

---

## W-Massenmessung

---

Julia Sobolewski

**11. Juni 2019**

Fakultät Physik

## Inhaltsverzeichnis

### Einleitung

- Was sind W-Bosonen?
- Entdeckung des W-Bosons
- Motivation
- Theoretische Grundlagen

### Tevatron

- Allgemeines
- Beschleuniger-Kette
- Detektoren

### Messstrategie und Unsicherheiten am Beispiel von CDF Run II Daten

- Modellierung von Produktion und Zerfall des W-Bosons
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

### Zusammenfassung

## Inhaltsverzeichnis

### Einleitung

- Was sind W-Bosonen?
- Entdeckung des W-Bosons
- Motivation
- Theoretische Grundlagen

### Tevatron

- Allgemeines
- Beschleuniger-Kette
- Detektoren

### Messstrategie und Unsicherheiten am Beispiel von CDF Run II Daten

- Modellierung von Produktion und Zerfall des W-Bosons
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

### Zusammenfassung

## Was sind W-Bosonen?

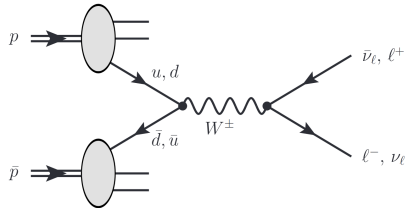
Drei Generationen  
der Materie (Fermionen)

	I	II	III	
Masse →	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Photon
				125,09 GeV <b>H</b> Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> Gluon
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>e</sub></b> Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>μ</sub></b> Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>τ</sub></b> Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 <b>Z<sup>0</sup></b> Z Boson
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>μ</b> Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>τ</b> Tau	80,4 GeV $\pm 1$ 1 <b>W<sup>±</sup></b> W Boson
Leptonen				Eichbosonen

- Eichboson
- vermittelt in der elektroschwachen Theorie die geladenen Ströme
- Ladung:  $q = \pm e$
- Spin:  $s = 1$
- mittlere Lebensdauer:  $3 \cdot 10^{-25} \text{ s}$
- Masse:  $m_W = (80,379 \pm 0,012) \text{ GeV}$

Abbildung: Standardmodell der Teilchenphysik [8]

## Entdeckung des W-Bosons



**Abbildung:** Feynman-Diagramm niedrigster Ordnung zur Erzeugung von W-Bosonen [11]

- 1983 am Super Proton Synchrotron (SPS)
- Im naiven Partonmodell entsteht das W-Boson bei Kollision eines Valenzquarks des Protons ( $u, d$ ) mit einem Valenzantiquark des Antiprotons ( $\bar{u}, \bar{d}$ )

- Valenzquark und -antiquark tragen je einen Impulsanteil von  $x_{1,2} \approx 0,2$  des (Anti-)Protons
- Um ein W-Boson zu erzeugen, wird eine Parton-Parton-Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{\hat{s}} = 80 \text{ GeV}$  und somit eine  $p\bar{p}$ -Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s} = \sqrt{\frac{\hat{s}}{x_1 x_2}} \approx 400 \text{ GeV}$  benötigt
- Solche Schwerpunktsenergien waren zuerst am SPS vorhanden ( $\sqrt{s} = 540 \text{ GeV}$ )

## Motivation

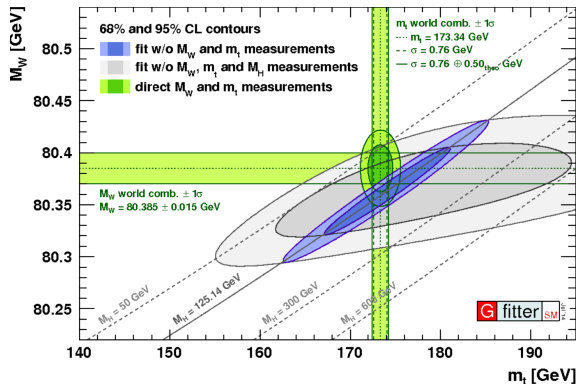


Abbildung: Fit der schwachen Wechselwirkung [7]

- W- und Z-Masse bestimmen zusammen den schwachen Mischungswinkel
- durch genaue Kenntnis der W- und t-Masse lässt sich die Masse des Higgs-Bosons eingrenzen

