

W-Massenmessung

Julia Sobolewski

11. Juni 2019

Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis I

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

- Event Generation
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

Zusammenfassung

Inhaltsverzeichnis II

Fragen

Literatur

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

- Event Generation
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

Zusammenfassung

Fragen

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 →	u up	c charm	t top	Y Photon
				125,09 GeV H Higgs Boson
Quarks	4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g Gluon
	<2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z^0 Z Boson
	0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV ± 1 1 W^\pm W Boson
Leptonen				Eichbosonen

- Eichboson → Elementarteilchen
- 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

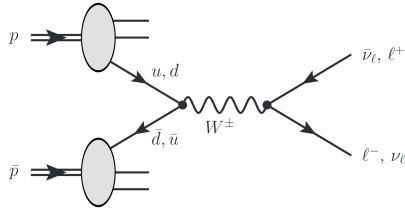


Abbildung: Feynman-Diagramm niedrigster Ordnung zur Erzeugung von W-Bosonen [11]

- 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

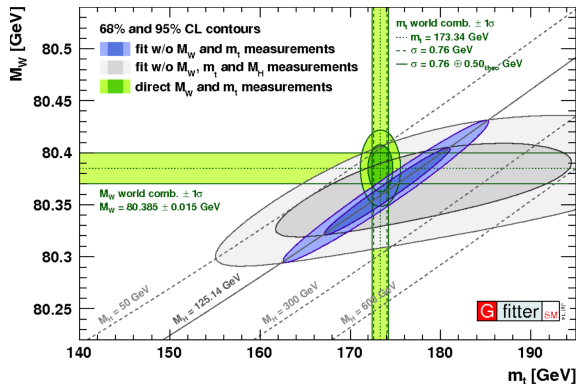


Abbildung: Fit der schwachen Wechselwirkung [7]

- 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

- im Zerfall $W \rightarrow \ell \nu$ insbesondere die Transversalimpulse des Leptons p_T^ℓ und des Neutrinos p_T^ν 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

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

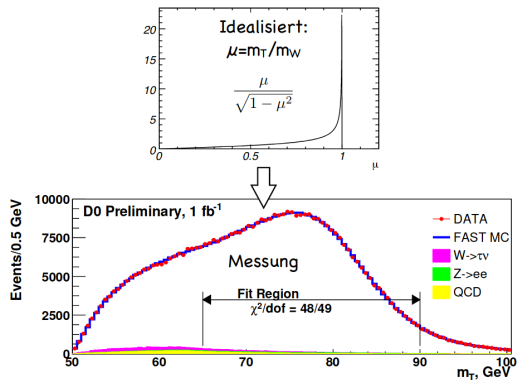
$p_T^\nu = \cancel{E}_T$, $\varphi^\ell - \varphi^\nu \hat{=}$ Öffnungswinkel zwischen den Transversalimpulsen des Leptons und des Neutrinos

- Im Ruhesystem des W-Bosons und unter Annahme einer verschwindenden Zerfallsbreite Γ_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

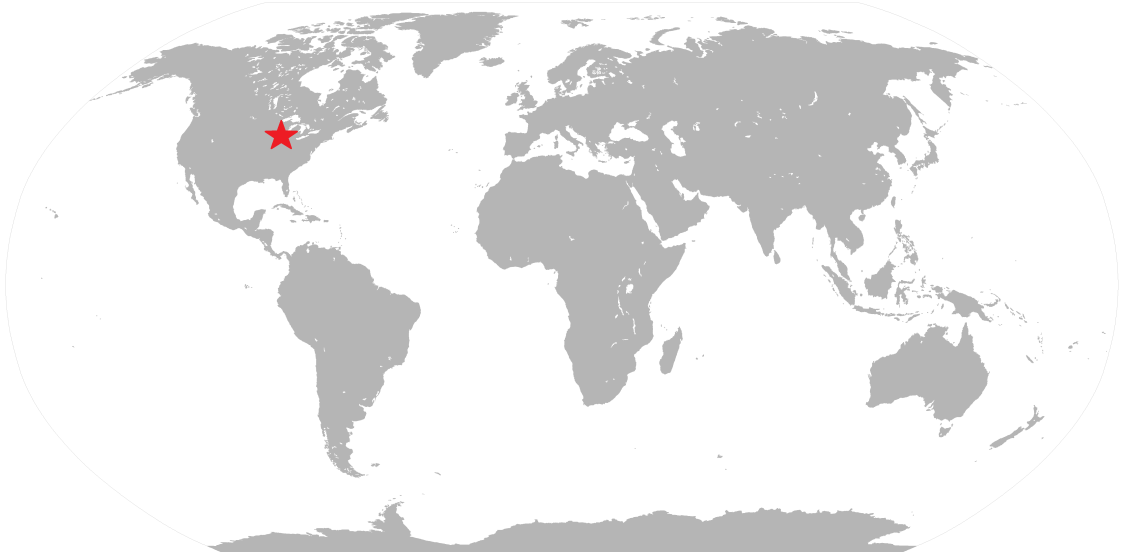
Messstrategie und Unsicherheiten am Beispiel von CDF Run II Daten

