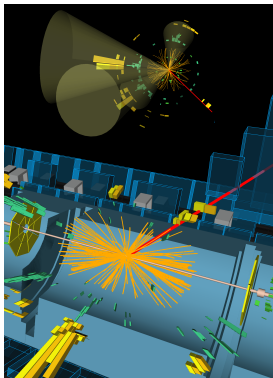


Messung des Wirkungsquerschnitts der Top-Quark Paarproduktion mit dem ATLAS Experiment

Patrick Rieck

Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut)

TUM Seminar -
Physik am LHC
30. Januar 2016





- ▶ Motivation des LHC durch zwei Ziele
 1. Suche nach dem Higgs-Boson ✓
 2. Suche nach Phänomenen jenseits des Standardmodells der Elementarteilchenphysik ?
- ▶ Mögliche Gründe für das Ausbleiben weiterer Entdeckungen
 - ▶ Begrenzte Reichweite des LHC - $\Lambda_{\text{BSM}} \gg 1 \text{ TeV}$
 - ▶ Signatur übersehen
 - ▶ Kleine Rate neuer Phänomene

Bedeutung des Top-Quarks



- Schwerstes bekanntes Elementarteilchen, $m_t = 173 \text{ GeV}$
- Zerfall $t \rightarrow Wb$ ($\mathcal{BR} \approx 100\%$),
weiterhin $W \rightarrow qq'$ oder $W \rightarrow \ell\nu$
⇒ reichhaltige Phänomenologie,
Untergrund für Prozesse jenseits
des SM

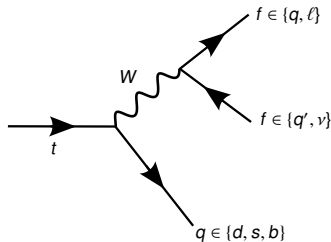
	I	II	III	
Masse	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
Ladung	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
Spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
Name	u up	c charm	t top	Y Photon
Quarks	4.8 MeV $-1/3$ $1/2$ d down	104 MeV $-1/3$ $1/2$ s strange	4.2 GeV $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 g Gluon
	<2.2 eV 0 $1/2$ Elektron- Neutrino	<0.17 MeV 0 $1/2$ Myon- Neutrino	<15.5 MeV 0 $1/2$ Tau- Neutrino	91.2 GeV 0 1 Z schwache Kraft
	0.511 MeV -1 $1/2$ e Elektron	105.7 MeV -1 $1/2$ μ Myon	1.777 GeV -1 $1/2$ τ Tau	80.4 GeV ± 1 1 W schwache Kraft
Leptonen				Bosonen (Kräfte)

- Grosser Phasenraum für den Zerfall, $\Gamma_t \sim G_F m_t^3$
⇒ Zerfall vor Hadronisierung
- Higgs-Fermion Kopplung: $\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = \frac{m_f}{v/\sqrt{2}} \bar{\psi}_f \psi_f h \Rightarrow \frac{m_t}{v/\sqrt{2}} \approx 1 !$

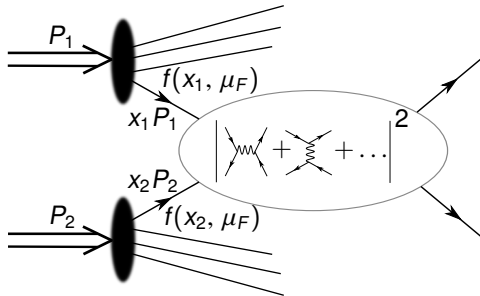
- ▶ Top-Quark Paarproduktion
- ▶ Simulation von hadronischen Kollisionen
- ▶ Experimentelle Techniken
- ▶ Wirkungsquerschnittsmessung

Top-Quark Paarproduktion

- ▶ Schwacher Isospin-partner des b -Quarks
- ▶ SM: $t \rightarrow Wtq$
⇒ hadronische and leptonische Endzustände, abhängig vom W boson Zerfall
- ▶ Flavour Physik und Unitarität der CKM-Matrix ⇒ $|V_{tb}| \approx 1$



