

DIE W-/Z-BOSON ENTDECKUNG

JEAN-MARCO ALAMEDDINE

TU DORTMUND
FAKULTÄT PHYSIK

07 12 2018

DIE THEORIE DER SCHWACHEN WECHSELWIRKUNG

FERMIS THEORIE DES β -ZERFALLS

- 1933 beschreibt Fermi den β -Zerfall über die Fermi-Wechselwirkung
- Theorie beschreibt eine Vier-Fermionen-Wechselwirkung ohne Austauschteilchen
 - Wechselwirkung als Produkt zweier Ströme
 - Kopplungsstärke beschrieben durch Fermikonstante G_F

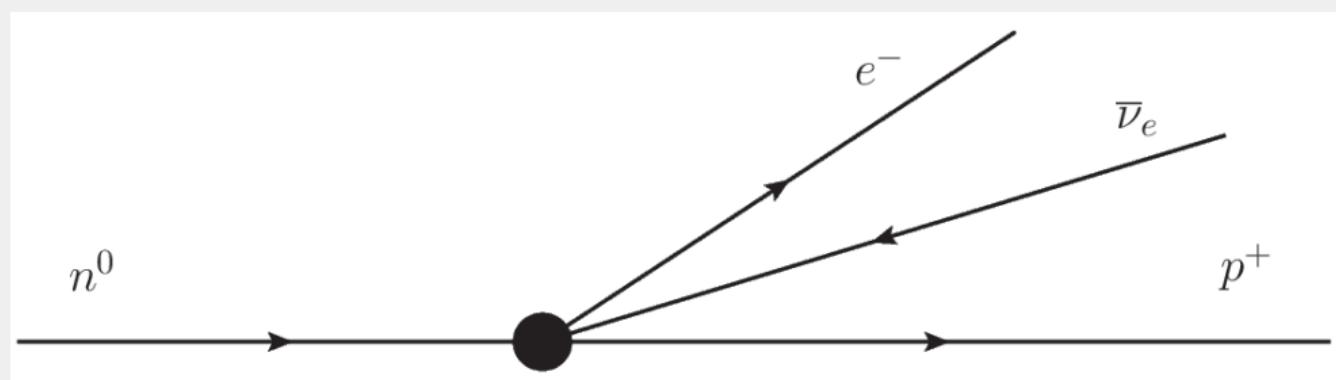
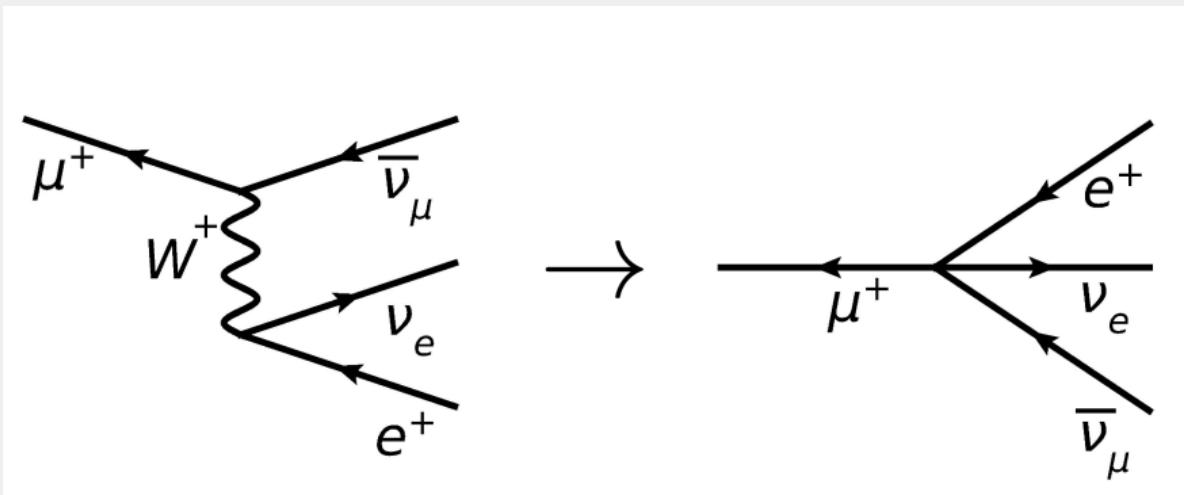


Abbildung: Beschreibung des β -Zerfalls nach Fermi [1]

DIE FERMI-WECHSELWIRKUNG ALS EFFEKTIVE THEORIE



$$\frac{-i \left(g_{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{M^2} \right)}{q^2 - M^2}$$

$$\underbrace{\rightarrow}_{q^2 \ll M^2}$$

$$\frac{ig_{\mu\nu}}{M^2}$$

[2] (bearbeitet), [3]

DIE FERMI-WECHSELWIRKUNG ALS EFFEKTIVE THEORIE

- Fermi-Wechselwirkung stellt für kleine Energien (bis heute) eine sehr gute Näherung dar (da schwache Wechselwirkung mit geringer Reichweite)
 - Verallgemeinerung: Anwendung der Theorie auf viele weitere Reaktionen (z.B. μ -Zerfall) liefert hervorragende Ergebnisse
- Erweiterung der Theorie, um neue Phänomene wie die Paritätsverletzung beschreiben zu können (V-A-Struktur)

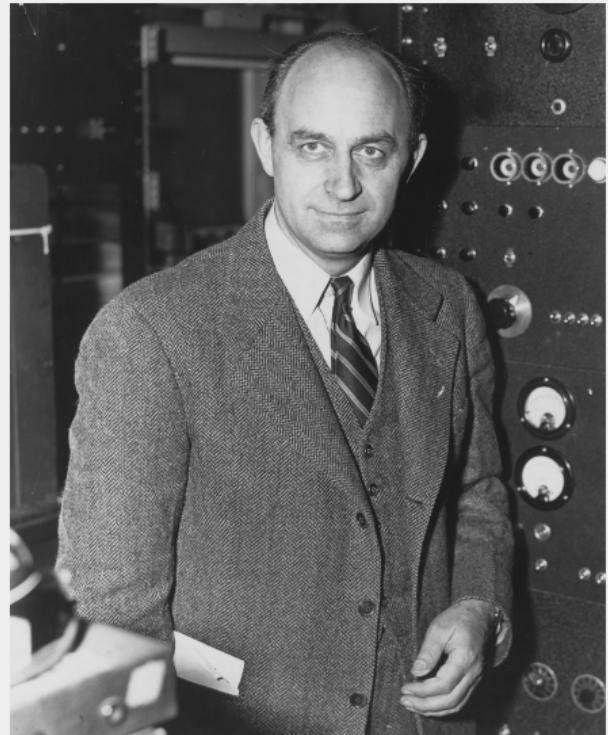


Abbildung: Enrico Fermi [4]

DIE FERMI-WECHSELWIRKUNG ALS EFFEKTIVE THEORIE

- Theorie der Fermi-Wechselwirkung nicht renormierbar
 - Divergenzen bei höheren Energien bzw. höheren Ordnungen in G_F
- Ab $E \approx 300 \text{ GeV}$: Verletzung des "Unitarity limit"
 - $\sigma \propto G_F^2 E^2$
 - Bedingung an totalen Wirkungsquerschnitt, welche aus der Unitarität stammt, wird verletzt (unphysikalisch) [5]
- Mit höheren Beschleunigerenergien können Abweichungen von der Theorie gemessen werden

