



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

Das Top-Quark

Frederick K.-F. Kleinwort

Sommerakademie Neubauern 2008,
Arbeitsgruppe 2: Physik am LHC

13. August 2008



Was uns heute erwartet

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

- 1 Einleitung und Grundlagen
 - Heutiges Wissen
- 2 Produktion und Zerfall an Hadron-Collidern
 - Top-Paarproduktion
 - Single-Top-Produktion
 - 2005: erste Ergebnisse
 - 2006: Erfolg
 - Zerfallskanäle
 - Beispiele von Ereignissen
- 3 Das Top-Quark in Genf
 - LHC
 - Warum Top-Physik?



Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

vor 1995
lange Suche
Heutiges Wissen

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

Einleitung und Grundlagen



Einleitung: Die Welt vor 1995

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

vor 1995

lange Suche
Heutiges Wissen

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

- 1960er und 1970er Jahre: 5 Quarks experimentell gefunden

Quark	Jahr	Masse	q	t_3
up	1964*	$< 3 \text{ MeV}$	$+2/3$	$+1/2$
down	1964*	$< 7 \text{ MeV}$	$-1/3$	$-1/2$
strange	1964*	$\approx 95 \text{ MeV}$	$-1/3$	$-1/2$
charm	1974	$\approx 1.3 \text{ GeV}$	$+2/3$	$+1/2$
bottom	1977	$\approx 4.2 \text{ GeV}$	$-1/3$	$-1/2$

- $q = t_3 + \frac{Y_w}{2} = t_3 + \frac{1}{6}$ Gell-Mann-Nishijima-Formel

*: von Gell-Mann postuliert, um Experimente zu erklären.



Einleitung: Fehlt da noch eins?

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

vor 1995

lange Suche

Heutiges Wissen

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

- *Annahme*: Quarks haben schwachen Isospin $\frac{1}{2}$
- $\Rightarrow$ Dubletts, immer zwei Teilchen pro Generation
- Bottom-Quark war noch ohne Partner
- $\Rightarrow$ es gibt ein schwereres Teilchen mit $t_3 = +1/2$
- | | | | | |
|--------|------|---------------------------|--------|--------|
| bottom | 1977 | $\approx 4.2 \text{ GeV}$ | $-1/3$ | $-1/2$ |
| top | | $\gtrsim 1 \text{ GeV}$ | $+2/3$ | $+1/2$ |