## Theoretische Grundlagen

- Im Gegensatz zum Z-Nachweis im Zerfall  $Z \rightarrow \ell^+ \ell^-$  über die invariante Masse des Leptonpaares kann man hier die Vierervektoren der Zerfallsprodukte nicht vollständig bestimmen
- longitudinaler Impuls  $p_z$  des Schwerpunktsystems der Kollision ist, weil das System geboostet ist, nicht bekannt
  - Lösung: Verwendung transversaler Größen



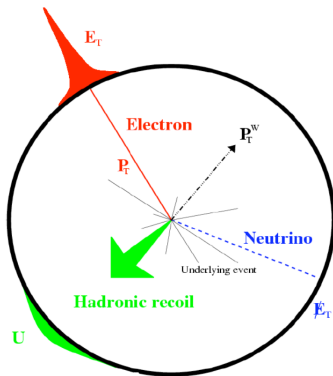


Abbildung: Impulsverteilung beim semileptonischen W-Zerfall [12]

- im Zerfall  $W \rightarrow \ell \nu$  insbesondere die Transversalimpulse des Leptons  $\vec{p}_T^\ell$  und des Neutrinos  $\vec{p}_T^\nu$  von besonderem Interesse
- Der Transversalimpuls des Neutrinos kann nur indirekt über "fehlende transversale Energie"  $\cancel{E}_T$  bestimmt werden
- Wenn man annimmt, dass das Neutrino das einzige Teilchen ist, das undetektiert dem Detektor entkommt, kann man über die Erhaltung des Transversalimpulses  $\sum \vec{p}_T$  die transversale Flugrichtung und Energie des Neutrinos bestimmen.

- eine weitere Observable ist die "transversale Masse"  $m_T$

$$m_T = 2p_T^\ell p_T^\nu (1 - \cos(\varphi^\ell - \varphi^\nu))$$

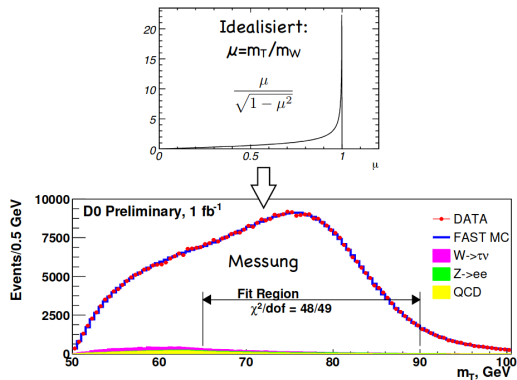
$p_T^\nu = \cancel{E}_T$ ,  $\varphi^\ell - \varphi^\nu \hat{=}$  Öffnungswinkel zwischen den Transversalimpulsen des Leptons und des Neutrinos

- Im Ruhesystem des W-Bosons und unter Annahme einer verschwindenden Zerfallsbreite  $\Gamma_W$  ist  $p_T = \frac{m_W}{2} \sin(\theta)$ , und somit

$$m_T = m_W \sin(\theta)$$

- Der differentieller Wirkungsquerschnitt als Funktion von  $m_T$  wird durch eine Variablentransformation  $\mu = \frac{m_T}{m_W} = \sin(\theta)$  im Wirkungsquerschnitt gewonnen

$$\frac{d\sigma}{d\mu} = \frac{d\sigma}{d\cos\theta} \left| \frac{d\cos(\theta)}{d\mu} \right|$$



- Man erhält für die Jacobi-Determinante dieser Variablentransformation

$$\frac{d \cos(\theta)}{d\mu} = \frac{d}{d\mu} \sqrt{1 - \mu^2} = -\frac{\mu}{\sqrt{1 - \mu^2}}$$

- Der differentielle Wirkungsquerschnitt als Funktion von  $m_T$  besitzt damit einen scharfen Knick bei  $m_T = m_W$ , den man als "Jacobi-Kante" bezeichnet

Abbildung: Darstellung der Jacobi-Kante in idealisierter Form und im Experiment [10].