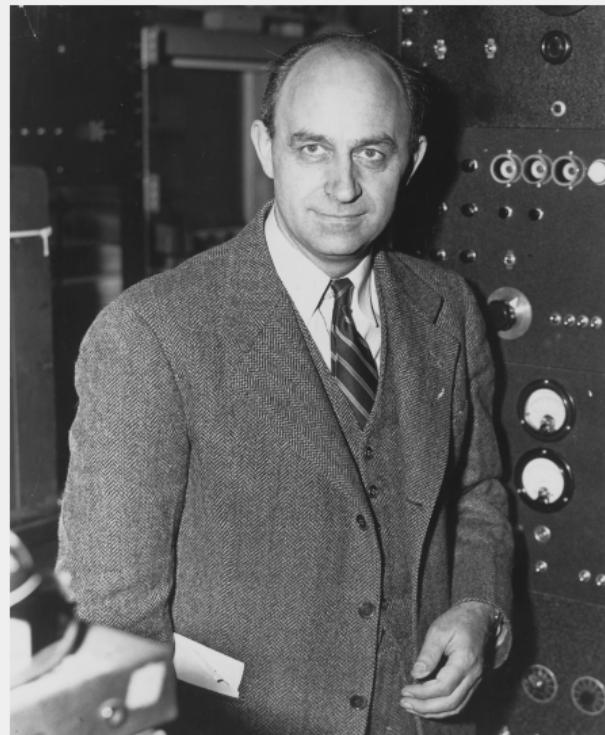


Abbildung: Enrico Fermi [4]

DIE ELEKTROSCHWACHE WECHSELWIRKUNG



Abbildung: Sheldon
Glashow

[6]



Abbildung: Steven
Weinberg



Abbildung: Abdus Salam

DIE ELEKTROSCHWACHE WECHSELWIRKUNG

- 1968 wird die elektroschwache Wechselwirkung durch Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam beschrieben
- Vereinheitlichte Theorie der Quantenelektrodynamik und schwachen Wechselwirkung
- Vier Austauschteilchen:
 - Das masselose Photon γ
 - Die massebehafteten Teilchen W^+ , W^- , Z^0
- Geringe Stärke und Reichweite der schwachen Wechselwirkung wird begründet durch die hohen Massen der Austauschteilchen
- Schwacher Mischungswinkel Θ_W als freier Parameter

DIE ENTDECKUNG DER NEUTRALEN STRÖME

NEUTRALE STRÖME (NC)

- Vorhersage der neutralen Ströme durch die elektroschwache Wechselwirkung
- Leptonische NC: $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$
→ Signatur: Einzelnes Elektron
- Hadronische NC: $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + X$
→ Signatur: Nur Hadronen, ohne Leptonen

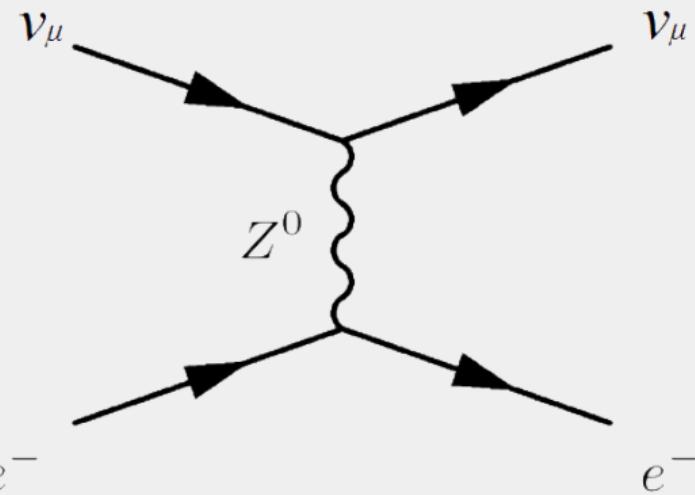


Abbildung: Feynman-Diagramm eines leptonischen neutralen Stromes [7]

DER GARGAMELLE DETEKTOR

- Blasenkammer, betrieben am CERN von 1970 bis 1979
 - Kammer gefüllt mit 12 m^3 Freon (CBrF_3)
 - Temperatur der Flüssigkeit über der Siedetemperatur
 - Durchquerende Teilchen ionisieren die Flüssigkeit, wobei Dampfblasen entstehen
 - Nachweis der Gasblasen durch Kameras
- Kammer 4,8 m lang, 2 m im Durchmesser, 2 T Magnetfeld (zur Rekonstruktion)



Abbildung: Gargamelle Blasenkammer, ausgestellt am CERN [8]

1. INTRODUCTION

Among the many problems posed in weak interactions, it appears that neutrino experiments in Gargamelle would be especially suitable to investigate the following : *)

- i) Total cross-sections in the high energy region, for ν and $\bar{\nu}$;
- ii) Inelastic continuum excitation of the hadronic amplitude-structure factors and "partons";
- iii) Existence of the intermediate W-boson;
- iv) Coupling constants for diagonal and non-diagonal weak interactions;
- v) Neutral currents.

Abbildung: Auszug aus dem Proposal zum Gargamelle Detektor, März 1970 [9].

DER GARGAMELLE DETEKTOR - NEUTRINOQUELLE

- Als Neutrinoquelle diente ein Protonenbeam vom Proton Synchotron (26 GeV)
 - Entstehung von Kaonen und Pionen durch Kollision der Protonen mit einem Beryllium-Target
 - Kaonen und Pionen werden fokussiert und zerfallen in einem 70 m langen Tunnel in Myonen und Neutrinos
 - Neutrinoenergie im Bereich 1 GeV bis 10 GeV

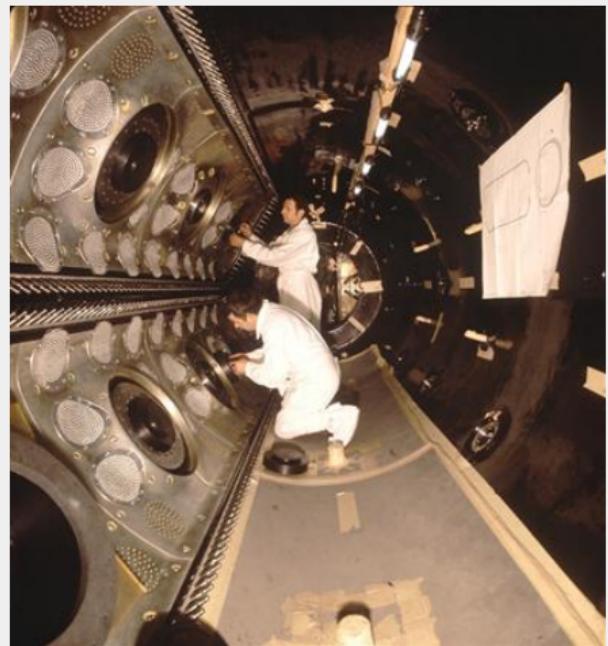


Abbildung: Blick in die Gargamelle Blasenkammer [10]

DER GARGAMELLE DETEKTOR - ERSTE RESULTATE

- **März 1972:** Erste Hinweise auf hadronische neutrale Ströme ändern die Prioritäten der Analyse
 - Suche sowohl nach hadronischen als auch leptonischen Events
 - Leptonische Events: Weniger Hintergrundereignisse, treten jedoch selten auf
- **Dezember 1972:** Erste Beobachtung eines leptonischen NC-Events
- **19. Juli 1973:** Entdeckung der neutralen Ströme (leptonisch und hadronisch) wird präsentiert

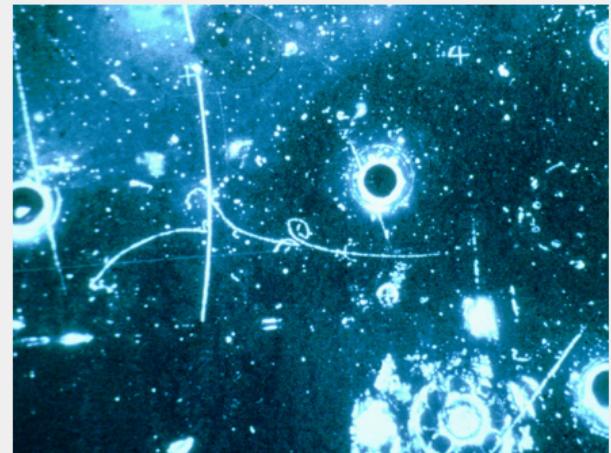


Abbildung: Beobachtung eines leptonischen neutralen Stromes [11]. Das Elektron bewegt sich horizontal von rechts nach links.