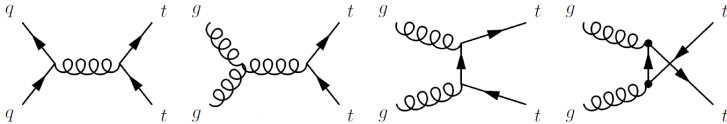
Top-Quark Zerfall



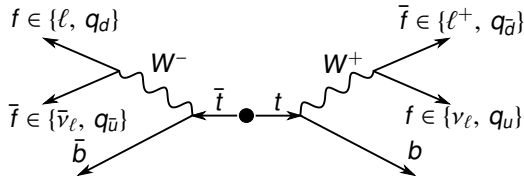
$$\sigma_{\text{hadronic}} = \int dx_1 dx_2 \sum_{i,j} f_i(x_1) f_j(x_2) \sigma_{\text{partonic}}^{ij}(x_1 x_2)$$

- ▶ Faktorisierung hadronischer (soft) und partonischer Wechselwirkungen (hart)
 - ▶ Soft: PDFs f_i – aus eigenständigen Messungen
 - ▶ Hart: Partonischer Wirkungsquerschnitt $\sigma_{\text{partonic}}^{ij}$ – Störungstheorie

Top-Quark Paarproduktion



- **Starke Wechselwirkung** - dominanter Produktionsmodus
- LHC (pp -Kollisionen): hohe Gluon-Beiträge $\Rightarrow$ hoher Wirkungsquerschnitt auch ohne Antiproton-Strahl



- **Verschiedene Zerfallskanäle** – $N_{\ell^\pm} \in \{0, 1, 2\}$

Simulation von hadronischen Kollisionen

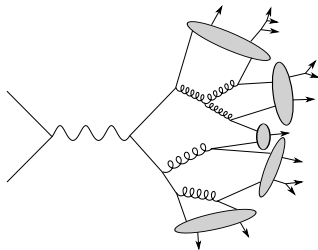
- ▶ Harter Streuprozess: Monte Carlo Integration des voll differentiellen, partonischen WQs

$$\sigma = \int dx_1 dx_2 \sum_{i,j} d\Phi f_i(x_1) f_j(x_2) \frac{1}{2x_1 x_2 s} |\mathcal{M}|^2$$

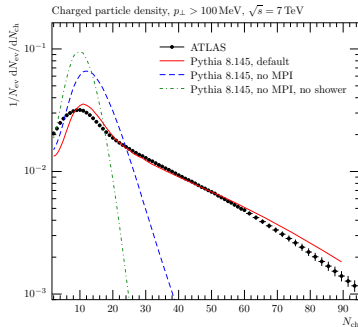
- ▶ Parton Shower: Splitting von Partonen zwischen Energieskalen Q und Q_0

$$d\sigma_{0+k} \approx \sigma_0 \cdot \sum_{\{\text{partons } i\}} \frac{\alpha_S}{2\pi} \frac{d\vartheta^2}{\vartheta^2} dz d\varphi P_{ki}(z, \varphi)$$

- ▶ Underlying event: Multiple Parton Interactions
- ▶ Teilchenzerfälle
- ▶ QED Bremsstrahlung
- ▶ Zusätzliche pp -Kollisionen (soft)
- ▶ Detektorsimulation



- ▶ Hohe Komplexität der Ereignissimulation - notwendig zur Beschreibung der Messdaten
- ▶ State of the art: NLO - Generatoren, harter Streuprozess mit virtuellen und reellen QCD-Korrekturen
 - ▶ Notwendig um mit experimenteller Präzision mitzuhalten



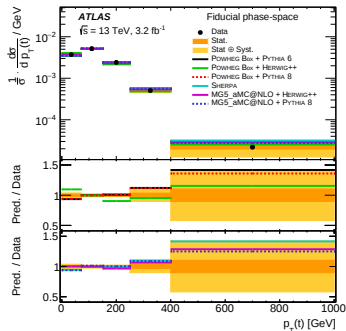
Multiplizität geladener Teilchen

Simulation von hadronischen Kollisionen

Vergleiche mit Messdaten



- ▶ Hohe Komplexität der Ereignissimulation - notwendig zur Beschreibung der Messdaten
- ▶ State of the art: NLO - Generatoren, harter Streuprozess mit virtuellen und reellen QCD-Korrekturen
 - ▶ Notwendig um mit experimenteller Präzision mitzuhalten