Einleitung: Die Suche kann beginnen

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

vor 1995

lange Suche

Heutiges Wissen

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

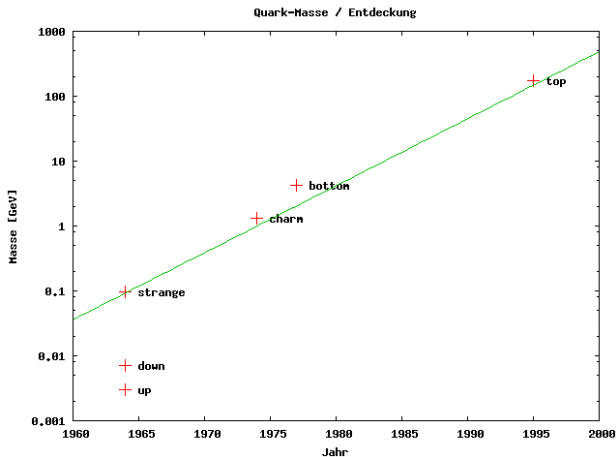


Abbildung: Quark-Massen und Jahr der Entdeckung



Die untere Massengrenze

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

vor 1995

lange Suche

Heutiges Wissen

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

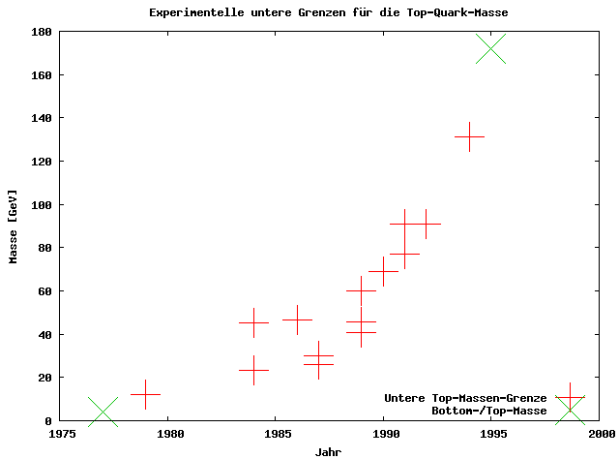


Abbildung: Experimentelle untere Grenzen an die Top-Masse



20 Jahre Suche...

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

vor 1995

lange Suche

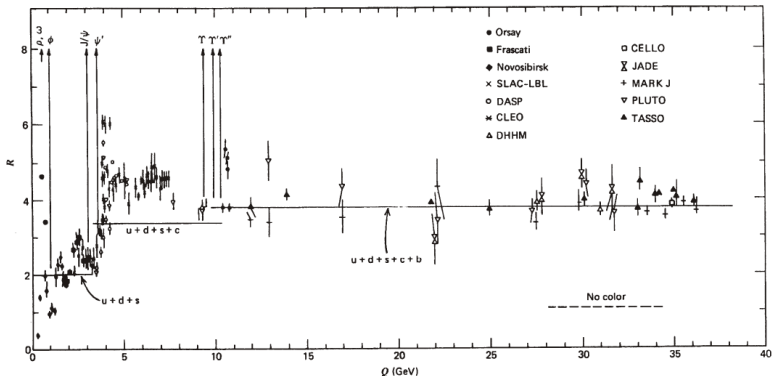
Heutiges Wissen

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

- elektromagnetisch
- e^+e^- -Streuung, R -Verhältnis





20 Jahre Suche...

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

vor 1995

lange Suche

Heutiges Wissen

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

elektromagnetisch:

- e^+e^- -Streuung, R -Verhältnis
- LEP: $m_{\text{top}} \geq \frac{90}{2} \text{ GeV}$

schwach:

- Sp $\bar{p}$ S: $W \rightarrow tb$
- Sp $\bar{p}$ S: $m_{\text{top}} \geq 69 \text{ GeV}$
- indirekte Vorhersagen von m_{top} über Schleifen
- $m_{\text{top}} = f(m_W, m_Z, m_H)$



20 Jahre Suche...

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

vor 1995

lange Suche

Heutiges Wissen

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

elektromagnetisch:

- e^+e^- -Streuung, R -Verhältnis
- LEP: $m_{\text{top}} \geq \frac{90}{2} \text{ GeV}$

schwach:

- Sp $\bar{p}$ S: $W \rightarrow tb$
- Sp $\bar{p}$ S: $m_{\text{top}} \geq 69 \text{ GeV}$
- indirekte Vorhersagen von m_{top} über Schleifen
- $m_{\text{top}} = f(m_W, m_Z, m_H)$

stark:

- Tevatron: Starke Wechselwirkung $\rightarrow$ stärkere Kopplung
- $\Rightarrow$ Vortrag morgen



20 Jahre Suche...

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

vor 1995

lange Suche

Heutiges Wissen

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

elektromagnetisch:

- e^+e^- -Streuung, R -Verhältnis
- LEP: $m_{\text{top}} \geq \frac{90}{2} \text{ GeV}$

schwach:

- Sp $\bar{p}$ S: $W \rightarrow tb$
- Sp $\bar{p}$ S: $m_{\text{top}} \geq 69 \text{ GeV}$
- indirekte Vorhersagen von m_{top} über Schleifen
- $m_{\text{top}} = f(m_W, m_Z, m_H)$

stark:

- Tevatron: Starke Wechselwirkung $\rightarrow$ stärkere Kopplung
- $\Rightarrow$ Vortrag morgen