- Event Generation
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

Zusammenfassung

Fragen

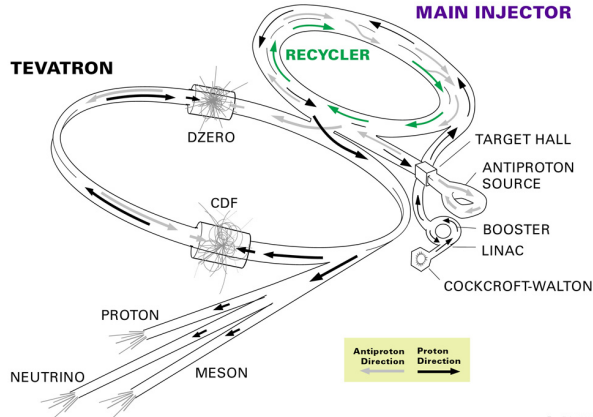
Tevatron



- 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 pb⁻¹
- Run II:
 - **01.03.2001 - 29.09.2011**
 - integrierte Luminosität: 10 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

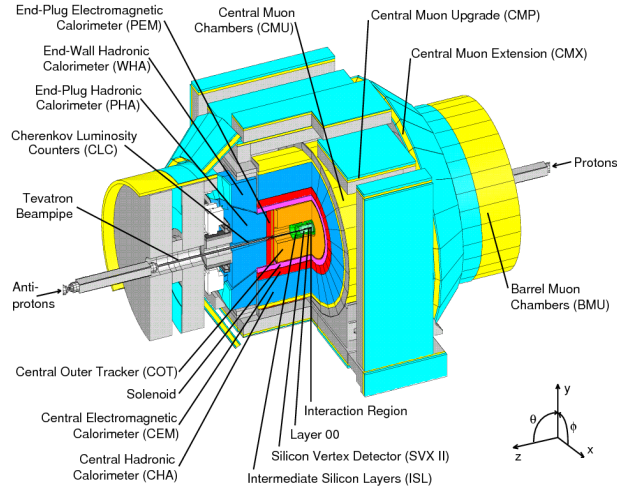


Abbildung: Schematischer Aufbau des CDF-Detektors [3]

D0

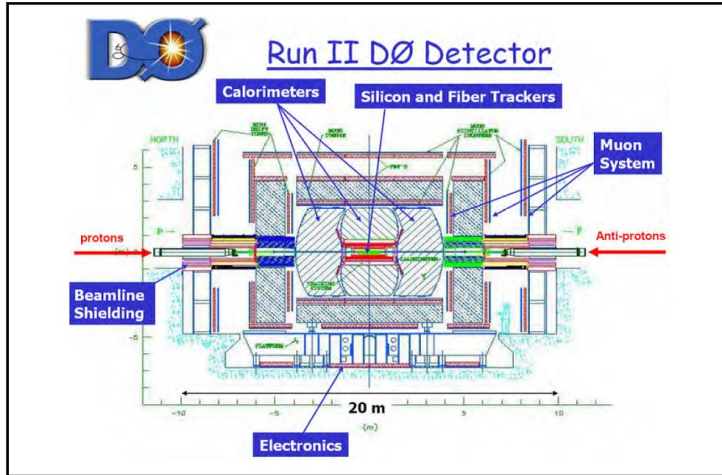


Abbildung: Schematischer Aufbau des D0-Detektors [5]