DER GARGAMELLE DETEKTOR - ERSTE RESULTATE

- Aus den Ergebnissen des Experimentes konnten die Massen von W-Boson und Z-Boson vorhergesagt werden [12]:

$$M_W \approx (60 - 80) \text{ GeV}$$
$$M_Z \approx (75 - 92) \text{ GeV}$$

- Jedoch existierte noch kein Experiment, welches die zur Erzeugung notwendige Schwerpunktsenergie zur Verfügung stellen konnte
⇒ Verschieben der "energy frontier" notwendig!

"PUSHING THE ENERGY FRONTIER"

CARLO RUBBIA

- Carlo Rubbia, geboren **1934** in Gorizia (Italien)
- Bereits früh ein Experte im Bereich der Elektronik
- Promovierte **1958** in Pisa und ging danach nach Columbia
- Ging nach wenigen Jahren zurück nach Europa zum CERN, bereits mit Mitte 20 "Group leader"
- Nimmt **1970** eine volle Professorenstelle in Harvard an



Abbildung: Carlo Rubbia im Jahre 1983
[13]

CARLO RUBBIA

- Hatte häufig unendlich viele Ideen für Experimente, jedoch selten die Geduld, diese umzusetzen
- Keinen Ruf für genaue Analysen:
"His numbers are what they are. They are usually wrong - but if they suit his purpose, nothing is wrong." (Bernard Sadoulet, [14])
- Seine Expertise war in den 1970er Jahren zwar bekannt, jedoch auch seine Misserfolge
⇒ z.B. widersprachen seine Analysen zunächst der Existenz neutraler Ströme



Abbildung: Bernard Sadoulet auf einer Konferenz in Amsterdam, 2013 [15]

SUPER PROTON SYNCHROTRON

- Super Proton Synchrotron (SPS) mit Umfang $R = 6,9 \text{ km}$ am CERN
- Ging **Juni 1976** in Betrieb
- Teilchenenergien von $E = 400 \text{ GeV}$ wurden erreicht
- Nutzung als fixed-target Experimenten mit Protonen:
 $\rightarrow \sqrt{s} \approx \sqrt{2 \cdot E \cdot m} \approx 27 \text{ GeV} \ll M_W, M_Z$
- SPS wird bis heute als Vorbeschleuniger am LHC sowie für Experimente wie COMPASS, NA-61 und NA-62 genutzt



Abbildung: Super Proton Synchrotron (SPS) [16]

COLLIDING-BEAM-EXPERIMENTE

- Idee: Nutzung von Proton-Proton-Kollisionen (pp) um ausreichende Schwerpunktsenergien zu erreichen:
 - Für Colliding-Beam-Experimente gilt $\sqrt{s} = 2 \cdot E$
 - Unter Berücksichtigung der Partonstruktur $\sqrt{s} = 2 \cdot E \cdot x$ (mit $x \approx 0.2$)
- Hierdurch wären geringere Teilchenenergien notwendig

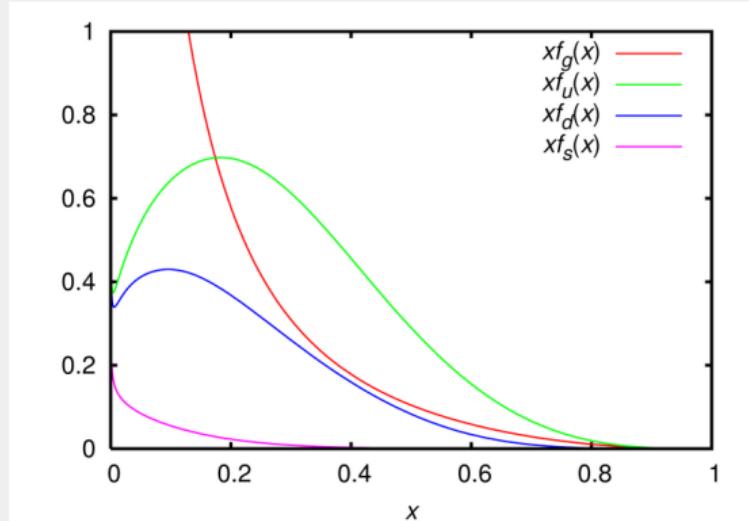


Abbildung: Partonverteilungsfunktion für das Proton, wobei x den Impulsanteil der Partons am gesamten Proton angibt. Die y-Achse ist proportional zur Wahrscheinlichkeit für das jeweilige x [17].

COLLIDING-BEAM-EXPERIMENTE

- **Januar 1976:** Workshop am Fermilab, um über die Möglichkeiten von pp-Experimenten zu sprechen
- Vortrag des jungen Peter M. McIntyre, Kollisionen von Protonen und Antiprotonen durchzuführen
 - Protonen und Antiprotonen könnten sich im selben Rohr befinden und die gleichen Magneten nutzen
 - Umbau eines bestehenden Proton-Synchrotrons wäre ausreichend
 - Herausforderung: Erzeugung der Antiprotonen in ausreichender Zahl sowie Kühlung
- Rubbia war, im Gegensatz zu den meisten Workshopteilnehmern, begeistert von der Idee



Abbildung: Peter M. McIntyre [18]

DIE MISERE DES CERNS

- In den vergangenen 25 Jahren gab es keine bedeutende Entdeckungen am CERN oder Nobelpreise
 - J/Ψ -Entdeckung am CERN wurde verpasst
 - Keinen Nobelpreis für die neutralen Ströme
 - Experimente, die am CERN abgelehnt wurden, haben häufig an anderen Standorten Entdeckungen gebracht
-
- Das CERN war bestrebt, eine neue Entdeckung zu machen

UMBAU DES SPS IN EINEN PROTON-ANTIPROTON-COLLIDER

- Rubbia und McIntyre schlug dem CERN **1976** vor, den vorhandenen Beschleuniger SPS in einen Proton-Antiproton-Collider umzubauen
 - Mit einer Strahlenergie von $E = 300 \text{ GeV}$ könnte eine Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = 2 \cdot E \cdot x = 120 \text{ GeV} > M_W, M_Z$ erreicht werden
 - Bau des Elektron-Positron-Colliders (LEP) war geplant, würde aber noch viele Jahre dauern
 - Geld war vorhanden, und die Chance auf die Entdeckung wäre sehr gut
- ⇒ **Januar 1978:** Bestätigung des CERNs, den SPS zum Super Proton Antiproton Synchrotron (Sp \bar{p} S) umzubauen

DAS SUPER PROTON ANTIPOTON SYNCHROTRON

- Betrieb von **Juli 1981 bis 1991**
- Speicherring für Protonen und Antiprotonen, Speicherzeit von 15 bis 20 Stunden
- Betrieb eines Speicherrings ($S\bar{p}\bar{p}S$) anspruchsvoller als der eines Synchrotrons (SPS)
 - Bau einer beam line für entgegengesetzte Injektion
 - Verbesserung des Vakuums um drei Größenordnungen
 - Anpassung der Kavitäten, um p und \bar{p} in exakten Bunches zu beschleunigen (sodass Kollisionen nur in den Detektoren stattfinden)