Heutiges Wissen - Mittelwert DØ + CDF

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

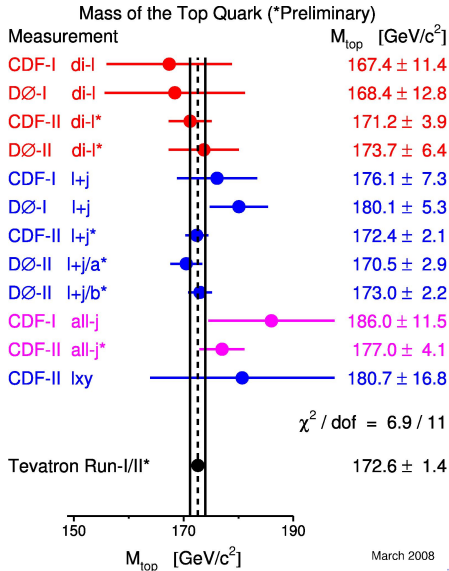
vor 1995
lange Suche

Heutiges Wissen

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur



March 2008



Eigenschaften des Top-Quarks

- Schwerstes beobachtetes Elementarteilchen: Masse des Top-Quark: $m_t = 172.5 \pm 1.3 \pm 1.9 \text{ GeV}$ (rpp-2006)
- Sehr kurze Lebensdauer: $\tau_t \approx 4,2 \cdot 10^{-25} \text{ s} \Rightarrow$ keine Zeit für Hadronisierung ($\approx 10^{-23} \text{ s}$)
- Ladung $q_t = \frac{2}{3}e$ ($> 90\% \text{ CL}$)
- Spin $s = \frac{1}{2}$



Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

Literatur

Produktion und Zerfall des Top-Quarks



Top-Paarproduktion

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

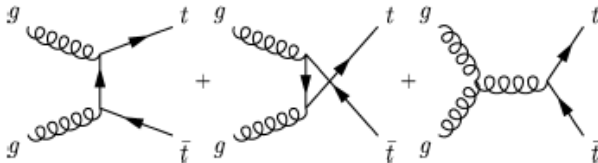
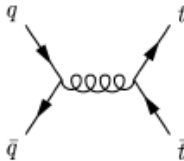
Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

Literatur

$$\sigma^{t\bar{t}}(\sqrt{s}, m_t) = \sum_{i,j=q,\bar{q},g} \int dx_i dx_j f_i(x_i, \mu^2) \bar{f}_j(x_j, \mu^2) \cdot \sigma^{ij \rightarrow t\bar{t}}(\sqrt{s}, m_t^2, x_i, x_j, \alpha_s(\mu), \mu^2)$$





Top-Paarproduktion

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

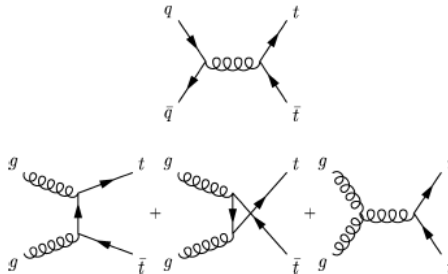
Literatur

TEVATRON:

- 85% aus $q\bar{q}$ und 15% aus gg
- $\sigma^{t\bar{t}}(\sqrt{s} = 1,96 \text{ TeV}) \approx 7 \text{ pb}$

LHC:

- 10% aus $q\bar{q}$ und 90% aus gg
- $\sigma^{t\bar{t}}(\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}) \approx 800 \text{ pb}$
- 8 Millionen $t\bar{t}$ -Paare pro Jahr





Top-Paarproduktion

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

Literatur

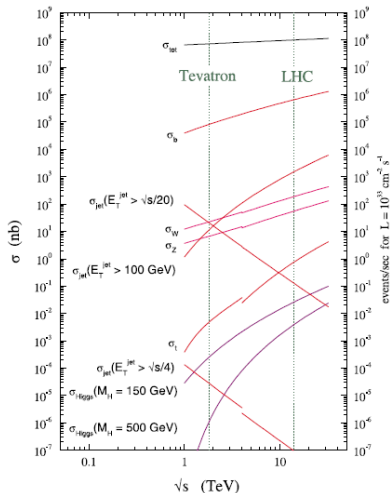


Abbildung: QCD-Vorhersagen für Wirkungsquerschnitte beim TEVATRON und LHC; σ_t steht für $t\bar{t}$ -Produktion durch starke WW



