

# DIE W-/Z-BOSON ENTDECKUNG

JEAN-MARCO ALAMEDDINE

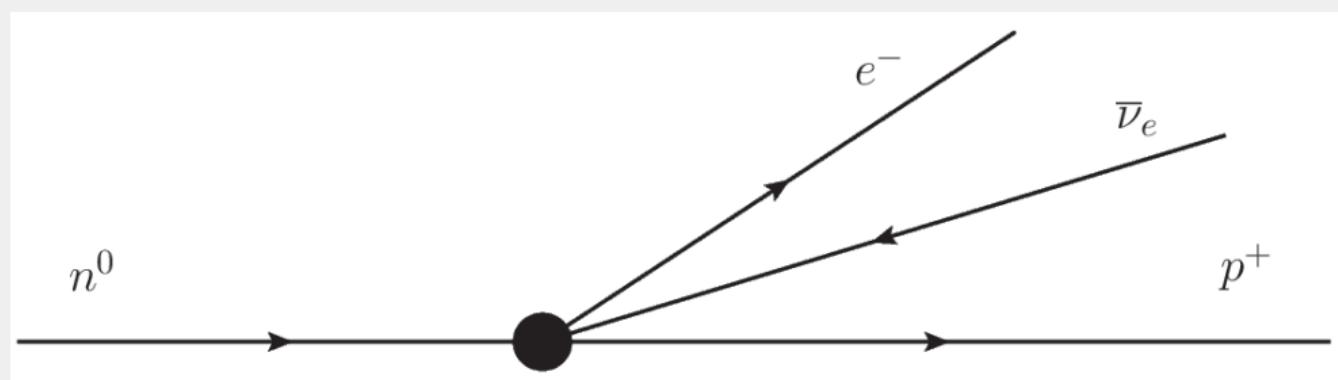
TU DORTMUND  
FAKULTÄT PHYSIK

07 12 2018

# **DIE THEORIE DER SCHWACHEN WECHSELWIRKUNG**

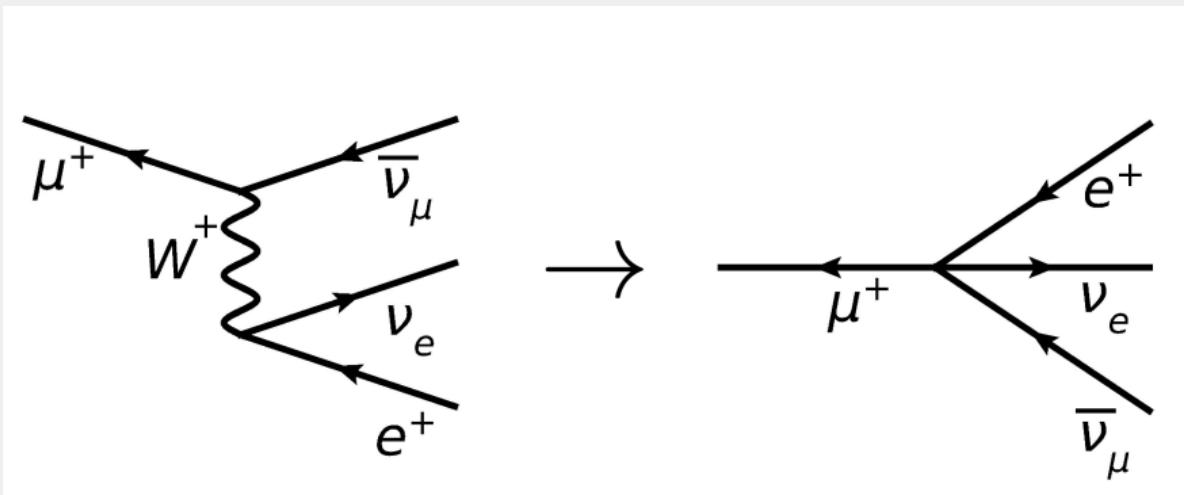
# FERMIS THEORIE DES $\beta$ -ZERFALLS

- 1933 beschreibt Fermi den  $\beta$ -Zerfalls 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  $\beta$ -Zerfalls nach Fermi [1]