BETRIEB DES S^P_S

- Nachweis des Z-Bosons über Reaktion $Z \rightarrow e^+e^-$
- Um mit dieser Reaktion eine Rate von 1 event pro Tag zu erreichen werden $\approx 3 \cdot 10^{10}$ Antiprotonen benötigt
- Protonen werden vom Proton Synchrotron (PS) auf 26 GeV beschleunigt und auf ein Target geleitet
- Entstehende Antiprotonen mit Impuls 3,5 GeV werden mit Spektrometer ausgewählt und an einen Speicherring, den Antiproton Accumulator (AA), weitergeleitet
- Problem: Phasenraumvolumen der Antiprotonen



Abbildung: Simon van der Meer im AA Kontrollraum [19]

BETRIEB DES SP\bar{P}S - STOCHASTISCHE KÜHLUNG

- Prinzip der stochastischen Kühlung: 1972 von Simon van der Meer entwickelt
- Ziel: Verringerung des Phasenraumvolumens im AA
- Teilchen, die von idealer Bahn im Speicherring abweichen, führen Oszillationen aus
- **Pick-up:** Messe Auslenkungen der Teilchen(gruppen) von Idealbahn
→ Ausgabe eines Signales proportional zu dieser Auslenkung
- **Kicker:** Wenn Teilchen Kicker passiert, führe über elektromagnetische Felder eine Korrektur durch
- Phasenraumverdichtung um Faktor $1 \cdot 10^9$ ermöglicht

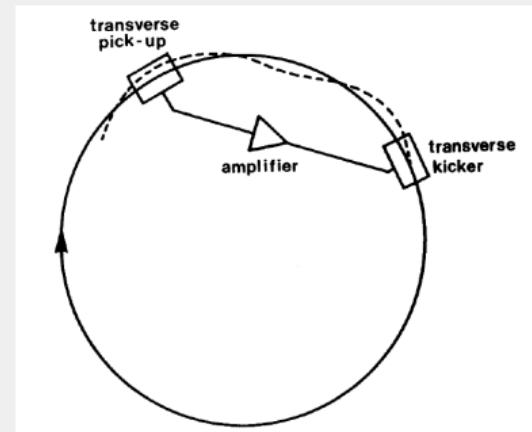


Abbildung: Prinzip der stochastischen Kühlung [12]

BETRIEB DES S \bar{p} S

Sobald genug Antiprotonen im AA angesammelt:

- Beschleunige drei Bunches an Protonen im PS auf 26 GeV
 - Injektion der Protonen in den S \bar{p} S
- Führe Antiprotonen aus AA in PS über, beschleunige sie in drei Bunches auf 26 GeV
 - Injektion der Antiprotonen in den S \bar{p} S in entgegengesetzte Richtung
- Beschleunigung im S \bar{p} S auf bis zu 315 GeV
 - Ca. 15 bis 20 Stunden Datennahme möglich

DIE SUCHE NACH DEN W- UND Z-BOSONEN

DIE EXPERIMENTE AM S \bar{p} S

- Bewilligung der Experimente UA1 (Juni 1978) und UA2 (Ende 1978) am S \bar{p} S
 - Beide mit dem Ziel, die W- und Z-Bosonen zu finden
- Experimente am S \bar{p} S lagen ca. 50 m unter der Erde, deshalb die Namen **Underground Area**
- W-Boson zerfällt primär ($\approx 70\%$) in ein Quark-Antiquark-Paar, welche als zwei hadronische Jets sichtbar wären
 - Überlagert durch Untergrund aufgrund von harter Streuung der Partonen
 - Stattdessen Nachweis des W-Bosons über die Signatur $W \rightarrow l\nu_l$

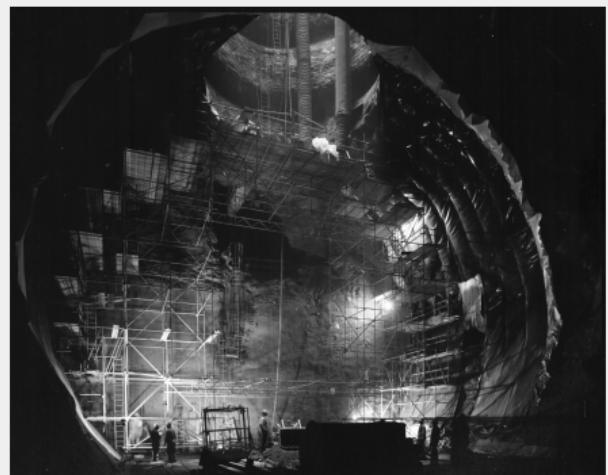


Abbildung: Ausbau der Experimentierhalle für UA2, 1980 [20]

DIE EXPERIMENTE AM S⁺P⁻S - UA1

- Team von ca. 130 Physikern, unter Leitung von Rubbia, arbeiteten an UA1
- Design: Großer, komplexer, multifunktionaler 4π -Detektor
- Umgeben von großem Dipolmagnet mit 0,7 T Magnetfeld
- Driftkammer zur Rekonstruktion der Teilchenbahn, Energieverlust, Ladung und Impuls

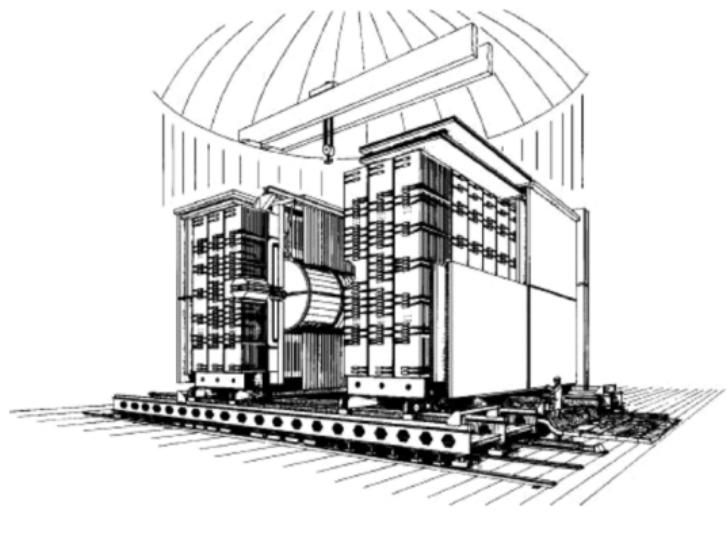


Abbildung: Skizze des Aufbaus von UA1 [12]. Der Detektor ist auseinandergefahren.

DIE EXPERIMENTE AM S \bar{P} S - UA1

- Elektromagnetisches und hadronisches Kalorimeter
 - Hermetisch abgeschlossen, um fehlenden transversalen Impuls rekonstruieren zu können
 - Elektromagnetisches Kalorimeter abwechselnd aus Blei- und Szintillatorschichten (Sandwich-Kalorimeter)
- Myonkammern aus Driftröhren

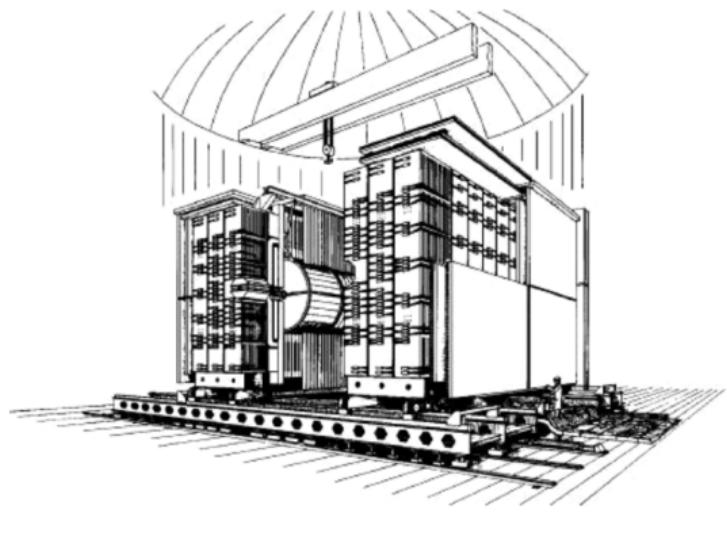


Abbildung: Skizze des Aufbaus von UA1 [12]. Der Detektor ist auseinandergefahren.

