

W-Massenmessung

Julia Sobolewski

10. Juni 2019

Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis I

Einleitung

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

Tevatron

- Allgemeines
- Beschleuniger-Kette
- Detektoren
 - CDF
 - D0

Messstrategie und Unsicherheiten am Beispiel von CDF Run II Daten

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

Inhaltsverzeichnis II

Unsicherheiten

Zusammenfassung

Fragen

Literatur

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

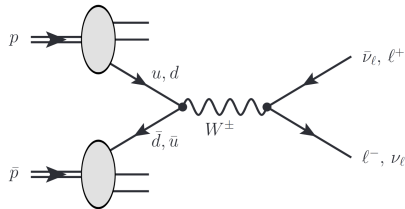


Abbildung: Feynman-Diagramm niedrigster Ordnung zur Erzeugung von W-Bosonen [11]

- 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

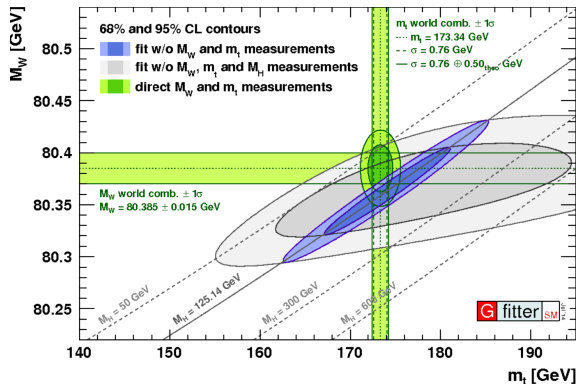


Abbildung: Fit der schwachen Wechselwirkung [7]

- 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

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

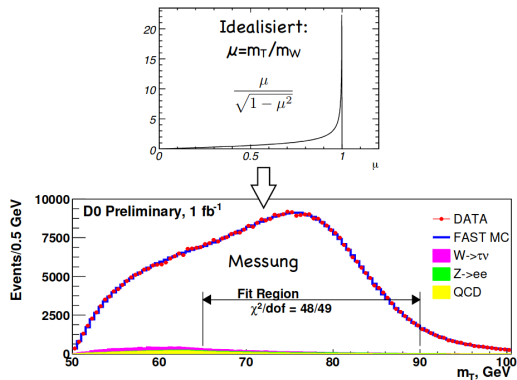
$p_T^\nu = \cancel{E}_T$, $\varphi^\ell - \varphi^\nu \hat{=}$ Öffnungswinkel zwischen den Transversalimpulsen des Leptons und des Neutrinos

- 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 differenzielle 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].

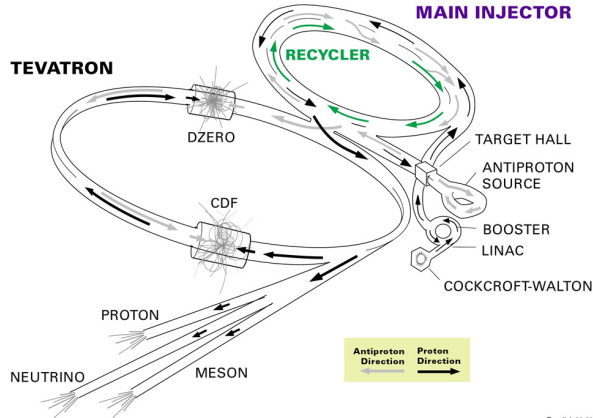
- Eine Jacobi-Kante tritt analog auch im differentiellen Wirkungsquerschnitt $\frac{d\sigma}{dp_T}$ bei einem Transversalimpuls von $p_T = \frac{m_W}{2}$ auf
- Im Experiment ist Jacobi-Kante verschmiert
 - W-Boson wird i.A. nicht in Ruhe erzeugt
 - W-Boson besitzt endliche Zerfallsbreite
 - Detektorauflösung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

Allgemeines

- 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

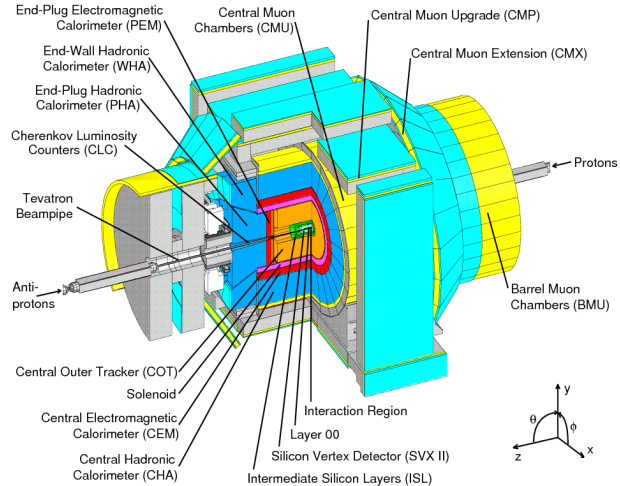


Abbildung: Schematischer Aufbau des CDF-Detektors [3]