Single-Top-Produktion

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

Literatur

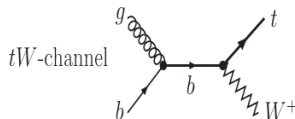
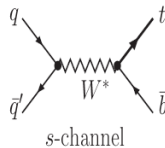
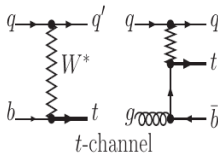
- $p\bar{p} \rightarrow t\bar{b} + X$ (s-Kanal)
- $p\bar{p} \rightarrow tq\bar{b} + X$ (t-Kanal)
- Theoretischer Wirkungsquerschnitt (QCD, NLO):

TEVATRON

- s-Kanal: 0.88(14) pb
- t-Kanal: 1.98(30) pb

LHC

- s-Kanal: 10, 2(7) pb
- t-Kanal: 245(27) pb





Single-Top

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle
Beispiele

Ausblick

Literatur

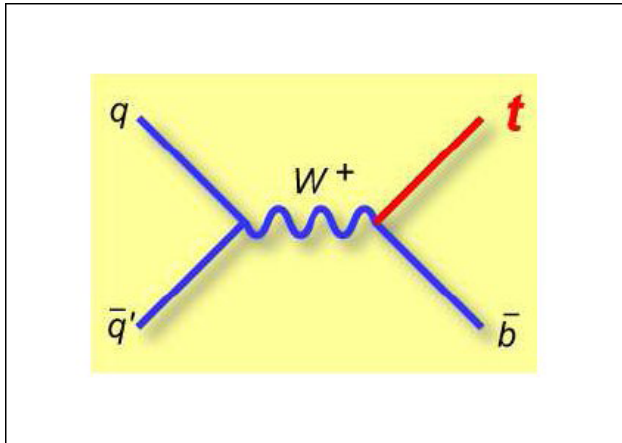


Abbildung: Single-Top-Produktion, s-Kanal



Single-Top

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle
Beispiele

Ausblick

Literatur

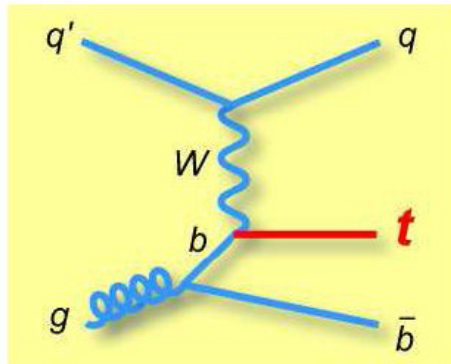


Abbildung: Single-Top-Produktion, t-Kanal



Single-Top- Produktion

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle
Beispiele

Ausblick

Literatur

- Neue Experimente der DØ-Kollaboration: einzelne Top-Quarks
- Schwache Wechselwirkung
- Signatur des einzelnen Tops = Zerfallsprodukte: Bottom, Lepton + Neutrino
- Standard-Modell: einzelnes Top wird alle 330 Millionen Kollisionen erzeugt
- Filtere Ereignisse ohne Bottom, Lepton, Neutrino heraus
- → 700 Ereignisse
- Untergrund sehr viel stärker



Die Ergebnisse der Suche (2005, DØ)

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

Literatur

- „No evidence is found for electroweak production of single top quarks in 230 pb^{-1} of data.“
- obere Grenze für Wirkungsquerschnitt:
 - s-Kanal: $\sigma \leq 6.4 \text{ pb}$
 - t-Kanal: $\sigma \leq 5.0 \text{ pb}$



Die Ergebnisse der Suche (Dez. 2006, DØ) (1)

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion
Single-Top-
Produktion
2005

2006

Zerfallskanäle
Beispiele

Ausblick

Literatur

- „we have performed a search for single top quark production using 0.9 fb^{-1} of data“
- „We find an excess of events over the background prediction“
- Signifikanz von 3.4 Standardabweichungen
- → „interpret it as evidence for single top quark production“



Die Ergebnisse der Suche (Dez. 2006, DØ) (2)

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

Literatur

- Wirkungsquerschnitt: $\sigma = 4.9(14) \text{ pb}$
- $0.68 < |V_{tb}| \leq 1 @ 95 \% \text{ C.L.}$
- Standardmodell 3 Quarks: $|V_{tb}| \approx 1$



