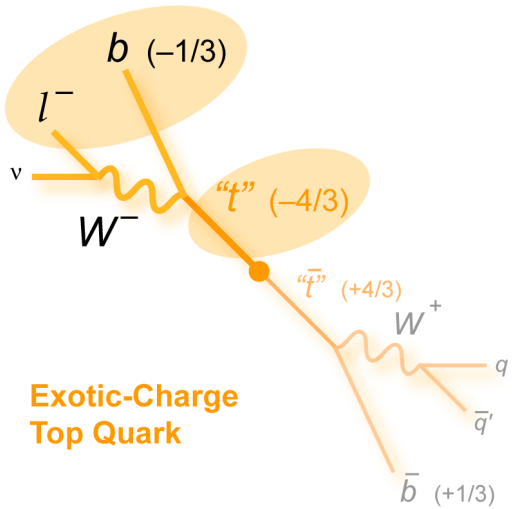
Beiträge resonanter Produktion kleiner 10% (ab 500 GeV) kleiner 5% (ab 700 GeV)

c) Top-Quark Quantenzahlen

Elektrische Ladung des Top-Quarks

Addieren sich die rekonstruierten Objekte zur erwarteten Top-Quarkladung?





Messung erfordert Rekonstruktion von

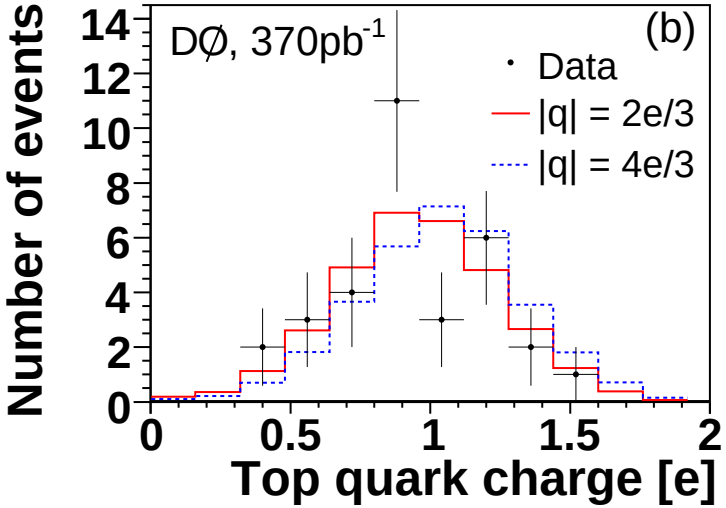
- W-Bosonladung $\Longrightarrow$ Leptonladung
- b-Quarkladung $\Longrightarrow$ Jetladung (involviert)
  Ladung μ aus b-Zerfall (selten)

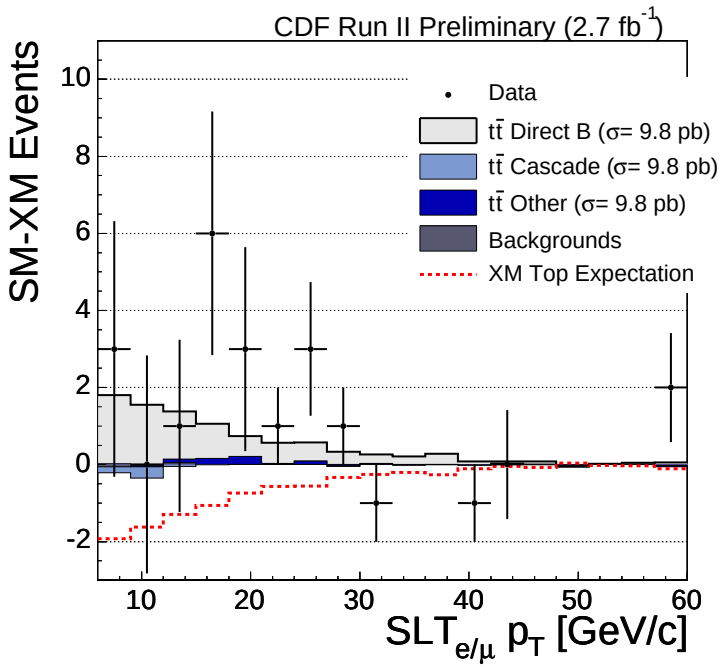
Messung der Top-Quarkladung

- Zuordnung b-jets zu korrektem Top(anti)quark
  Aus bestem Fit an Top-Quarkhyopthese
- Kombiniere Lepton- und b-Ladung
  (leptonische und hadronische Seite):