- Eine Jacobi-Kante tritt analog auch im differentiellen Wirkungsquerschnitt  $\frac{d\sigma}{dp_T}$  bei einem Transversalimpuls von  $p_T = \frac{m_W}{2}$  auf
- Im Experiment ist Jacobi-Kante verschmiert
  - W-Boson wird i.A. nicht in Ruhe erzeugt
  - W-Boson besitzt endliche Zerfallsbreite
  - Detektorauflösung
  - Unsicherheiten in der Rekonstruktion

## Inhaltsverzeichnis

### Einleitung

- Was sind W-Bosonen?
- Entdeckung des W-Bosons
- Motivation
- Theoretische Grundlagen

### Tevatron

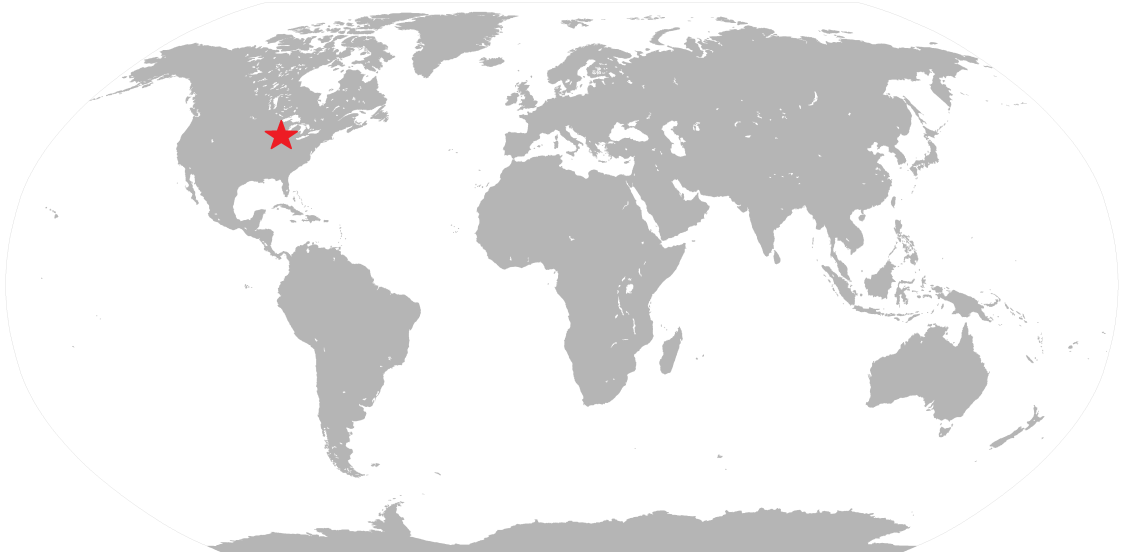
- Allgemeines
- Beschleuniger-Kette
- Detektoren

### Messstrategie und Unsicherheiten am Beispiel von CDF Run II Daten

- Modellierung von Produktion und Zerfall des W-Bosons
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

### Zusammenfassung

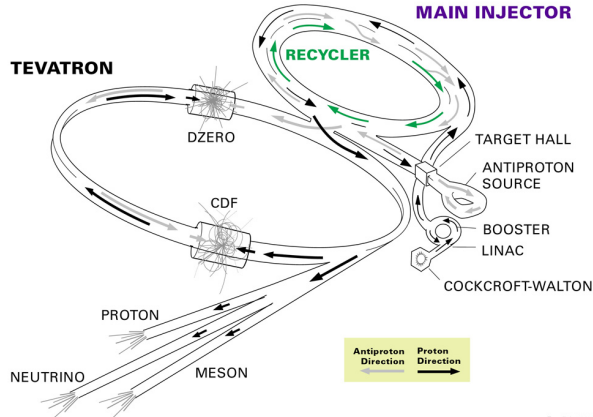
## Tevatron



- Betrieb durch das Fermilab (Batavia, Illinois)
- Proton-Antiproton-Beschleuniger
- der stärkste Beschleuniger nach dem LHC am CERN
- Schwerpunktsenergie: 1,96 TeV
- Umfang: 6 km
- Run I:
  - **31.08.1992 - 20.02.1996**
  - integrierte Luminosität:  $180 \text{ pb}^{-1}$
- Run II:
  - **01.03.2001 - 29.09.2011**
  - integrierte Luminosität:  $10 \text{ fb}^{-1}$  pro Detektor
- stillgelegt seit **29.09.2011**

## Beschleuniger-Kette

### FERMILAB'S ACCELERATOR CHAIN



Fermilab 00-635

Abbildung: Beschleuniger-Kette am Fermilab [1].