DIE EXPERIMENTE AM S⁺P⁻S - UA2

- Team von ca. 60 Physikern, unter Leitung von Pierre Darriulat, arbeiteten an UA2
- Design: Detektor optimiert auf die Rekonstruktion von Elektronen aus W- und Z-Zerfällen
- Fokus auf eine präzises, hochauflösendes Kalorimeter
 - EM-Kalorimeter aus Blei und Szintillatorschichten
 - Hadronisches Kalorimeter aus Eisen und Szintillatorschichten
- Keine Myonkammern



Abbildung: Überreste eines Kalorimetermoduls des UA2 Detektors (rechts) [21]

SUCHE NACH DEN W-BOSONEN

- Suche nach $W^\pm \rightarrow e^\pm + \overset{(-)}{\nu_e}$ an UA1 und UA2
- Suche nach $W^\pm \rightarrow \mu^\pm + \overset{(-)}{\nu_\mu}$ an UA1
- Signatur von $W \rightarrow e\nu_e$:
 - Isoliertes Elektron mit hohem transversalen Impuls
 - Hoher fehlender transversaler Impuls durch Neutrino
- Fehlender transversaler Impuls:

$$\vec{p}_T^{\text{miss}} = - \sum_{\text{cells}} \vec{p}_T$$

wobei über alle transversalen Impulsanteile in den Kalorimetern summiert wird

- Im idealen Detektor gilt: $\vec{p}_T^{\text{miss}} = \vec{p}_{\nu,T}$

- Aufgetragen: Häufigkeit des Auftretens der fehlenden transversalen Impulse
- Bei kleinen Energien: Nicht signifikante fehlende transversale Impulse aufgrund von Kalorimeterauflösung
- In Schwarz: Events, bei denen zusätzlich ein isoliertes Elektron mit hohem transversalen Impuls gefunden wurde

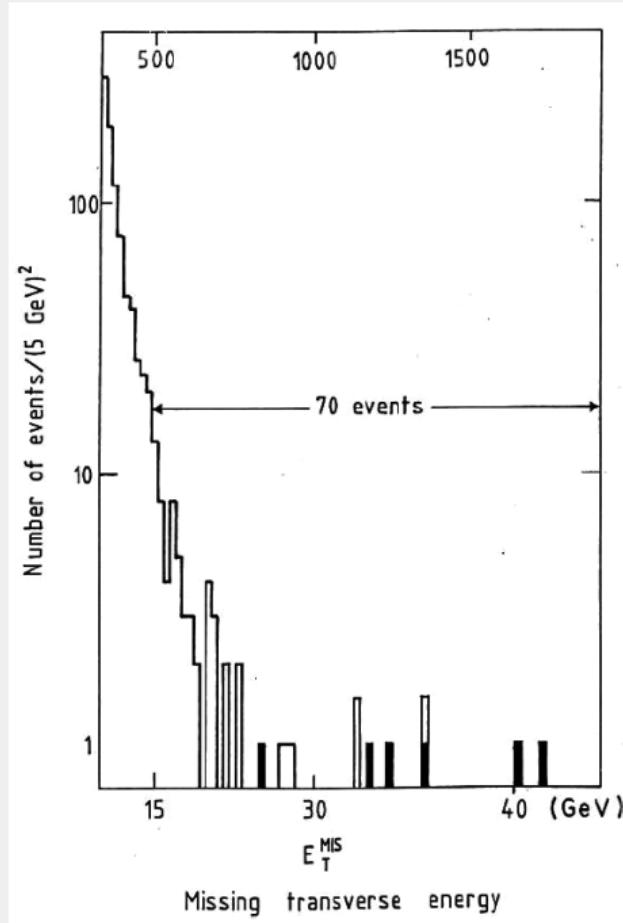
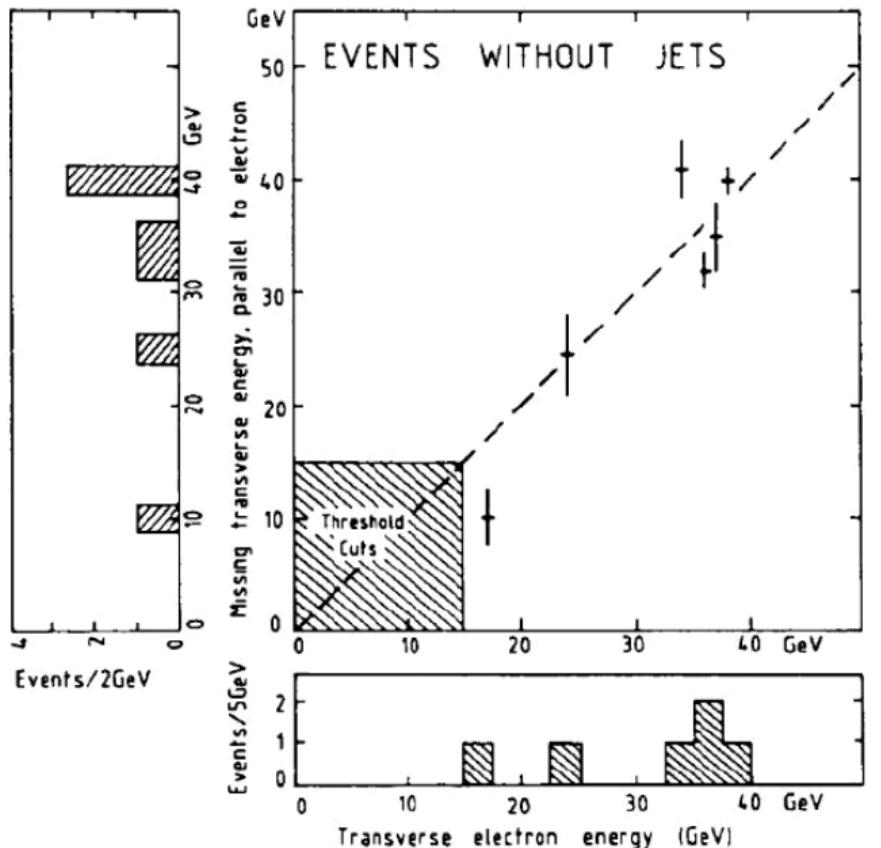


Abbildung: Ergebnisse von UA1, Daten aus dem Jahr 1982 [12]



Transversaler Impuls der Elektronen und fehlender transversaler Impuls liegen "back to back"
 → Gesuchte Signatur!