$$Q_{\mathrm{lep}} = \left|q_l + q_{b_{\mathrm{l}}}\right|$$
$$Q_{\mathrm{had}} = \left|-q_l + q_{b_{\mathrm{h}}}\right|$$

- Vergleich mit Simulation (SM und exotisch)





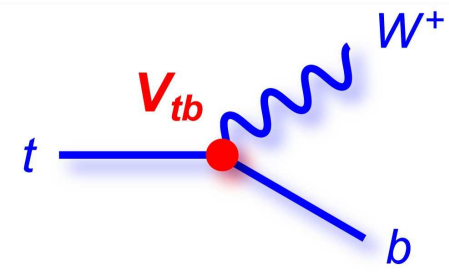
Resultate

Exotischer Fall mit 95% C.L. ausgeschlossen

Keine Aussage über elektromagnetische Kopplung der Top-Quarks

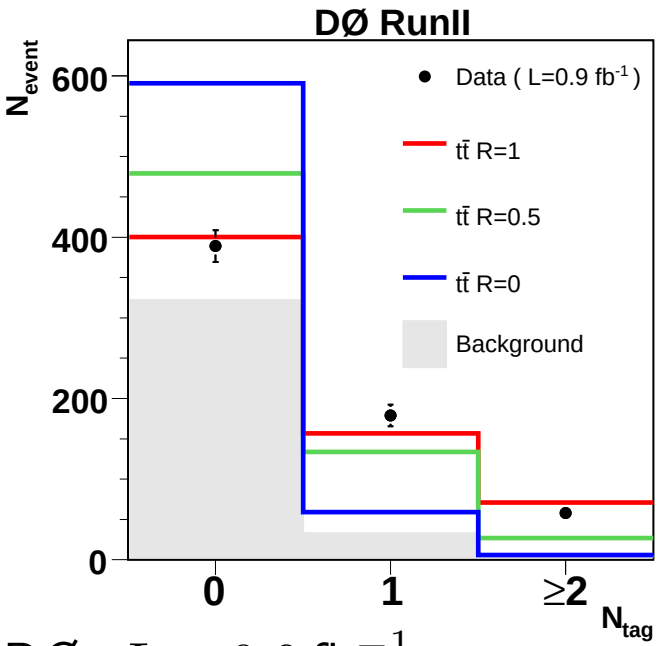
d) Top-Quark Zerfall

Verzweigungsverhältnis



Aus Ereigniszahl mit 0,1 bzw. 2 identifizierten b-Jets

$$R = \frac{B(t \to Wb)}{B(t \to Wq)} = \frac{|V_{tb}|^2}{|V_{tb}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{td}|^2} = 0.97 \pm 0.09$$



DØ, $L = 0.9\,\text{fb}^{-1}$

Grenzen an die CKM-Matrix

Annahme 3 Generationen:

$\sqrt{R} = |V_{tb}| > 0.88$ at 95% C.L. (SM: 0.9991)

Beste experimentelle Grenze

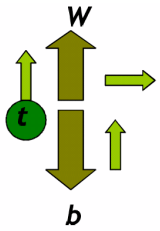
Beliebige Anzahl an Generationen:

$$\frac{|V_{tb}|^2}{|V_{ts}|^2 + |V_{td}|^2} > 3.76 \text{ at } 95\% \text{ C.L.}$$

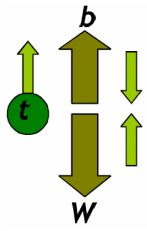
Wichtige Basis für direkten Messungen in Single Top

W-Helizität in Top-Quarkzerfällen

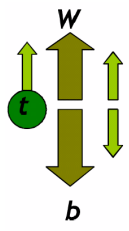
Zeigt der Top-Quarkzerfall die erwartete Spinstruktur?
SM: Nur linkshändige Teilchen koppeln an W-Bosonen ($V-A$ Kopplung),
W ist linkshändig oder longitudinal.