D0

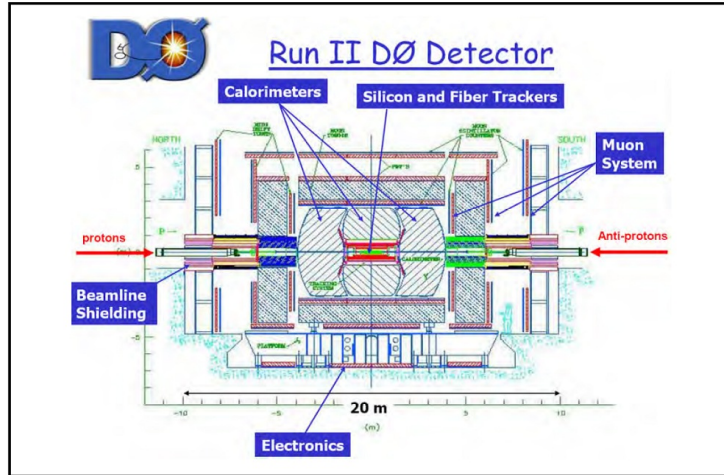


Abbildung: Schematischer Aufbau des D0-Detektors [5]

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
- Daraus folgt eine Unsicherheit von 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
- Um die Auflösung zu verbessern wird die Position des Strahls bei Myon-Spuren von W- und Z-Zerfällen beim Track-Fit mitberücksichtigt

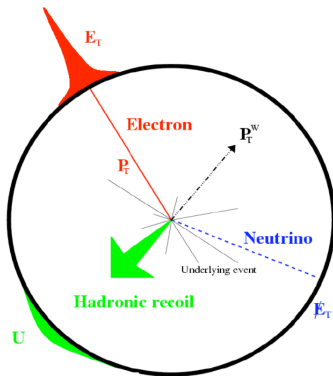
- Dieser Constraint kann aber nicht auf J/ψ -Zerfälle angewendet werden, da diese auch außerhalb der Beamline auftreten können
- Verwendung von Y -Zerfällen, um sicherzustellen, dass der Beam-Constraint keinen Bias verursacht
- Es ergibt sich eine Unsicherheit von 15 MeV aufgrund der unterschiedlichen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

- Nach der Impuls-Kalibration wird 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

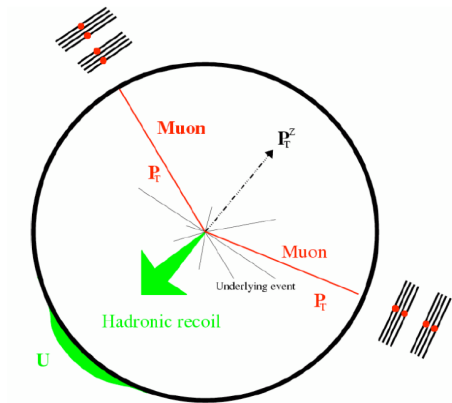
- Die Menge an passivem Material im Silizium-Detektor innerhalb des Trackers beeinflusst die Position des $\frac{E}{p}$ -Peaks
→ Die Unsicherheit der Menge des Materials geht direkt in die Unsicherheit der Energieskala über
- Da dies nicht so gut modelliert werden kann beträgt die Unsicherheit aufgrund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

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 $\delta m_W(\text{recoil}) = 50 \text{ MeV}$

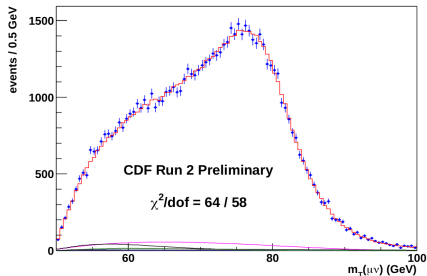
Abbildung: Recoil beim leptonenischen Z-Zerfall [12].

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 nutzt Events mit signifikanter Energie um ℓ herum, um den hadronischen Untergrund zu erhöhen und 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 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].

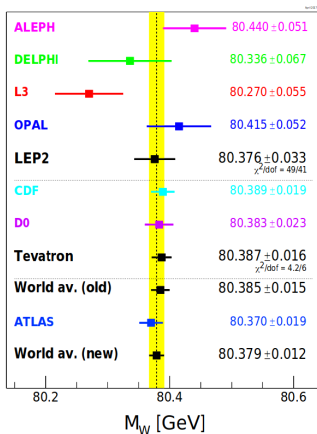
Unsicherheiten

| 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 $\delta m_W = 76 \text{ MeV}$

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 (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.



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).



GFitter. 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).



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

Literatur II



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).