Top-Zerfall

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle

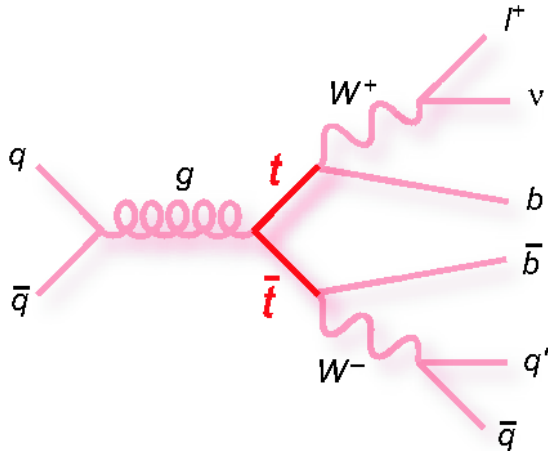
Beispiele

Ausblick

Literatur

Das Top zerfällt zu 99,8% zu Wb

⇒ Die Endzustände hängen vom Zerfall des W ab





Top-Endzustände

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

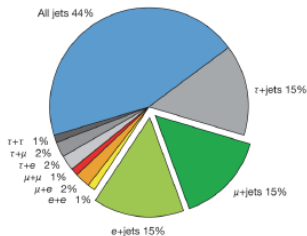
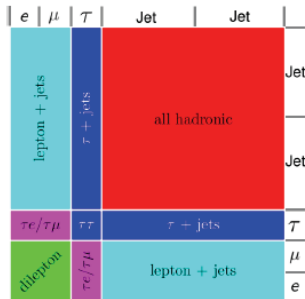
2006

Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

Literatur





Top-Zerfall

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

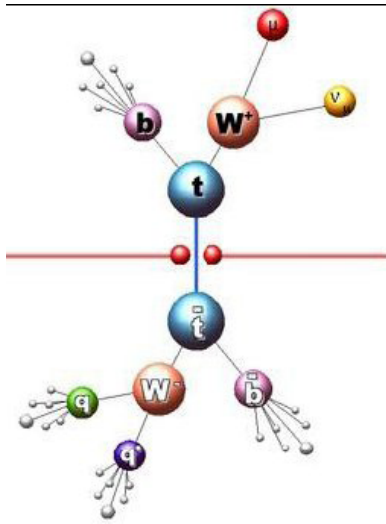
2006

Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

Literatur





Beispiele (1)

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

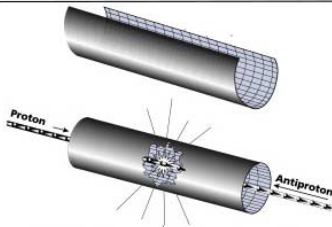
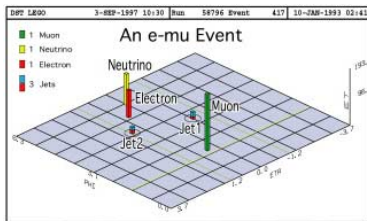
2006

Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

Literatur



Collision in Calorimeter

Abbildung: Detektor (unten), Lego-Plot (oben)



Beispiele (2)

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

Literatur

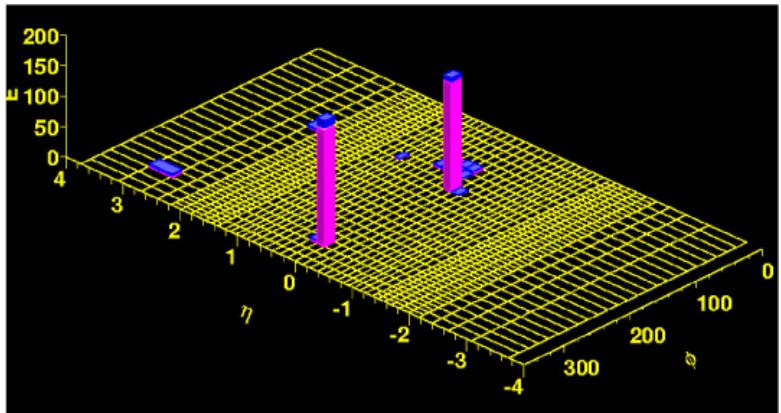


Abbildung: zwei Elektronen im Lego-Plot



Beispiele (3)