Longitudinal W
SM: $f_0 = 70\%$



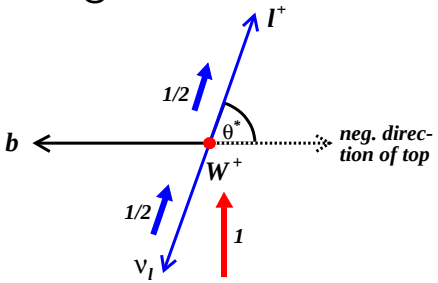
Linkshändig W
SM: $f_- = 30\%$



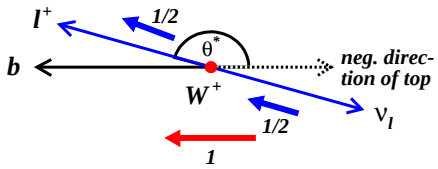
Rechtshändig W
SM: unterdrückt ($f_+ \simeq 0$)

Im W-Ruhesystem: geladenes Lepton aus W-Zerfall läuft (bevorzugt)

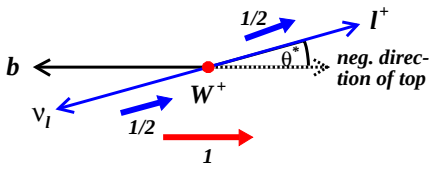
orthogonal zum b



parallel zur b-Richtung

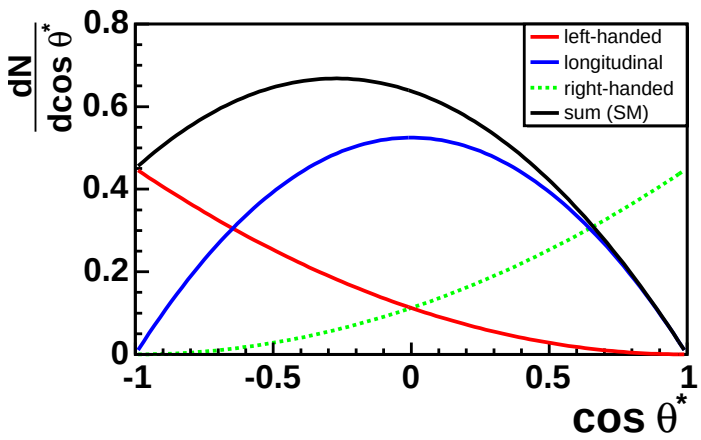


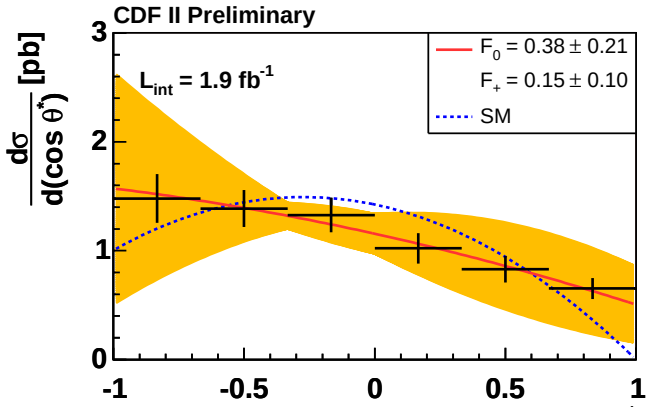
antiparallel zur b-Richtung

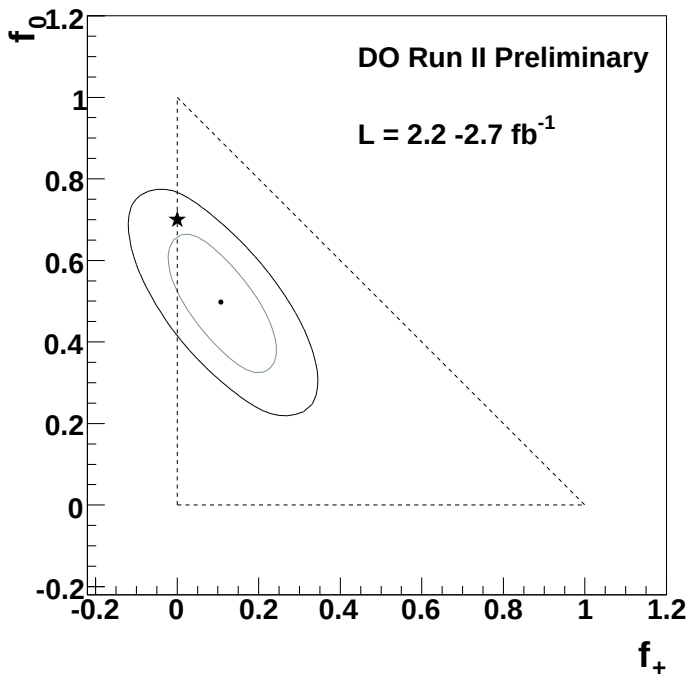


Eine mögliche Observable: Winkel zwischen b und ℓ: $\cos\theta^*$

Resultate aus $\cos\theta^*$ Messungen