Abbildung: Ergebnisse von UA1, Daten aus dem Jahr 1982 [12]

SUCHE NACH DEN W-BOSONEN

- **20. Januar 1983** Ergebnis von UA1 wird in Seminar vorgestellt
- **21. Januar 1983** UA2 präsentiert sechs weitere Kandidaten
- **25. Januar 1983** Pressekonferenz mit der Nachricht, dass das W-Boson entdeckt wurde
 - Im Bild von links nach rechts: Carlo Rubbia, Simon van der Meer, Herwig Schopper (Director General), Erwin Gabathuler (Research Director), Pierre Darriulat



Abbildung: Pressekonferenz am 25. Januar 1983 [22]

SUCHE NACH DEM Z-BOSON

- Laut Theorie: Z-Boson Ereignisse treten etwa zehnmal seltener als W-Boson Ereignisse auf
 - Längere Messzeit und Verbesserung der Luminosität
- Einschränkung der relevanten Events bei UA1 ($Z \rightarrow e^+e^-$):
 1. Zwei Kalorimetereinträge, die mit Elektronen kompatibel sind und ein $E_T > 25 \text{ GeV}$ besitzen
 2. Isolierte Spur, die auf einen der beiden Cluster zeigt
 3. Isolierte Spur, die auf zweiten Cluster zeigt
 - 4 Events mit dieser Signatur gefunden, kompatibel mit einer eindeutigen invarianten Masse

SUCHE NACH DEM Z-BOSON

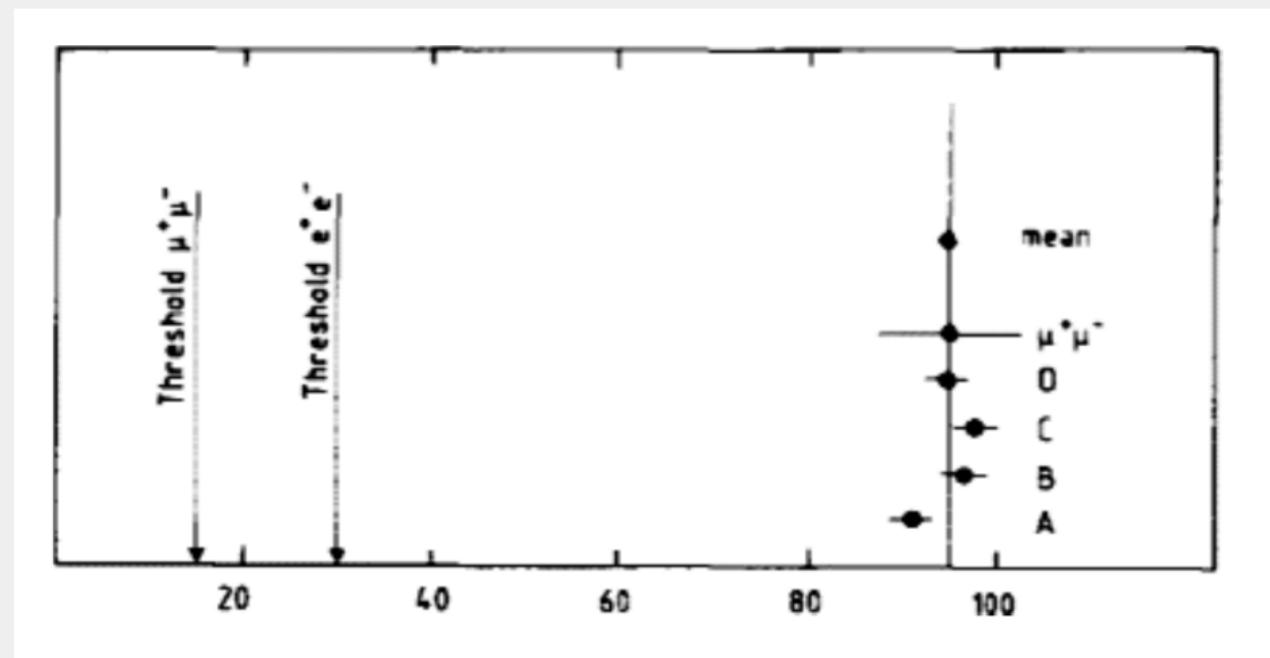


Abbildung: Invariante Massen der Z-Boson-Ereignisse, die von UA1 beobachtet wurden. [12] Zusätzlich konnte ein Event mit der Signatur $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ beobachtet werden.

SUCHE NACH DEM Z-BOSON

- Wert für M_Z von UA1:

$$M_Z = (95,2 \pm 2,5 \pm 3,0) \text{ GeV}$$

- UA2 hat drei Kandidaten für Z-Bosonen gefunden, Wert für M_Z :

$$M_Z = (91,9 \pm 1,3 \pm 1,4) \text{ GeV}$$

- Zum Vergleich: Der aktuelle Wert [23]:

$$M_Z = (91,1876 \pm 0,0021) \text{ GeV}$$

- **1. Juni 1983:** Bekanntgabe, dass das Z-Boson gefunden wurde

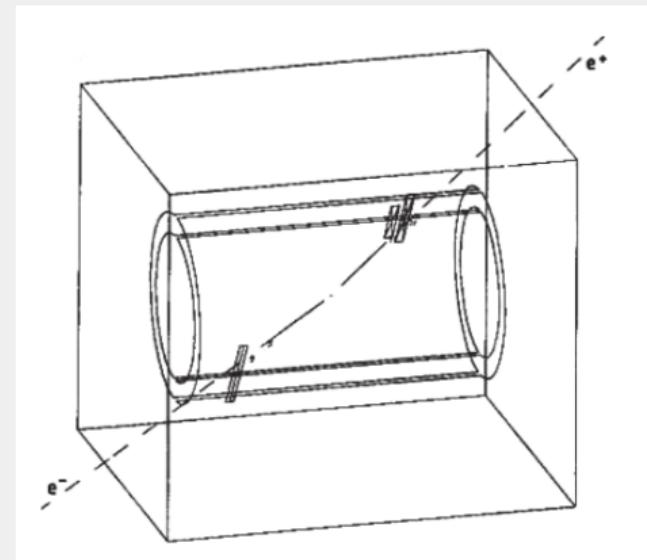


Abbildung: Einzelnes UA1 Event der Signatur $Z \rightarrow e^+ e^-$, nachdem der Hintergrund entfernt wurde [12]

DIE ZEIT NACH DER ENTDECKUNG

NOBELPREISE

- **17. Oktober 1984** Der Nobelpreis in Physik wird an Carlo Rubbia und Simon Van der Meer vergeben:
"For their decisive contributions to the large project, which led to the discovery of the field particles W and Z, communicators of weak interaction."



Abbildung: Carlo Rubbia und Simon van der Meer feiern den Erhalt des Nobelpreises am CERN [24]

PRÄZISIONSMESSUNGEN

- Präzisionsmessungen von m_W und m_Z
 - Am Large-Electron-Positron Collider (LEP), Betrieb von 1989 bis 2000
 - Am Tevatron, Betrieb 1983 bis 2011, erste $p\bar{p}$ -Kollisionen im Oktober 1985



Abbildung: Fermilab, Tevatron im Hintergrund [25]