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

- Event Generation
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

Zusammenfassung

Fragen

Event Generation

- 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
- 20 (15) MeV für den μ^- (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/ψ skaliert
- Zur Verbesserung der Auflösung wird die Position des Strahls bei Myon-Spuren von W- und Z-Zerfällen beim Track-Fit mitberücksichtigt

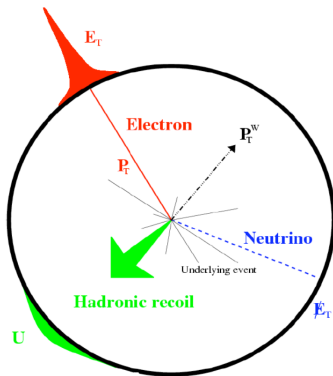
- Dieser Constraint kann aber nicht auf J/ψ -Zerfälle angewendet werden, da diese auch außerhalb der Beamline auftreten können
 - Verwendung von Y -Zerfällen, um sicherzustellen, dass der Beam-Constraint keinen Bias verursacht
- Es ergibt sich eine Unsicherheit von 15 MeV aufgrund der unterschiedlichen 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

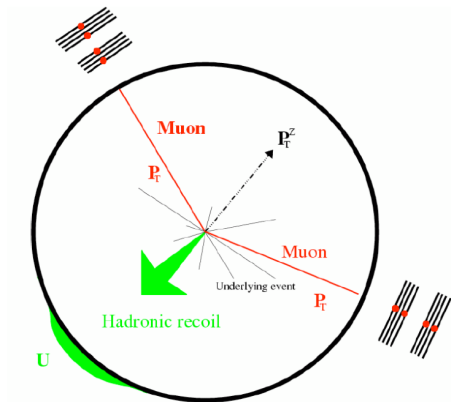
- Die Menge an passivem Material im Silizium-Detektor innerhalb des Trackers beeinflusst die Position des $\frac{E}{p}$ -Peaks
 - Die Unsicherheit der Menge des Materials geht direkt in die Unsicherheit der Energieskala über
- Dies kann nicht gut modelliert werden
 - Unsicherheit aufgrund des Materials 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 $\delta m_W(\text{recoil}) = 50 \text{ MeV}$

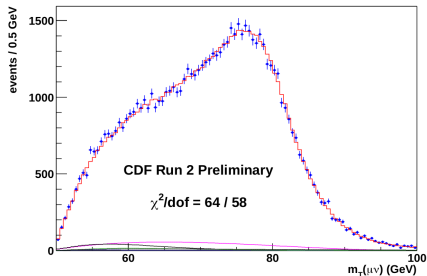
Abbildung: Recoil beim leptonischen Z-Zerfall [12].

Untergrund-Abschätzung

- Häufiger Untergrund bei $W \rightarrow e\nu$ und $W \rightarrow \mu\nu$ Zerfällen
 - $Z \rightarrow \ell\ell$, wobei ein ℓ nicht rekonstruiert wird
 - $W \rightarrow \tau\nu \rightarrow \ell\nu\nu$
 - Dijet-Produktion, wobei ein hadronischer Jet als ℓ rekonstruiert wird
- Im μ -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 E_T -Verteilung für den Untergrund zu gewinnen
 - Die 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 μ -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 ⁹)	Muons (Run 1B ⁹)
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

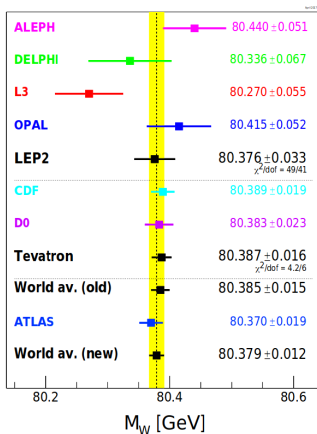
Messstrategie und Unsicherheiten am Beispiel von CDF Run II Daten

- Event Generation
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

Zusammenfassung

Fragen

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]

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

- Event Generation
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

Zusammenfassung

Fragen



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

- Event Generation
- Impulskalibration
- Kalibration des em. Kalorimeters
- Bestimmung des hadronischen Recoils
- Untergrund-Abschätzung
- Massenfit
- Unsicherheiten

Zusammenfassung

Fragen

Literatur I



URL: 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).



GFitteer. Results for the Global Electroweak Standard Model Fit. URL: 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.



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 (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 (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).