# DIE FERMI-WECHSELWIRKUNG ALS EFFEKTIVE THEORIE



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

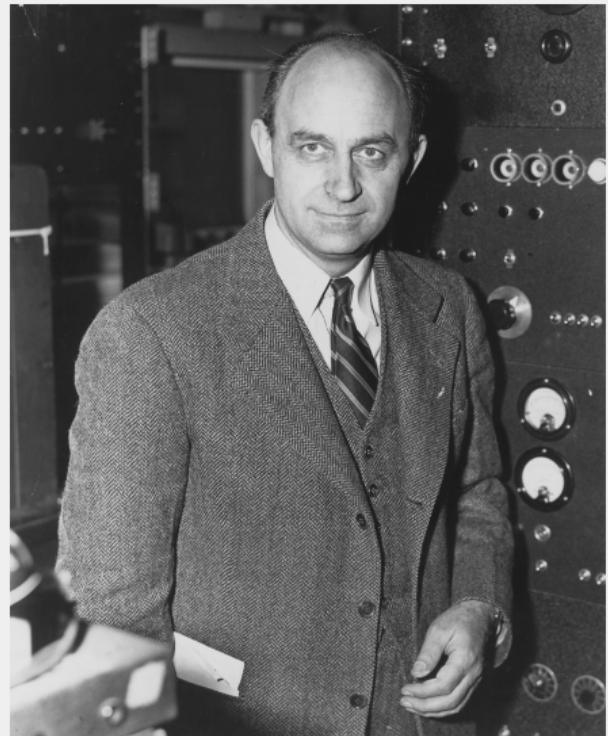
$\underbrace{\rightarrow}_{q^2 \ll M^2}$

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

[17] (bearbeitet), [18]

# DIE FERMI-WECHSELWIRKUNG ALS EFFEKTIVE THEORIE

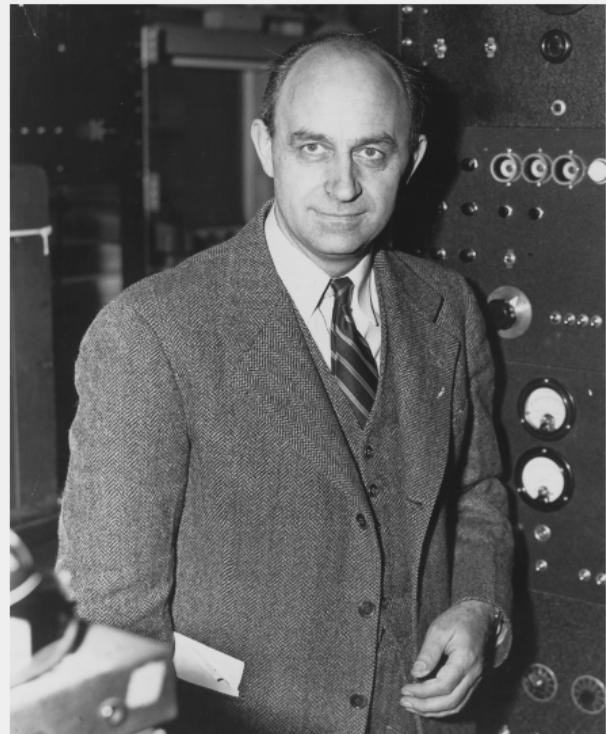
- Fermi-Wechselwirkung stellt für kleine Energien (bis heute) eine sehr gute Näherung dar (da schwache Wechselwirkung mit geringer Reichweite)
  - Verallgemeinerung: Anwendung der Theorie auf viele weitere Reaktionen (z.B.  $\mu$ -Zerfall) liefert hervorragende Ergebnisse
- Erweiterung der Theorie, um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



**Abbildung:** Enrico Fermi [13]

# 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) [21]
- Mit höheren Beschleunigerenergien können Abweichungen von der Theorie gemessen werden



**Abbildung:** Enrico Fermi [13]

# DIE ELEKTROSCHWACHE WECHSELWIRKUNG



**Abbildung:** Sheldon  
Glashow

[9]