PRÄZISIONSMESSUNGEN

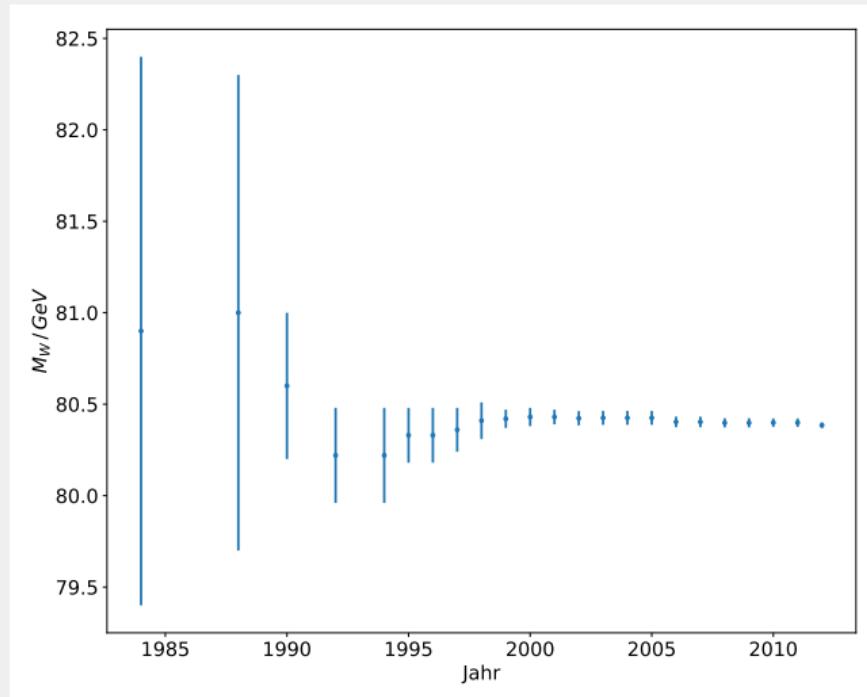


Abbildung: Daten und Fehler für die Masse des W-Bosons für die verschiedenen Jahre aus dem PDG.
Quelle: <http://pdg.lbl.gov/rpp-archive/>.

PRÄZISIONSMESSUNGEN

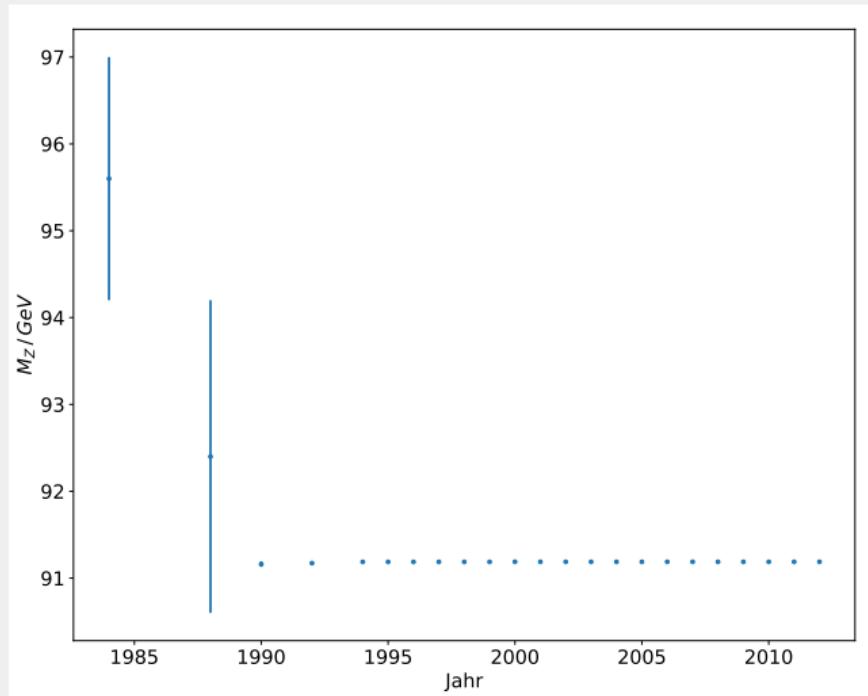
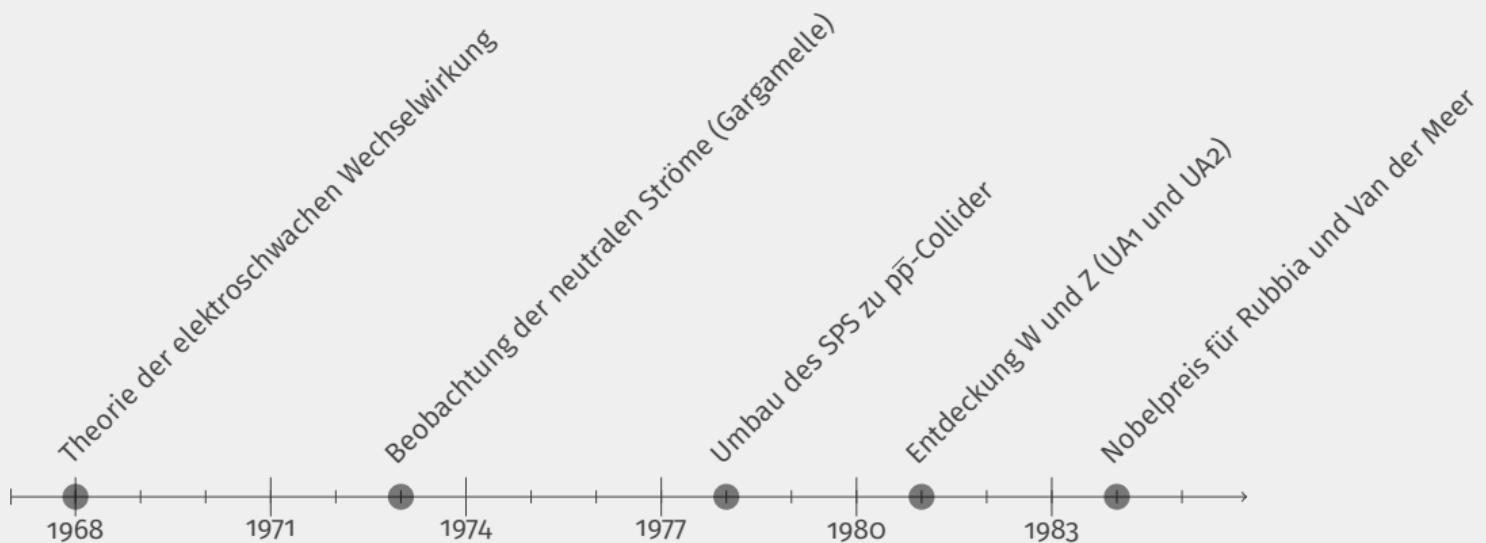


Abbildung: Daten und Fehler für die Masse des Z-Bosons für die verschiedenen Jahre aus dem PDG.
Quelle: <http://pdg.lbl.gov/rpp-archive/>.

ZUSAMMENFASSUNG



VIELEN DANK FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT!



REFERENCES |

- [1] DIE ENTDECKUNG DES W- UND Z-BOSON.
<https://www.quantumdiaries.org/tag/majorana/>.
[Online; accessed 01-December-2018].
- [2] T. P. GORRINGE AND D. W. HERTZOG.
PRECISION MUON PHYSICS.
Prog. Part. Nucl. Phys., 84:73–123, 2015.
- [3] DAVID J GRIFFITHS.
INTRODUCTION TO ELEMENTARY PARTICLES; 2ND REV. VERSION.
Physics textbook. Wiley, New York, NY, 2008.
- [4] WIKIMEDIA COMMONS.
FILE:ENRICO FERMI 1943-49.JPG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY.
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Enrico_Fermi_1943-49.jpg&oldid=269977942, 2017.
[Online; accessed 1-December-2018].
- [5] DONALD H. PERKINS.
ELECTROWEAK INTERACTIONS AND THE STANDARD MODEL, PAGE 242275.
Cambridge University Press, 4 edition, 2000.