Normalised fiducial differential $t\bar{t}$ cross-section

Experimentelle Techniken

► Drei Kanäle der $t\bar{t}$ Produktion

- Voll-hadronisch
- Semi-leptonisch
- Di-leptonisch

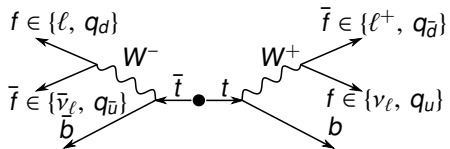
► Verschiedene Untergründe

- Multijet Produktion
- W +jets, Z +jets
- Single Top-Quark Produktion

► Bevorzugung des Di-lepton Kanals

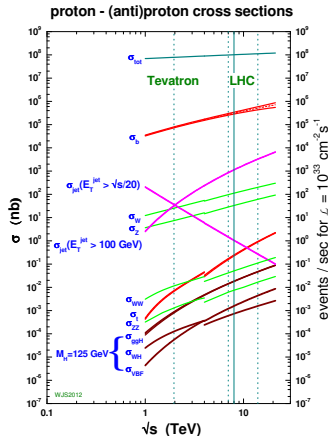
- Geringer Untergrund (insbesondere im $e\mu$ -Kanal)
- Hohe Präzision
- Hohe Ereignisraten trotz geringen $\mathcal{BR}$ dank hoher Luminosität

► Signatur: $e, \mu, (E_T^{\text{miss}})$, zwei b -jets



Trigger gemäss einem der gesuchten Objekte

- ▶ b -jets: Untergrund hoch
 $\Rightarrow p_T$ -Schwelle hoch
 $\Rightarrow$ Rate geringe
- ▶ E_T^{miss} : gleiches Problem
- ▶ e OR μ : Untergrund W +jets moderat
 $\Rightarrow$ Relativ niedrige Triggerschwellen von
ca. $p_T = 25 \text{ GeV}$
 $\Rightarrow$ Relativ hohe Triggerrate für $e\mu t\bar{t}$
Ereignisse





- ▶ Eingeschränkter Akzeptanz-Bereich
 - ▶ Hoher Transversalimpuls
 - ▶ Richtung innerhalb des inneren Spurdetektors
- ▶ Primärvertex als Ursprung
- ▶ Isolation, kein Überlapp mit Jets
- ▶ Korrektur der Rekonstruktionseffizienzen in Simulationen
- ▶ Kalibrationen basierend auf $Z \rightarrow \ell\ell$ Ereignissen

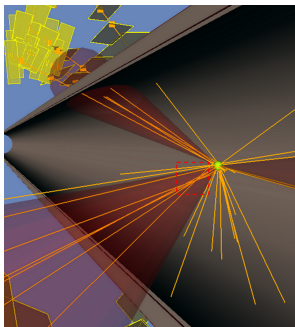
Elektron-spezifisch

- ▶ Kalorimeterenergie, $E_T > 25 \text{ GeV}$, Kalorimeter-Isolation

Myon-spezifisch

- ▶ Transversalimpuls $p_T > 25 \text{ GeV}$, zwei unabhängige Messungen (innerer Detektor vs. Myon-spektrometer)

- ▶ Cluster aus Kalorimeterzellen, Anti- k_T -Algorithmus ($D = 0.4$), $p_T > 25 \text{ GeV}$
 - ▶ Absolute Energiekalibration basierend auf $Z \rightarrow \ell\ell + \text{jet}$ und $\gamma + \text{jet}$ Ereignissen
 - ▶ Bezug der Energiekalibration auf Hadron-Level jets mit Hilfe von Simulationen
-
- ▶ Besonderheit von jets mit B -Hadronen: b -tagging
 - ▶ Hohe Lebensdauer von B -Hadronen
⇒ Sekundärvertices bzw. hohe Impact Parameter von Spuren
 - ▶ Limitierung auf Akzeptanz des inneren Spurdetektors



Wirkungsquerschnitts- messung

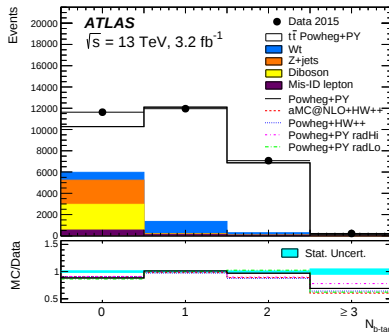


- ▶ pp -Kollisionsdaten 2015, $L = 3.2\text{fb}^{-1}$, $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$
- ▶ Ereignisselektion: genau ein Elektron und ein Myon, entgegengesetzte Ladung, geometrischer Abstand
- ▶ Zählen der Anzahl der b -jets

$$N_1 = L\sigma_{t\bar{t}}2\varepsilon_{e\mu}\varepsilon_b(1 - C_b\varepsilon_b) + N_1^{\text{bkg}}$$

$$N_2 = L\sigma_{t\bar{t}}C_b\varepsilon_b^2 + N_2^{\text{bkg}}$$

- ▶ $N_{1,2}^{\text{bkg}}$ aus Simulationen bzw. Daten-basiert (Lepton Fakes anhand von Same-Sign Ereignissen abgeschätzt)
- ▶ $C_b = \varepsilon_{bb}/\varepsilon_b^2 = 1.002$ (Simulation)
- ▶ $\varepsilon_{e\mu} = 0.83\%$ (Simulation)
- ▶ Messung von N_1 und $N_2 \Rightarrow \varepsilon_b$ und $\sigma_{t\bar{t}}$



