

Die Entdeckung der Neutralen Ströme

Janina Nicolini

27. Juni 2019

Seminarvortrag Falsche Entdeckungen
Fakultät Physik

Übersicht

Theoretische Einführung

Gargamelle Experiment

HWPF-Kollaboration

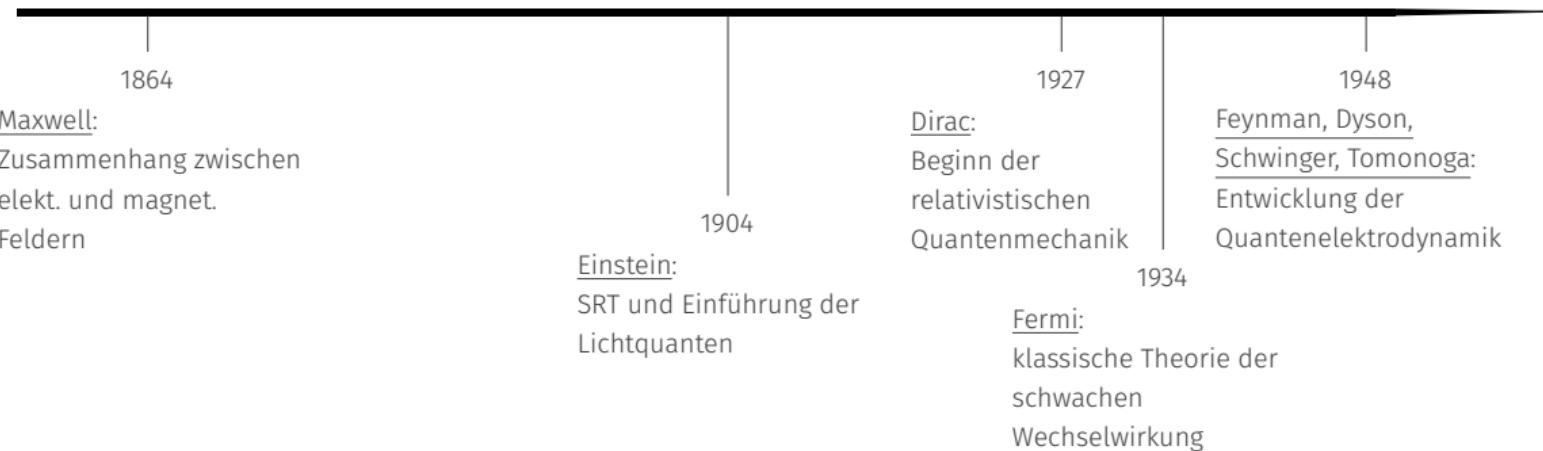
Folgeexperiment CDHS

Zusammenfassung

Die zeitliche Entwicklung der Quantenelektrodynamik

1855

1950



Die zeitliche Entwicklung der Quantenflavourdynamik

1932

1968

Fermi:
klassische
Theorie der
schwachen
Wechselwirkung

1937

Nedermeyer
Anderson:
Myonentdeckung in
Höhenstrahlung

1934

1948

1968

Feynman, Gell-Mann,
bzw. Marshal, Sudarshan:
VA-Struktur der
schwachen
Wechselwirkung

1956

Lee, Yung, Wu:
Vorhersage und Nachweis der
maximalen Paritätsverletzung

Glashow-Weinberg-
Salam-Modell:
elektroschwache
Vereinheitlichung

Die zeitliche Entwicklung der Quantenflavourdynamik

1967

1973

1968

Glashow-Weinberg-
Salam-Modell:
elektroschwache
Vereinheitlichung

1971

't Hooft:
Renormalisierung der
elektroschwachen
Vereinheitlichung

1970

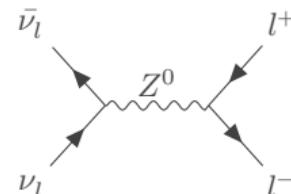
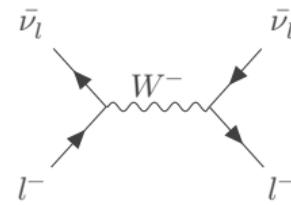
Glashow:
GIM-Mechanismus
→ Charme Quark