Tevatron: Beschleuniger-Kette



CDF

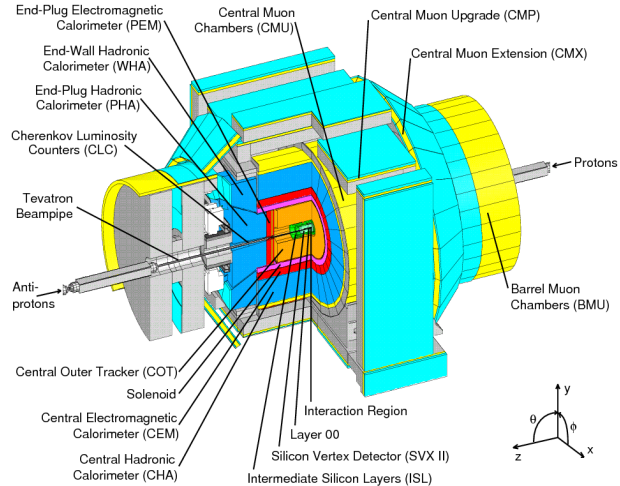


Abbildung: Schematischer Aufbau des CDF-Detektors [3]

D0

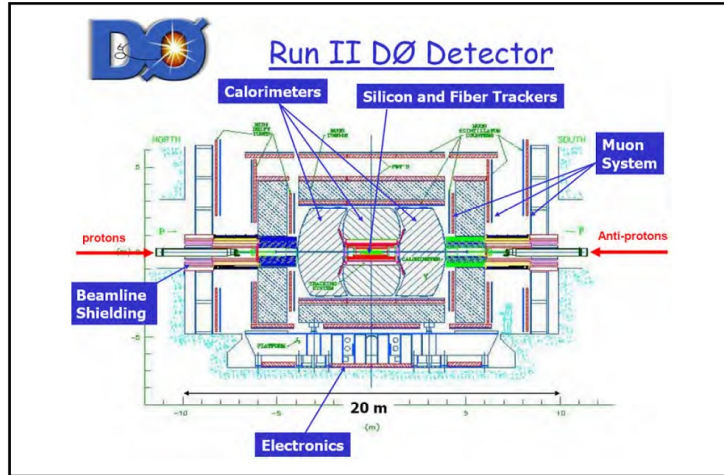


Abbildung: Schematischer Aufbau des D0-Detektors [5]

## Inhaltsverzeichnis

### Einleitung

- Was sind W-Bosonen?
- Entdeckung des W-Bosons
- Motivation
- Theoretische Grundlagen

### Tevatron

- Allgemeines
- Beschleuniger-Kette
- Detektoren

### Messstrategie und Unsicherheiten am Beispiel von CDF Run II Daten

- Modellierung von Produktion und Zerfall des W-Bosons
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

### Zusammenfassung

## Modellierung von Produktion und Zerfall des W-Bosons

- wichtige Größen:
  - Teilimpulse der Valenzquarks
  - Transversalimpuls des W-Bosons  $p_T$
- Die Teilimpulse werden mithilfe von globalen Fits auf Hoch-Energie-Daten constrained und als Parton-Verteilungsfunktionen (PDF) dargestellt
- Die PDFs werden von unabhängigen Kollaborationen parametrisiert
- Die Unsicherheit bei Nutzung einer Parametrisierung der CTEQ (The Coordinated Theoretical-Experimental Project on QCD) liegt bei  $\delta m_W(PDF) = 15 \text{ MeV}$

- Die Verteilung von  $p_T$  wird durch einen Event Generator (resbos 8) simuliert
- Die benötigten Parameter werden überwiegend durch die  $p_T$ -Messung des Z-Bosons aus Run I constrained
- Die Unsicherheit der resbos-Parameter beträgt damit  $\delta m_W(p_T^W) = 13 \text{ MeV}$