**Abbildung:** Steven  
Weinberg



**Abbildung:** Abdus Salam

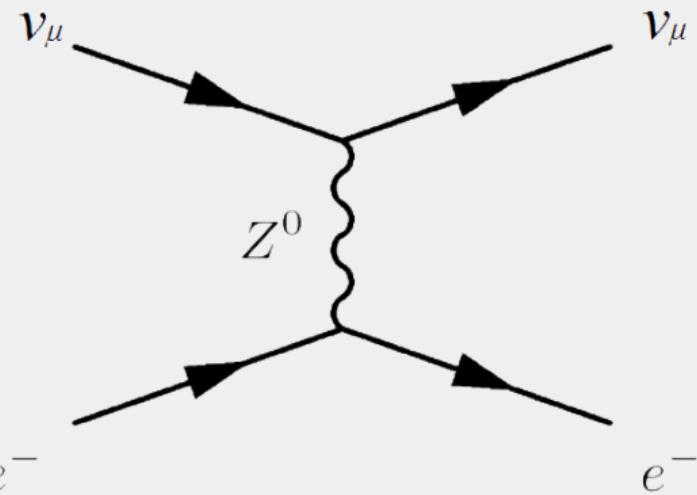
# DIE ELEKTROSCHWACHE WECHSELWIRKUNG

- 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  $\gamma$
  - Die massebehafteten Teilchen  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$
- Geringe Stärke und Reichweite der schwachen Wechselwirkung wird begründet durch die hohen Massen der Austauschteilchen
- Schwacher Mischungswinkel  $\Theta_W$  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 [15]

# DER GARGAMELLE DETEKTOR

- Blasenkammer, betrieben am CERN von 1970 bis 1979
  - Kammer gefüllt mit  $12 \text{ m}^3$  Freon ( $\text{CBrF}_3$ )
  - 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 [14]

## 1. INTRODUCTION

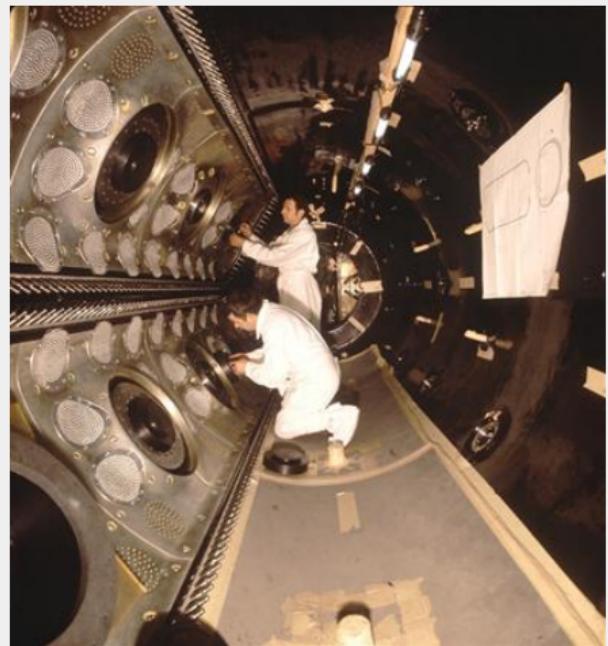
Among the many problems posed in weak interactions, it appears that neutrino experiments in Gargamelle would be especially suitable to investigate the following : \*)

- i) Total cross-sections in the high energy region, for  $\nu$  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 [3].

# DER GARGAMELLE DETEKTOR - NEUTRINOQUELLE

- Als Neutrinoquelle diente ein Protonenbeam vom Proton Syncrotron (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 [2]

# DER GARGAMELLE DETEKTOR - ERSTE RESULTATE

- **März 1972:** Erste Hinweise auf hadronische schwache 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 schwachen Ströme (leptonisch und hadronisch) wird präsentiert



**Abbildung:** Beobachtung eines leptonischen neutralen Stromes [4]. 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 [20]:

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

- 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  
[6]

# 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)
- 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 [16]

# SUPER PROTON SYNCHROTRON

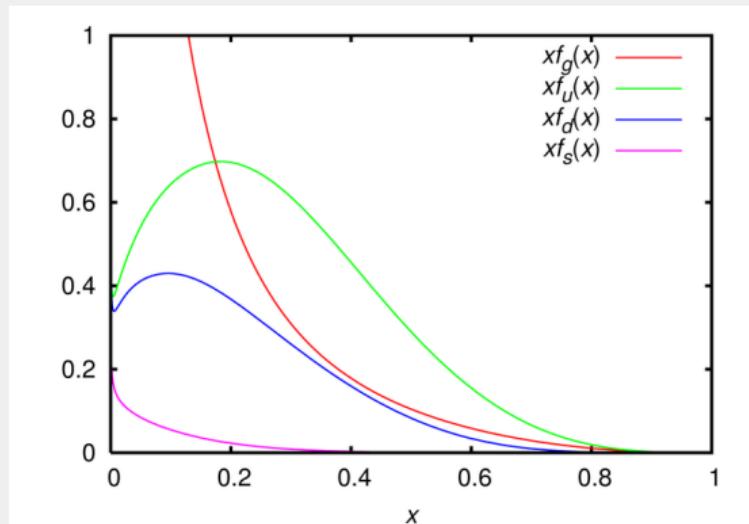
- Super Proton Synchrotron (SPS) mit Umfang  $R = 6,9 \text{ km}$  am CERN
- Ging **Juni 1976** in Betrieb
- Teilchenenergien von  $E = 400 \text{ GeV}$  wurden erreicht
- Nutzung als fixed-target Experimenten mit Protonen:  
 $\rightarrow \sqrt{s} \approx \sqrt{2 \cdot E \cdot m} \approx 27 \text{ GeV}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



