

W-Massenmessung

Julia Sobolewski

9. 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
- Track Momentum Calibration
- Calorimeter Energy Calibration
- Hadronic Recoil Measurement and Simulation
- Backgrounds
- Mass Fit and Systematics

Inhaltsverzeichnis II

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	γ 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 Z⁰ 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[±] 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 [5]

Entdeckung des W-Bosons

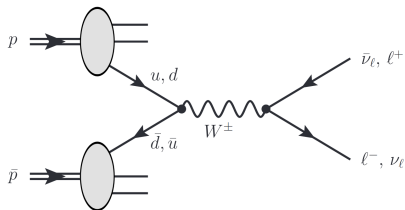


Abbildung: Feynman-Diagramm niedrigster Ordnung zur Erzeugung von W-Bosonen [7]

- 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

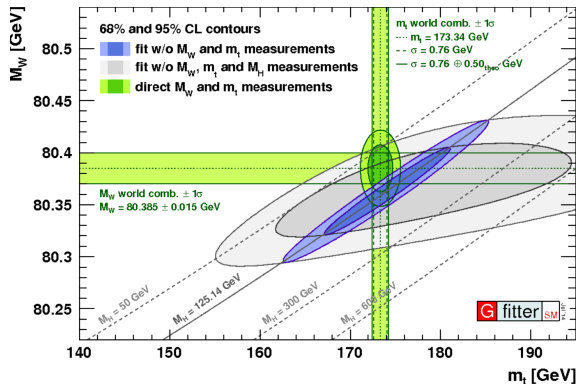


Abbildung: Fit der schwachen Wechselwirkung [4]

- 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 \vec{p}_T^ℓ und des Neutrinos \vec{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

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

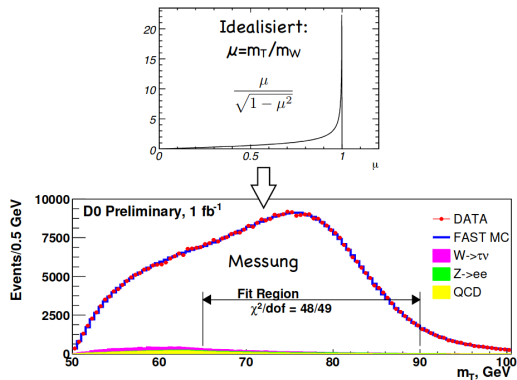


Abbildung: Darstellung der Jacobi-Kante in idealisierter Form und im Experiment [6].

- Man erhält für die Jacobi-Determinante dieser Variablentransformation

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

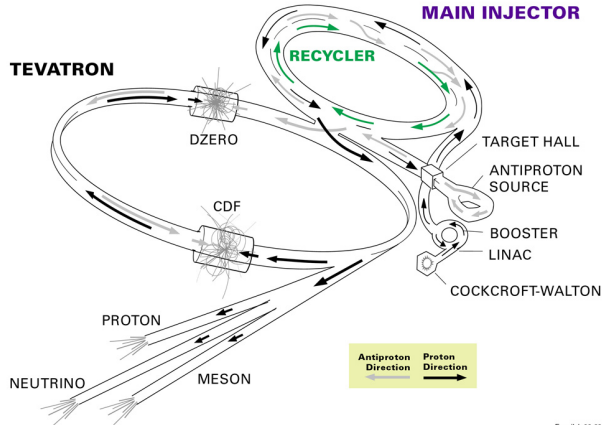
- Der differentielle Wirkungsquerschnitt als Funktion von m_T besitzt damit einen scharfen Knick bei $m_T = m_W$, den man als "Jacobi-Kante" bezeichnet

- 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

FERMILAB'S ACCELERATOR CHAIN



Fermilab 00-635

Abbildung: Beschleuniger-Kette am Fermilab [1].

CDF

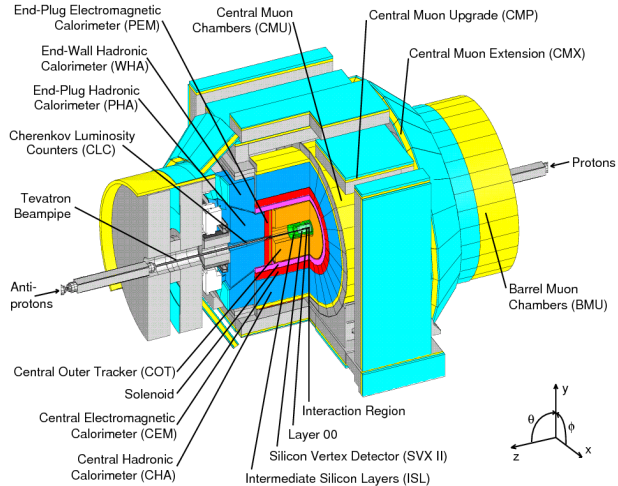


Abbildung: Schematischer Aufbau des CDF-Detektors [2]