- Im W-Zerfall hat das Abstrahlen eines Photons durch ein Lepton im Endzustand den größten Effekt auf die W-Massenmessung
  - Durch das Abstrahlen verringert sich der Impuls des Leptons wodurch eine geringere W-Masse rekonstruiert wird
  - Dies wird mithilfe von Simulationen korrigiert
  - Nicht simuliert werden Photonemissionen im Anfangszustand, Interferenz und Terme höherer Ordnung
- $\delta m_W(\text{radiation}) = 20 \text{ (15) MeV}$  für den  $\mu^-$  ( $e^-$ ) Kanal

## Impulskalibration

- Der Impuls eines geladenen Teilchens wird durch seine Ablenkung im Tracker bestimmt
- Da  $p \sim \frac{1}{r}$ , wird der Impuls als eine Funktion des inversen Impulses des  $J/\psi$  skaliert
- Zur Verbesserung der Auflösung wird die Position des Strahls bei Myon-Spuren von W- und Z-Zerfällen beim Track-Fit mitberücksichtigt

- Dieser Constraint kann aber nicht auf  $J/\psi$ -Zerfälle angewendet werden, da diese auch außerhalb der Beamline auftreten können
  - Verwendung von  $Y$ -Zerfällen, um sicherzustellen, dass der Beam-Constraint keinen Bias verursacht
- Es ergibt sich eine Unsicherheit von 15 MeV aufgrund der unterschiedlichen Skalierungen
- Zusammen mit der Unsicherheit aufgrund der Tracker-Anordnung ergibt sich eine Unsicherheit von  $\delta m_W(p_T \text{ scale}) = 25 \text{ MeV}$

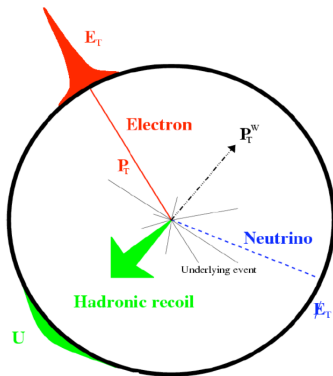


## Kalibration des em. Kalorimeters

- Das elektromagnetische Kalorimeter mithilfe der Elektronen-Tracks aus den W-Zerfällen kalibriert
- Die Kalorimeter-Energie wird so skaliert, dass  $\frac{E}{p} = 1$  gilt
- Um dies an eine energieabhängige Skala anzupassen, wird die  $\frac{E}{p}$ -Verteilung als Funktion der Elektron  $E_T$  gefittet und mit einem Korrekturfaktor versehen

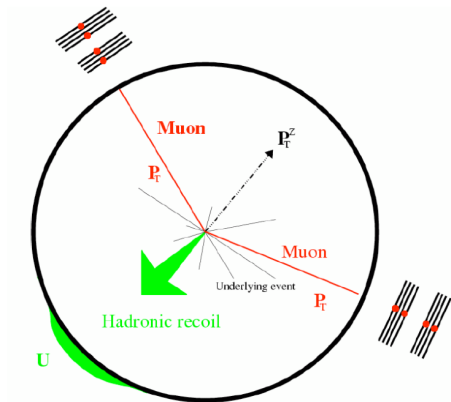
- Die Menge an passivem Material im Silizium-Detektor innerhalb des Trackers beeinflusst die Position des  $\frac{E}{p}$ -Peaks
  - Die Unsicherheit der Menge des Materials geht direkt in die Unsicherheit der Energieskala über
- Dies kann nicht gut modelliert werden
  - Unsicherheit aufgrund des Materials beträgt 55 MeV
- Dies macht den Großteil der totalen Unsicherheit von  $\delta m_W(E \text{ scale}) = 70 \text{ MeV}$  aus

## Bestimmung des hadronischen Recoils



- Energie des hadronischen Recoils wird durch Summation über die komplette im Kalorimeter deponierte Energie bestimmt, ausgenommen die Energie des Leptons
- Die Detektorantwort auf die Hadronenergie wird als  $R = \frac{u_{\text{meas}}}{u_{\text{true}}}$  definiert  
 $\rightarrow u_{\text{true}} \hat{=}$  Recoil-Energie des W-Bosons

Abbildung: Recoil beim semileptonischen W-Zerfall [12].