**Abbildung:** Super Proton Synchrotron (SPS) [10]

# 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  $x$  [12].

# COLLIDING-BEAM-EXPERIMENTE

- **Januar 1975:** 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 [19]

# DIE MISERE DES CERNS

- In den vergangenen 25 Jahren gab es keine bedeutende Entdeckungen am CERN oder Nobelpreise
    - $J/\Psi$ -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 Eletron-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 GröSSeordnungen
  - Anpassung der Kavitäten, um  $p$  und  $\bar{p}$  in exakten Bunches zu beschleunigen (so dass Kollisionen nur in den Detektoren stattfinden)

# BETRIEB DES S<sup>P</sup><sub>S</sub>

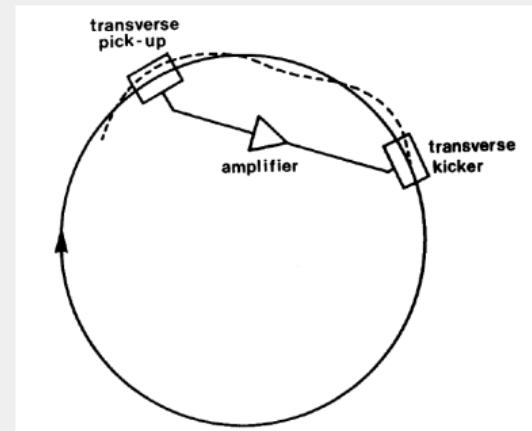
- Nachweis des Z-Bosons über Reaktion  $Z \rightarrow e^+e^-$ 
  - Um mit dieser Reaktion eine Rate von 1 event pro Tag zu erreichen werden  $\approx 3 \cdot 10^{10}$  Antiprotonen benötigt
- Protonen werden vom Proton Synchrotron (PS) auf 26 GeV beschleunigt und auf ein Target geleitet
- Entstehende 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 [8]

# BETRIEB DES SPPS - 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 einen Korrektur durch
- Phasenraumverdichtung um Faktor  $1 \cdot 10^9$  ermöglicht



**Abbildung:** Prinzip der stochastischen Kühlung [20]

# BETRIEB DES S $\bar{p}$ S

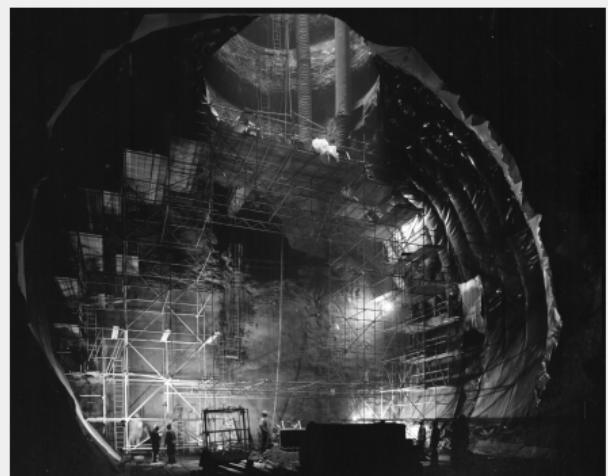
Sobald genug Antiprotonen im AA angesammelt:

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

# **DIE SUCHE NACH DEN W- UND Z-BOSONEN**

# DIE EXPERIMENTE AM SPPS

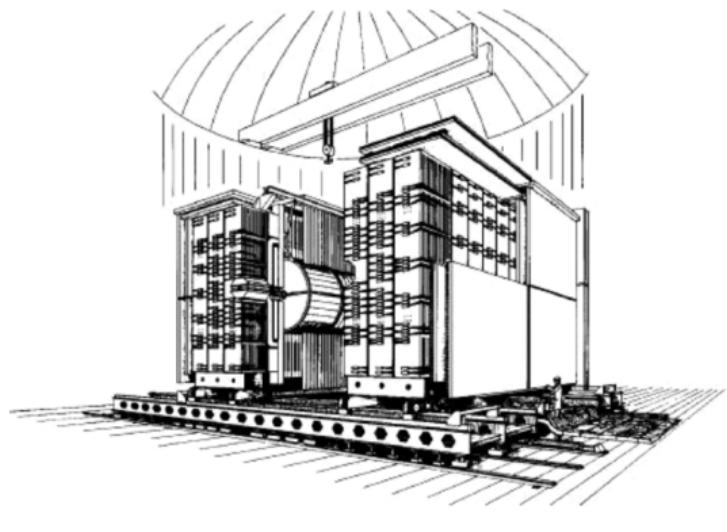
- Bewilligung der Experimente UA2 (Juni 1978) und UA3 (Ende 1978)
  - Beide mit dem Ziel, die W- und Z-Bosonen zu finden
- Experimente am SpPS lagen ca. 50 m unter der Erde, deshalb die Namen **Underground Area**
- W-Boson zerfällt primär ( $\approx 70\%$ ) in ein Quark-Antiquark-Paar, welche als zwei 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 [5]

# DIE EXPERIMENTE AM S<sup>+</sup>P<sup>-</sup>S - UA1

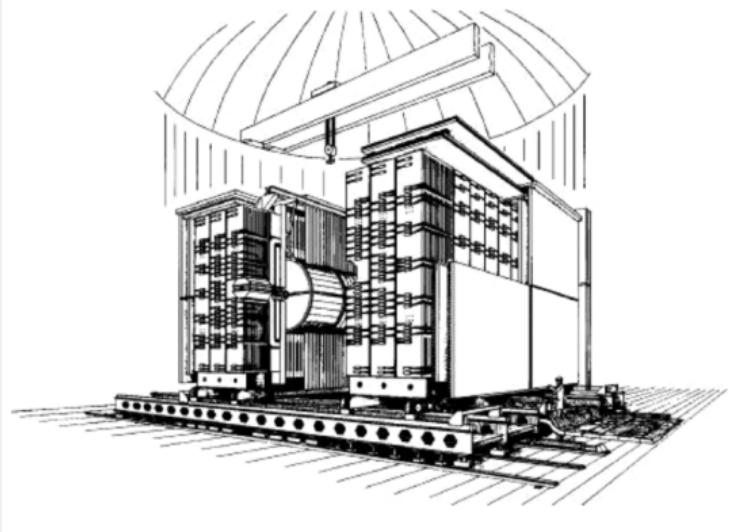
- Team von ca. 130 Physikern, unter Leitung von Rubbia, arbeiteten an UA1
- Design: Großer, komplexer, multifunktionaler  $4\pi$ -Detektor
- Umgeben von großem Dipolmagnet mit 0,7 T Magnetfeld
- Driftkammer zur Rekonstruktion der Teilchenbahn, Energieverlust, Ladung und Impuls



**Abbildung:** Skizze des Aufbaus von UA1 [20]. 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 [20]. Der Detektor ist auseinandergefahren.

# DIE EXPERIMENTE AM S<sup>+</sup>P<sup>-</sup>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 Kalorimetermodules des UA2 Detektors (rechts) [11]