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Top-
Paarproduktion

Single-Top-
Produktion

2005

2006

Zerfallskanäle

Beispiele

Ausblick

Literatur

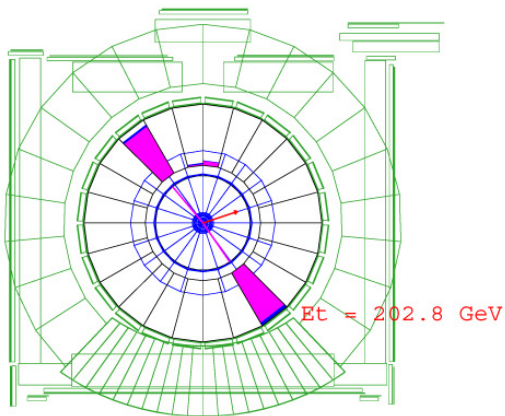


Abbildung: cot-Plot: Ereigniss längs der Beampipe



Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Ausblick

LHC

Warum
Top-Physik?

Literatur

Ausblick: Das Top-Quark in Genf



Ausblick: Top-Quark am LHC

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Ausblick

LHC

Warum
Top-Physik?

Literatur

- LHC-Start: 2. Hälfte 2008 (noch 27 Tage)
- höhere Luminosität, höhere Energie $\sqrt{s}_{LHC} = 14 \text{ TeV}$
- $\rightarrow$ deutlich höhere Top-Quark-Produktion
- Wirkungsquerschnitt: $6 \text{ pb} \rightarrow 800 \text{ pb}$
- 8 Millionen $t\bar{t}$ -Paare pro Jahr
- neue physikalische Erkenntnisse durch präzisere Messungen
- Ziel: $\Delta m = 1 \text{ GeV}$



Das Außnahme(?) - Lepton

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Ausblick

LHC

Warum
Top-Physik?

Literatur

charge	LEPTONS		
	Electron Neutrino Mass ~ 0	Muon Neutrino ~ 0	Tau Neutrino ~ 0
0			
-1	Electron .511	Muon 105.7	Tau 1 777
	QUARKS		
+2/3	Up Mass: 5	Charm 1 500	Top $\sim 180\,000$
-1/3	Down 8	Strange 160	Bottom 4 250

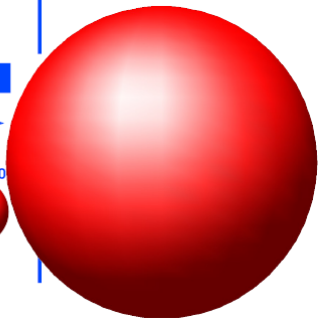


Abbildung: Lepton-Massen im Vergleich



Neue Physik?

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Ausblick

LHC

Warum
Top-Physik?

Literatur

- Strahlungskorrekturen zur W -Masse setzen m_W , m_H und m_t in Verbindung
- $\Delta m_W \propto m_t^2$ und $\Delta m_W \propto \ln(m_H^2)$

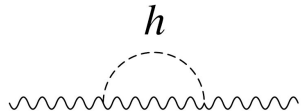
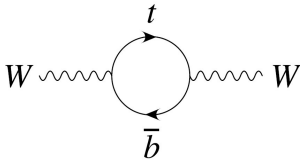


Abbildung: Strahlungskorrekturen zur W -Masse



Neue Physik?

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Ausblick

LHC

Warum
Top-Physik?

Literatur

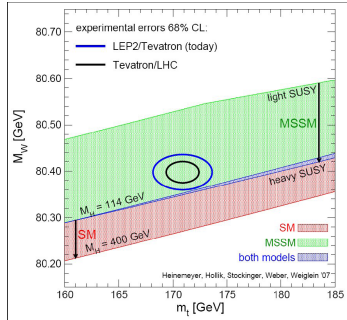


Abbildung: Abhängigkeit der Higgs-Masse von der Top- und W-Masse im SM und SMMS

- zur Überprüfung von SUSY-Theorien wird ebenfalls die Top-Masse benötigt
- Top guter Kandidat um in SUSY-Teilchen überzugehen



Neue Physik?