- Kalibriert wird  $R$  mithilfe des  $Z \rightarrow \ell\ell$ -Zerfalls, da die Leptonenergie genauer bestimmt werden kann
- Es ergibt sich eine Unsicherheit von  $\delta m_W(\text{recoil}) = 50 \text{ MeV}$

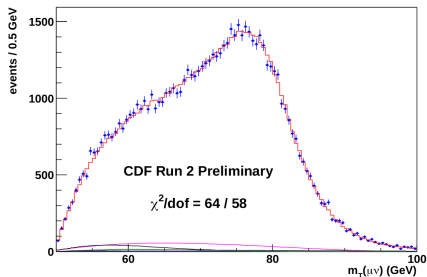
Abbildung: Recoil beim leptonischen Z-Zerfall [12].

## Untergrund-Abschätzung

- Häufiger Untergrund bei  $W \rightarrow e\nu$  und  $W \rightarrow \mu\nu$  Zerfällen
  - $Z \rightarrow \ell\ell$ , wobei ein  $\ell$  nicht rekonstruiert wird
  - $W \rightarrow \tau\nu \rightarrow \ell\nu\nu$
  - Dijet-Produktion, wobei ein hadronischer Jet als  $\ell$  rekonstruiert wird
- Im  $\mu$ -Sample kommt noch Untergrund aus der kosmischen Strahlung hinzu

- Die W- und Z-Untergründe werden mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen abgeschätzt
- Die Abschätzung des Dijet-Untergrundes erhöht den hadronischen Untergrund, um eine  $\cancel{E}_T$ -Verteilung für den Untergrund zu gewinnen
  - Die  $\cancel{E}_T$ -Verteilung wird mit den W- und Dijet-Verteilungen als Input gefittet
- Der Untergrund aufgrund von kosmischer Strahlung wird mithilfe der Track-Hit Zeiten abgeschätzt
- Insgesamt ergibt sich eine Unsicherheit von  $\delta m_W(\text{background}) = 20 \text{ MeV}$

## Massenfit



- $m_T$ -Verteilung wird für den  $e$ - und  $\mu$ -Kanal gefittet
- Die Daten sind dabei geblindet und es wird eine Kreuzvalidierung mit unabhängigen Datensätzen und Simulationen durchgeführt

Abbildung: Gefittete Masseverteilung des W-Bosons [9].

## Unsicherheiten

Sytematic Uncertainty	Electrons (Run 1B <sup>9</sup> )	Muons (Run 1B <sup>9</sup> )
Production and Decay Model	30 (30)	30 (30)
Lepton $E$ Scale and Resolution	70 (80)	30 (87)
Recoil Scale and Resolution	50 (37)	50 (35)
Backgrounds	20 (5)	20 (25)
Statistics	45 (65)	50 (100)
Total	105 (110)	85 (140)

**Abbildung:** Unsicherheiten der W-Massenmessung in  $\frac{\text{MeV}}{c^2}$  bei der Nutzung von  $0,2 \text{ fb}^{-1}$  von CDF Run 2 Daten. In Klammern sind die Unsicherheiten aus CDF Run 1B [9].

- Die Kombination beider Kanäle ergibt eine Unsicherheit von  $\delta m_W = 76 \text{ MeV}$



## Inhaltsverzeichnis

### Einleitung

- Was sind W-Bosonen?
- Entdeckung des W-Bosons
- Motivation
- Theoretische Grundlagen

### Tevatron

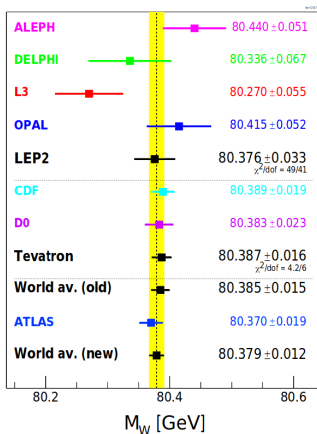
- Allgemeines
- Beschleuniger-Kette
- Detektoren