D0

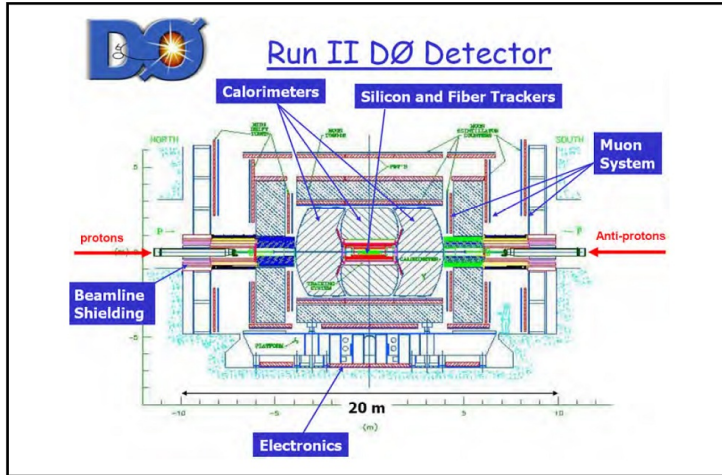


Abbildung: Schematischer Aufbau des D0-Detektors [3]

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

Track Momentum Calibration

- 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

A charged particle's momentum is measured through its observed curvature in the tracker. Since the momentum is inversely proportional to curvature, the momentum scale is measured as a function of the mean inverse momentum of J/ψ muons and fit to a line. The line has zero slope, verifying the applicability of the extracted scale to W boson decays. To improve momentum resolution, muon tracks from W and Z decays use the beam position as a point in the track fit. This constraint cannot be applied to J/ψ decays since they can be separated from the beam line. Instead, Y decays are used to verify that the beam constraint produces no bias on the momentum calibration. A systematic uncertainty of 15 MeV accounts for the observed difference in scale. Including the uncertainty due to tracker alignment, CDF estimates an uncertainty of δm_W (p T scale) = 25 MeV.

Calorimeter Energy Calibration

- Das elektromagnetische Kalorimeter wird mithilfe der Elektronen-Tracks aus den W-Zerfällen kalibriert
-

Given the momentum calibration, electron tracks from W decays are used to calibrate the electromagnetic calorimeter. The calorimeter energy is scaled such that the ratio of energy to track momentum (E/p) is equal to 1. To correct for an energy-dependent scale, the E/p distribution is fit as a function of electron E_T and a correction applied. The significant amount of material in the silicon detector inside the tracker affects the position of the E/p peak. An uncertainty on the amount of material translates into an uncertainty on the measured E scale. The fraction of events in the region $1.19 < E/p < 1.85$ is a measure of the material. The extent to which this region is not well modelled results in a 55 MeV uncertainty on the W mass. This uncertainty dominates the total δm_W (E scale) of 70 MeV.

Hadronic Recoil Measurement and Simulation

The hadronic recoil energy is measured by vectorially summing all the energy in the calorimeter, excluding that contributed by the l . The detector response to the hadronic energy is defined as $R = u_{\text{meas}} / u_{\text{true}}$, where u_{true} is the recoil energy of the W boson. The response is measured using $Z \rightarrow ll$, since the l is measured more precisely than the hadronic energy. The hadronic energy resolution is modelled as having a component from the underlying event (independent of recoil) and a component from the recoiling hadrons. The model parameters are tuned using the resolution of $Z \rightarrow ll$ along the axis bisecting the leptons. This axis is the least susceptible to fluctuations in l energy. The recoil response and resolution uncertainty on the W mass is 50 MeV, of which 37 MeV is due to the model of the underlying energy resolution.

Backgrounds

- 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 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 $\delta m_W(\text{background}) = 20 \text{ MeV}$

Mass Fit and Systematics

Given the energy calibrations, recoil model, and background estimation, the m_T distribution is fit for the e and μ channels. The predicted line shape agrees with that of the data (Fig. 1). The central value is blinded while CDF cross-checks the analysis with independent data sets and simulation. Combining the two channels (Table 1) results in $\delta m_W = 76$ MeV.

Zusammenfassung

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.

Literatur I



URL: https://mu2e.fnal.gov/images_v2/00-0635D.jpg (besucht am 19.05.2019).



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).



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



GFitler. Results for the Global Electroweak Standard Model Fit. URL: http://gfitler.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).



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).

Literatur II



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).