# DIE RESULTATE VON UA1 UND UA2

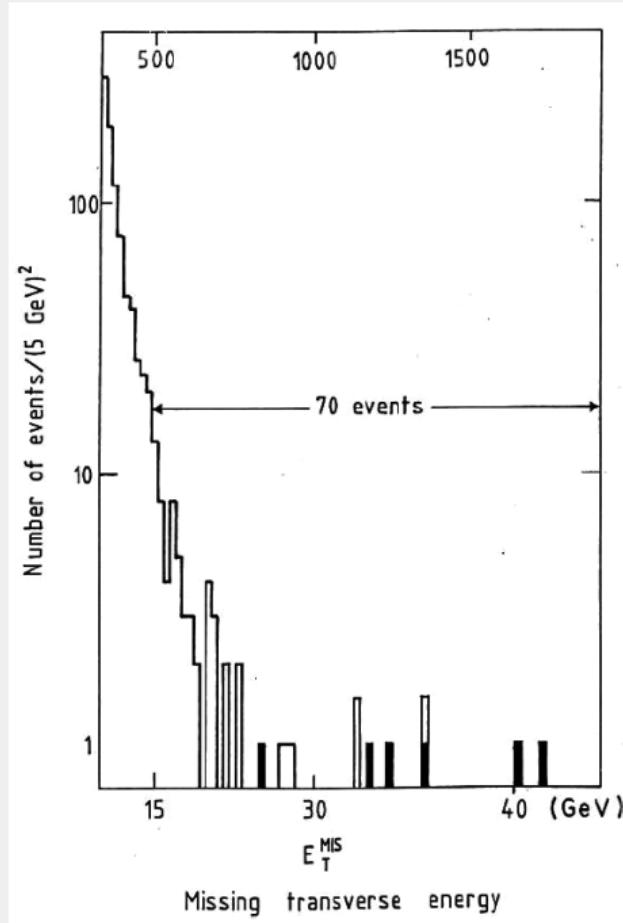
- Suche nach  $W^\pm \rightarrow e^\pm + \overset{(-)}{\nu_e}$  an UA1 und UA2
- Suche nach  $W^\pm \rightarrow \mu^\pm + \overset{(-)}{\nu_\mu}$  an UA1
- Signatur von  $W \rightarrow e\nu_e$ :
  - Isoliertes Elektron mit hohem transversalen Impuls
  - Hoher fehlender transversaler Impuls durch Neutrino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

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

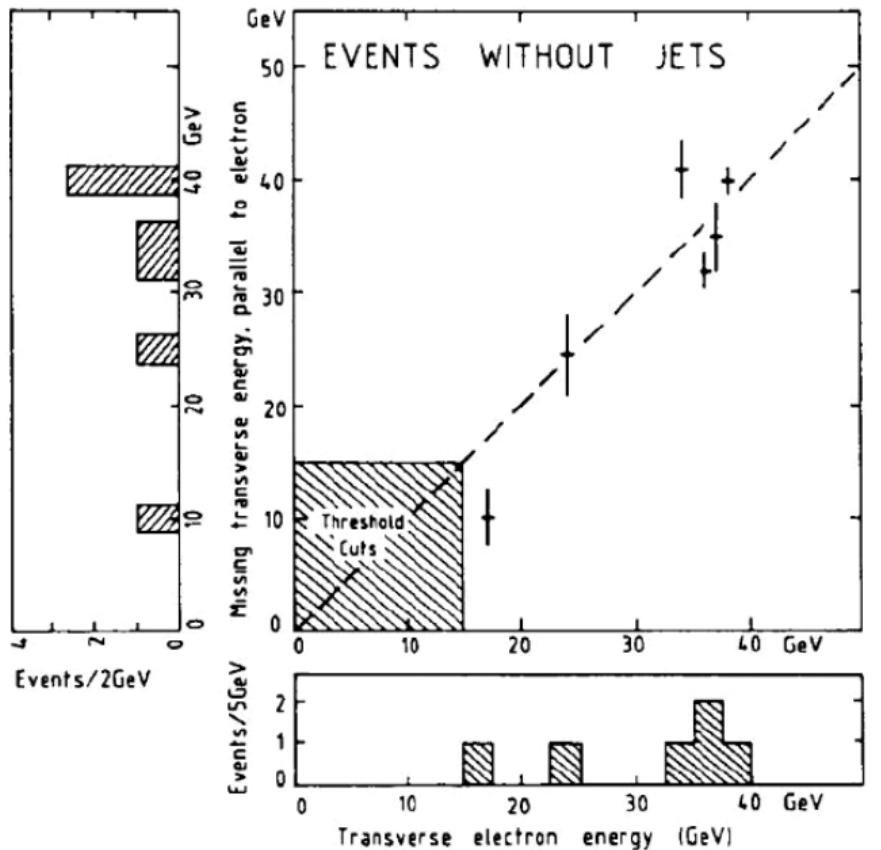
wobei über alle transversalen Impulsanteile in den Kalorimetern summiert wird

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

- Aufgetragen: Häufigkeit des Auftreten 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 [20]



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

**Abbildung:** Ergebnisse von UA1, Daten aus dem Jahr 1982 [20]

# DIE RESULTATE VON UA1 UND UA2

- **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: Carolo Rubbia, Simon van der Meer, Herwig Schopper (Director General), Erwin Gabathuler (Research Director), Pierre Darriulat.