- Selektion: ℓ+jets und Dilepton
- Vergleich Daten mit Simulation der links-, rechtshändigen und longitudinalen Polarisation
- Fit Polarisationsanteile: f_0, f_+

DØ: $f_0 = 0.49 \pm 0.14$ und $f_+ = +0.11 \pm 0.08$

SM: $f_0 = 0.7$ $\quad f_+ \simeq 0$

Helizitätsanteile auf $\sim 10\%$ bekannt

Zusammenfassung

- Auch 15 Jahre nach der Entdeckung ist das Top-Quark hochinteressant.
- Tevatron Experimente CDF and DØ testen alle Aspekte

Produktionseigenschaften

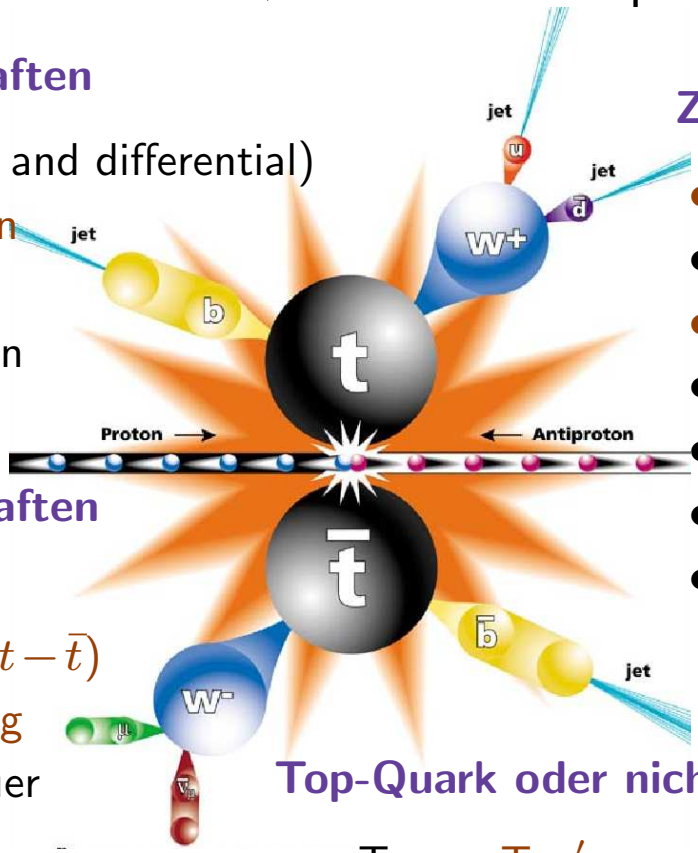
- Cross-section (total and differential)
- Resonant production
- Charge asymmetry
- Gluon fusion fraction

...