- ▶ Hier: Normierung verschiedener $t\bar{t}$ Simulationen auf den theoretischen Wirkungsquerschnitt (NNLO+NNLL)
- ▶ Gute Beschreibung von N_1 und N_2
- ▶ Schwierigkeit der Modellierung von N_0 (WW , Z +jets) und N_{3+} ($t\bar{t}$ + Heavy Flavour) - keine Relevanz für die Messung



- ▶ Für jede systematische Unsicherheit:
Wiederholung der Bestimmung von $\sigma_{t\bar{t}}$ mit entsprechender Veränderung aller eingehenden Parameter
- ▶ Quadratische Summation aller resultierenden Variationen von $\sigma_{t\bar{t}}$
- ▶ Wichtigste Beiträge:
 - ▶ Integrierte Luminosität
 - ▶ $t\bar{t}$ Modellierung, insbesondere Parton Shower und Hadronisierung



- ▶ Totaler Wirkungsquerschnitt:

$$\sigma_{t\bar{t}} = 818 \pm 8(\text{stat}) \pm 27(\text{syst}) \pm 19(\text{lumi}) \pm 12(\text{beam}) \text{ pb}$$

- ▶ Vergleich mit der Theorie (NNLO+NNLL):

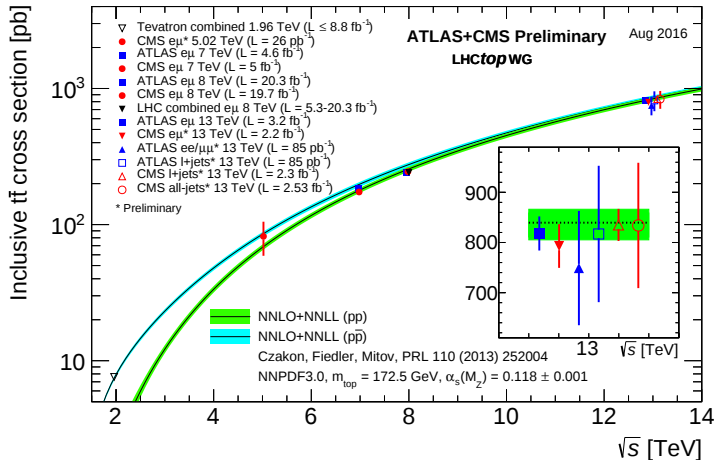
$$\sigma_{t\bar{t}} = 832^{+40}_{-46} \text{ pb}$$

- ▶ Fiducial cross-section: Bezug auf Akzeptanz $\varepsilon_{e\mu} = A_{e\mu} G_{e\mu}$
($e\mu$, $p_T^\ell = 25 \text{ GeV}$, $|\eta^\ell| < 2.5$), keine Extrapolation auf den vollen Phasenraum $\Rightarrow$ geringere Modellierungsunsicherheiten

$$\begin{aligned}\sigma_{t\bar{t}}^{\text{fid}} &= A_{e\mu} \sigma_{t\bar{t}} = (\varepsilon_{e\mu} \sigma_{t\bar{t}}) / G_{e\mu} \\ &= 11.32 \pm 0.10(\text{stat}) \pm 0.29(\text{syst}) \pm 0.26(\text{lumi}) \pm 0.17(\text{beam}) \text{ pb}\end{aligned}$$

Wirkungsquerschnittsmessung

Übersicht



- ▶ Top-Quark Paarproduktion als Test des SM / bedeutender Untergrund für zahlreiche Suchen nach neuen Phänomenen
- ▶ Wirkungsquerschnittsmessung = Zusammenspiel von Theorie und Experiment
- ▶ Hohe Präzision der Messung von $\sigma_{t\bar{t}}$, begrenzt durch Modellierung (Theorie), Luminosität und Strahlenergiegenauigkeit (LHC)