**Abbildung:** Pressekonferenz am 25. Januar 1983 [7]

VIELEN DANK FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT!

# REFERENCES |



DIE ENTDECKUNG DES W- UND Z-BOSON.

<https://www.quantumdiaries.org/tag/majorana/>.

[Online; accessed 01-December-2018].



A VIEW INSIDE THE GARGAMELLE BUBBLE CHAMBER. TRAVAUX DE FINITION À L'INTÉRIEUR DU COPRS DE LA CHAMBRE DE GARGAMELLE.

Nov 1970.



PROPOSAL FOR A NEUTRINO EXPERIMENT IN GARGAMELLE.

TECHNICAL REPORT CERN-TCC-70-12, CERN, GENEVA, MAR 1970.



GARGAMELLE: FIRST NEUTRAL CURRENT. EN JUILLET 1973, UNE GRANDE DÉCOUVERTE EST ANNONCÉE DANS LE GRAND AMPHITHEÂTRE DU CERN : LE GROUPE GARGAMELLE A DÉTECTÉ LES COURANTS NEUTRES FAIBLES ! CETTE OBSERVATION CONFIRME LA THÉORIE ÉLECTROFAIBLE, QUI PRÉDIT QUE LA FORCE FAIBLE ET LA FORCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE DOIVENT FORMER UNE UNIQUE INTERACTION.

1973.



AT UA2.

No Comment, Feb 1980.



CARLO RUBBIA IN HIS OFFICE.

No Comment, Aug 1983.

## REFERENCES II



**DISCOVERY OF THE INTERMEDIATE W BOSON.**  
**JAN 1983.**



**SIMON VAN DER MEER IN THE AA CONTROL ROOM.**  
<BR>(19 SEP 2006, HERIBERT.KOZIOL@CERN.CH), JAN 1984.



**NOBEL LECTURES IN PHYSICS 1971-1980 (NOBEL LECTURES, INCLUDING PRESENTATION SPEECHES AND LAUREATE).**

**WORLD SCIENTIFIC PUB CO INC, 1991.**



**CERN.**

**SUPER PROTON SYNCHROTRON (SPS) - PROTONEN.**  
<http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=sps>.  
[Online; accessed 02-December-2018].



**ATLAS COLLABORATION.**  
**UA2 DETECTOR RELOCATED TO BUILDING 175.**  
Aug 2015.



**WIKIMEDIA COMMONS.**  
**FILE:CTEQ6 PARTON DISTRIBUTION FUNCTIONS.PNG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY, 2012.**  
[Online; accessed 2-December-2018].

## REFERENCES III



WIKIMEDIA COMMONS.

**FILE:ENRICO FERMI 1943-49.JPG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY, 2017.**  
[Online; accessed 1-December-2018].



WIKIMEDIA COMMONS.

**FILE:GARGAMELLE.JPG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY, 2018.**  
[Online; accessed 26-November-2018].



WIKIMEDIA COMMONS.

**FILE:NEUTRAL CURRENT, LEPTONIC EVENT, MUON NEUTRINO.PNG — WIKIMEDIA COMMONS, THE FREE MEDIA REPOSITORY, 2018.**

[Online; accessed 26-November-2018].



DELTA INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS.

**HISTORY OF DARK MATTER SYMPOSIUM.**

<https://www.youtube.com/watch?v=btKfJz8iZSE>, Jan 2015.



T. P. GORRINGE AND D. W. HERTZOG.

**PRECISION MUON PHYSICS.**

*Prog. Part. Nucl. Phys.*, 84:73–123, 2015.

## REFERENCES IV



DAVID J GRIFFITHS.

***INTRODUCTION TO ELEMENTARY PARTICLES; 2ND REV. VERSION.***

Physics textbook. Wiley, New York, NY, 2008.



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](http://www.science.tamu.edu/news/story.php?story_ID=798).

[Online; accessed 02-December-2018].



LUIGI DI LELLA AND CARLO RUBBIA.

***THE DISCOVERY OF THE W AND Z PARTICLES, PAGES 137–163.***



DONALD H. PERKINS.

***ELECTROWEAK INTERACTIONS AND THE STANDARD MODEL, PAGE 242275.***

Cambridge University Press, 4 edition, 2000.