Inherente Eigenschaften

- Masse
- Massendifferenz $(t - \bar{t})$
- Elektrische Ladung
- Breite; Lebensdauer

...



Zerfallseigenschaften

- W Helizität
- Wtb anomale Kopplungen
- Zerfallsraten; V_{tb}
- FCNC
- Geladenes Higgs
- ttH
- W'

...

Top-Quark oder nicht?

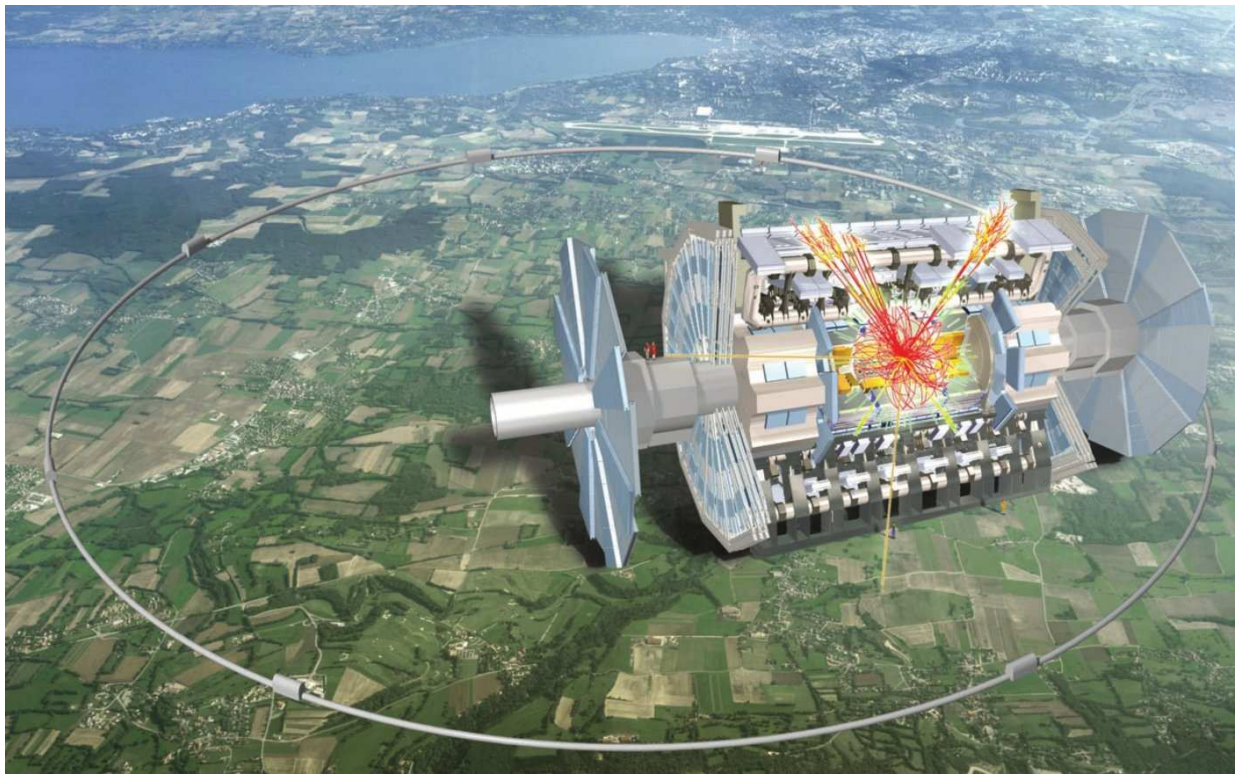
- sTop or Top′

- *Keine signifikanten Abweichungen (bisher).*

Ausblick

Der Large Hadron Collider (LHC) läuft seit Herbst 2009

- Proton-Proton-Kollisionen bei $7\,\text{TeV}$
- Wirkungsquerschnitt Topproduktion
  ~ 30fach höher
  geringerer Untergrund
- Int. Luminosität $1\,\text{fb}^{-1}$
  (Ende 2011 erwartet)



Bereits Ende 2011
wird LHC konkurrenzfähig.