### Messstrategie und Unsicherheiten am Beispiel von CDF Run II Daten

- Modellierung von Produktion und Zerfall des W-Bosons
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

### Zusammenfassung

## Zusammenfassung



- World average:  $m_W = (80,379 \pm 0,012) \text{ GeV}$
- Das Besondere an dieser Messung ist die hohe Präzision
- Analyse dauert deswegen sehr lange (ATLAS: 2011 bis 2018)

Abbildung: Darstellung und Vergleich aller W-Massenmessungen [4]



## Literatur I



URL: [https://mu2e.fnal.gov/images\\_v2/00-0635D.jpg](https://mu2e.fnal.gov/images_v2/00-0635D.jpg) (besucht am 19.05.2019).



M. Aaboud u. a. „Measurement of the W-boson mass in pp collisions at  $\sqrt{s}=7$  TeV with the ATLAS detector“. In: *European Physical Journal C* 78.2, 110 (Feb. 2018), S. 110. DOI: [10.1140/epjc/s10052-017-5475-4](https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-5475-4). arXiv: [1701.07240](https://arxiv.org/abs/1701.07240) [hep-ex].



CDF Collaboration. Operational Experience, Improvements, and Performance of the CDF Run II Silicon Vertex Detector. URL: <http://inspirehep.net/record/1211048> (besucht am 05.06.2019).



M. Tanabashiet al.(Particle Data Group). W MASS. URL: <http://pdg.lbl.gov/2018/listings/rpp2018-list-w-boson.pdf> (besucht am 10.06.2019).



High Energy Physics Division. URL: <http://hepd.pnpi.spb.ru/hepd/images/d0.jpg> (besucht am 05.06.2019).



Fermilab. Tevatron. URL: <https://www.fnal.gov/pub/tevatron/index.html> (besucht am 10.06.2019).



GFitte. Results for the Global Electroweak Standard Model Fit. URL: [http://gfitter.desy.de/Figures/Standard\\_Model/2014\\_07\\_16\\_Scan2D\\_MWvsmt\\_logo\\_large.gif](http://gfitter.desy.de/Figures/Standard_Model/2014_07_16_Scan2D_MWvsmt_logo_large.gif) (besucht am 09.06.2019).

## Literatur II



Dr. Gebhard Greiter. Das Standardmodell der Elementarteilchen. URL: <http://greiterweb.de/spw/Standardmodell-Elementarteilchen.htm> (besucht am 03.06.2019).



Christopher Paul Hays. „W boson mass measurement at the Tevatron“. In: Proceedings, 40th Rencontres de Moriond on QCD and High Energy Hadronic Interactions: La Thuile, Aosta Valley, Italy, March 12-19, 2005. 2005, S. 263–266. arXiv: hep-ex/0505064 [hep-ex]. URL: [http://lss.fnal.gov/cgi-bin/find\\_paper.pl?conf-05-210-E](http://lss.fnal.gov/cgi-bin/find_paper.pl?conf-05-210-E).



Dr. Ulrich Husemann. Experimentelle Elementarteilchenphysik (P23.1.1). URL: [https://www-zeuthen.desy.de/~husemann/teaching/2009\\_ss/exp\\_teilchenphysik/skript/exp\\_teilchenphysik\\_folien.pdf](https://www-zeuthen.desy.de/~husemann/teaching/2009_ss/exp_teilchenphysik/skript/exp_teilchenphysik_folien.pdf) (besucht am 04.06.2019).



Dr. Ulrich Husemann. Physik der W-Bosonen. URL: [https://www-zeuthen.desy.de/~husemann/teaching/2009\\_ss/exp\\_teilchenphysik/skript/skript\\_04.pdf](https://www-zeuthen.desy.de/~husemann/teaching/2009_ss/exp_teilchenphysik/skript/skript_04.pdf) (besucht am 04.06.2019).



Ashutosh Kotwal. Measurement of the W Boson Mass at CDF. URL: <http://wwwteor.mi.infn.it/~vicini/ashutoshBNL.pdf> (besucht am 10.06.2019).



Particle Zoo. W Boson. URL: <https://www.particlezoo.net/products/w-boson> (besucht am 10.06.2019).