REFERENCES II

- [6] NOBEL LECTURES IN PHYSICS 1971-1980 (*NOBEL LECTURES, INCLUDING PRESENTATION SPEECHES AND LAUREATE*).
WORLD SCIENTIFIC PUB CO INC, 1991.
- [7] WIKIMEDIA COMMONS.
FILE:NEUTRAL CURRENT, LEPTONIC EVENT, MUON NEUTRINO.PNG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY.
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Neutral_current,_leptonic_event,_muon_neutrino.png&oldid=291827646, 2018.
[Online; accessed 26-November-2018].
- [8] WIKIMEDIA COMMONS.
FILE:GARGAMELLE.JPG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY.
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Gargamelle.jpg&oldid=310784373>, 2018.
[Online; accessed 26-November-2018].
- [9] PROPOSAL FOR A NEUTRINO EXPERIMENT IN GARGAMELLE.
<https://cds.cern.ch/record/1184733>, MAR 1970.
- [10] A VIEW INSIDE THE GARGAMELLE BUBBLE CHAMBER. TRAVAUX DE FINITION À L'INTÉRIEUR DU COPRS DE LA CHAMBRE DE GARGAMELLE.
<https://cds.cern.ch/record/615825>, Nov 1970.

REFERENCES III

- [11] **GARGAMELLE: FIRST NEUTRAL CURRENT.**
<https://cds.cern.ch/record/39468>, 1973.
- [12] **LUIGI DI LELLA AND CARLO RUBBIA.**
THE DISCOVERY OF THE W AND Z PARTICLES, PAGES 137–163.
- [13] **CARLO RUBBIA IN HIS OFFICE.**
<https://cds.cern.ch/record/970174>, AUG 1983.
No Comment.
- [14] **GARY TAUBES.**
NOBEL DREAMS: POWER, DECEIT AND THE ULTIMATE EXPERIMENT.
Microsoft Press, 1988.
- [15] **DELTA INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS.**
HISTORY OF DARK MATTER SYMPOSIUM.
<https://www.youtube.com/watch?v=btKfJz8iZSE>, Jan 2015.
- [16] **CERN.**
SUPER PROTON SYNCHROTRON (SPS) - PROTONEN.
<http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=sps>.
[Online; accessed 02-December-2018].

REFERENCES IV

- [17] WIKIMEDIA COMMONS.
FILE:CTEQ6 PARTON DISTRIBUTION FUNCTIONS.PNG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY.
https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:CTEQ6_parton_distribution_functions.png&oldid=70178011, 2012.
[Online; accessed 2-December-2018].
- [18] SHANA HUTCHINS.
1.5 BILLION PARTICLE PHYSICS EXPERIMENT ABOARD ENDEAVOUR HAS TEXAS A AND M TIES.
http://www.science.tamu.edu/news/story.php?story_ID=798.
[Online; accessed 02-December-2018].
- [19] SIMON VAN DER MEER IN THE AA CONTROL ROOM.
http://cds.cern.ch/record/970306, JAN 1984.

 (19 Sep 2006, heribert.koziol@cern.ch).
- [20] AT UA2.
https://cds.cern.ch/record/969545, FEB 1980.
No Comment.
- [21] ATLAS COLLABORATION.
UA2 DETECTOR RELOCATED TO BUILDING 175.
<https://cds.cern.ch/images/ATLAS-PHO-Site-2015-003-1>, Aug 2015.

REFERENCES V

- [22] DISCOVERY OF THE INTERMEDIATE W BOSON.
<http://cds.cern.ch/record/39570>, JAN 1983.
- [23] C. PATRIGNANI ET AL.
REVIEW OF PARTICLE PHYSICS.
Chin. Phys., C40(10):9, 2016.
- [24] SIMON VAN DER MEER AND CARLO RUBBIA CELEBRATE THEIR AWARDING OF THE NOBEL PRIZE IN 1984 WITH A TOAST AT CERN.
<https://cds.cern.ch/record/615822>, OCT 1984.
Image scanned from original photo negative on 11 May 2015.
- [25] WIKIMEDIA COMMONS.
FILE:FERMILAB.JPG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY.
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Fermilab.jpg&oldid=282915500>, 2018.
[Online; accessed 5-December-2018].
- [26] PATRICK SCHÜNKE.
FERMIS NEUTRINO: THE KEY TO THE WEAK NUCLEAR FORCE.
<https://www.physi.uni-heidelberg.de/~fschney/Seminar.SS10/Sch%C3%BCnke.pdf>.
[Online; accessed 02-December-2018].

VORHERSAGE DER W- UND Z-BOSON MASSEN

Aus der elektroschwachen Theorie folgt [26]

$$\frac{\sigma_{\text{NC}}}{\sigma_{\text{CC}}} = \frac{1}{2} - \sin^2(\Theta_W) + \frac{20}{27} \sin^4(\Theta_W)$$

sowie

$$M_W^2 = \frac{e^2 \sqrt{2}}{8G_F \sin^2(\Theta_W)}$$

$$M_Z = \frac{M_W}{\cos(\Theta_W)}.$$

Hieraus lassen sich aus den experimentellen Daten von Gargamelle die Massen des W-Bosons und Z-Bosons vorhersagen zu [12]:

$$M_W \approx (60 - 80) \text{ GeV}$$

$$M_Z \approx (75 - 92) \text{ GeV}$$

MESSUNG DER W-BOSON MASSE VON UA1

- Beobachtung von $W \rightarrow e\nu$
- Invariante Masse lässt sich aufgrund des nicht detektierten Neutrinos nicht vollständig bestimmen
 - z-Komponente des Impulses ist unbekannt

Betrachte transversale Masse M_T , definiert über

$$M_T^2 = (E_{T,1} + E_{T,2})^2 - (\vec{p}_{T,1} + \vec{p}_{T,2})^2$$

mit $E_T \approx |\vec{p}_{T,1}|$. Es ergibt sich

$$M_T^2 = 2E_{T,1}E_{T,2}(1 - \cos\Theta)$$

mit dem Winkel Θ zwischen den beiden Zerfallsprodukten.

MESSUNG DER W-BOSON MASSE VON UA1

- Transversale Masse M_T ist sensitiv auf M_W
 - Auftreten der "Jacobi-Kante" bei M_W , wenn M_T gegen die Ereignisrate aufgetragen wird
 - Grund: $M_T \leq M_W$
 - Kante verschmiert aufgrund von endlicher Zerfallsbreite sowie Impuls in z-Richtung
- Bestimmung von M_W zu [12]

$$M_W = (80,2 \pm 0,8 \pm 1,3) \text{ GeV}$$

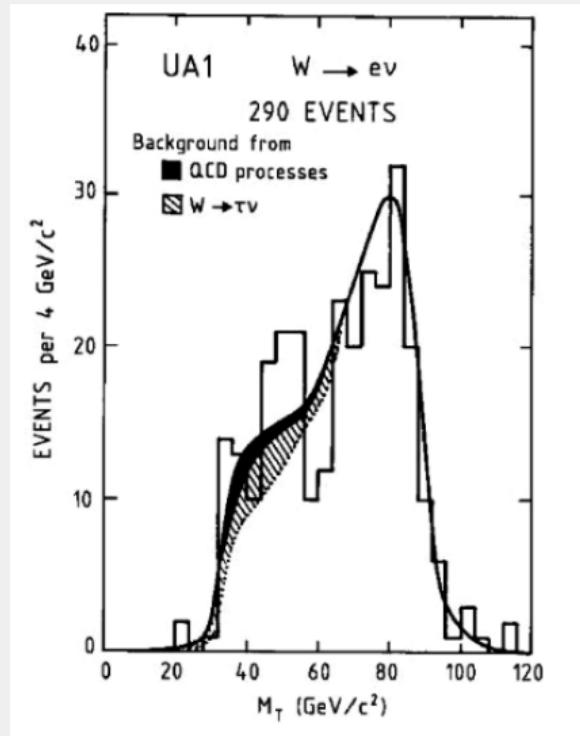


Abbildung: Transversale Masse M_T in der Signatur $W \rightarrow e\nu$, gemessen von UA1 [12]