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

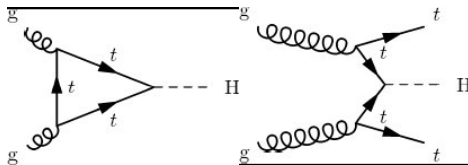
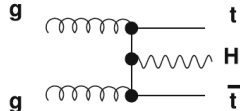
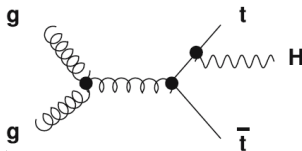
Ausblick

LHC

Warum
Top-Physik?

Literatur

- Assoziiertes Higgs bei Gluon-Fusion, $t\bar{t}$ -Produktion





Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

Literatur & Ende



Literatur

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

- Gell-Mann: A Schematic Model of Baryons and Mesons, Phys Lett 1964
- DØ + CDF: Observation of Top Quark (Production in $p\bar{p}$ Collisions with the Collider Detector at Fermilab), PRL 1995
- DØ: Search for single top quark production in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV, 2005
- DØ: Experimental Discrimination between Charge $2e/3$ Top Quark and Charge $4e/3$ Exotic Quark Production Scenarios, PRL 2007
- DØ: Evidence for Production of Single Top Quarks and First Direct Measurement of $|V_{tb}|$, PRL 2007
- A. Quadt: Habilitation
- Particle Data Group: Review 2006
- Scientific American, Sept. 1997: The Discovery of the Top Quark (CDF)
- http://*.fnal.gov



Ende

Top-Quark

F. Kleinwort

Inhalt

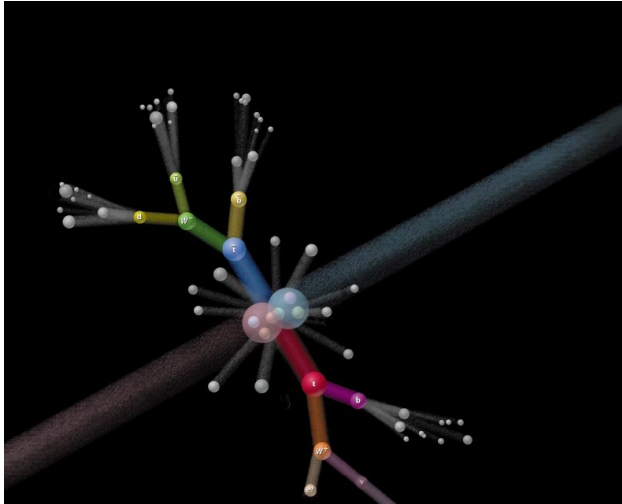
Einleitung

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur

**Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit!
Fragen?**





What holds things together

Top-Quark

F. Kleinwort

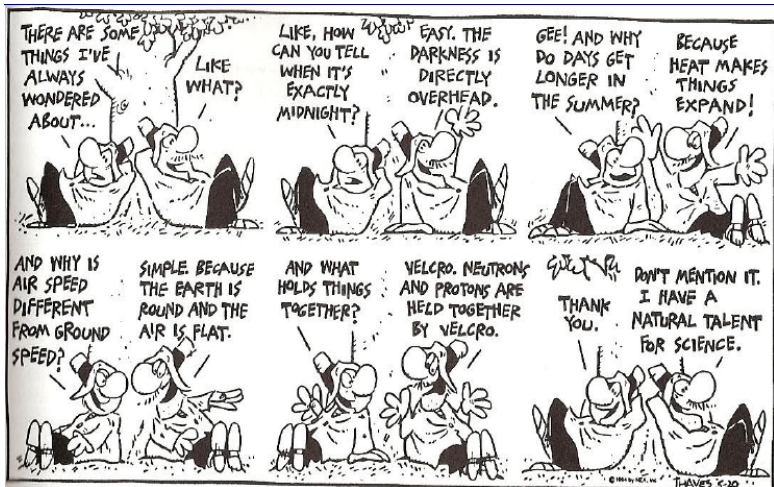
Inhalt

Einleitung

Produktion
und Zerfall

Ausblick

Literatur



*“velcro“ = Klettband