1973

CKM-Matrix
Paschos, Wolfenstein:
erste Berechnungen zu
experimentellen Auswirkungen

Weinberg-Salam-Modell

- Formulierung der schwache Wechselwirkung analog zur QED
 ⇒ massive Vektorbosonen für Renormalisierung
- **Idee:**
 1. vier Eichfelder: Singlett B und Triplet W_i ($i=1,2,3$)
 2. Einführung eines skalaren Potentials
 → Symmetriebruch: Entstehung von massereichen Z^0 , W^\pm und masselosen γ
 3. Weinberg Winkel θ_W beschreibt Mischung zwischen B und W_3
 $\cos(\theta_W) = \frac{m_W}{m_Z}$
 4. es muss neutrale Ströme (engl.: neutral currents, NC) geben
- Durchbruch durch 't Hoofts Beweis der Renormalisierung
- experimenteller Nachweis NC: Standardmodell mit Quantenfeldtheorien beschreiben



Die Physik der neutralen Ströme

- 1963: Cabibbo → schwache Eigenzustände \neq Masseneigenzuständen

$$\begin{pmatrix} u' \\ d' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ d \cos \theta_c + s \sin \theta_c \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow u\bar{u} + (d\bar{d} \cos^2 \theta_c + s\bar{s} \sin^2 \theta_c) + (s\bar{d} + d\bar{s}) \sin \theta_c \cos \theta_c$$

→ sowohl $\Delta S = 0$ NC als auch $\Delta S = 1$ FCNC sind erlaubt

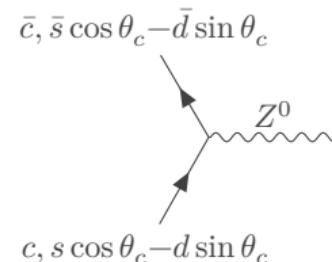
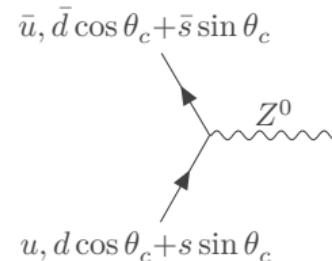
aber experimentell: $\frac{\Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+ + \nu + \bar{\nu})}{\Gamma(K^+ \rightarrow \pi^0 + \mu + \nu_\mu)} \leq 10^{-5}$ stark unterdrückt

- 1970: GIM-Mechanismus (Glashow, Iliopoulos, Maiani)

→ weiteres Quark **Charm c** zur Erklärung der Unterdrückung

$$\begin{pmatrix} c' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c \\ s \cos \theta_c - d \sin \theta_c \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow u\bar{u} + c\bar{c} + d\bar{d} + s\bar{s} \rightarrow \text{FCNC sind durch } Z^0 \text{ unterdrückt}$$



Gargamelle am CERN

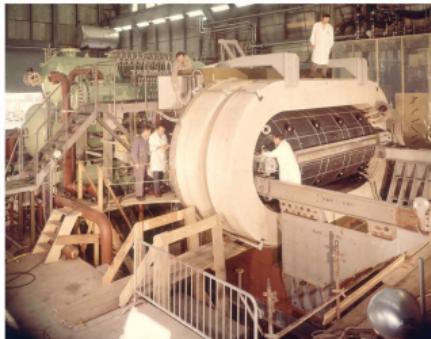


Abbildung: André Lagarrigue, der Vater von Gargamelle.

Motivation

- Suche nach dem W^\pm -Boson
- Untersuchung von tiefinelastischer Neutrinostreuung
(Parton Modell)
- Leptonenuniversalität
→ keine Suche nach NC



Abbildung: Simon van der Meer, der Erfinder des Magnethorns.

Gargamelle Experiment

Das Experiment

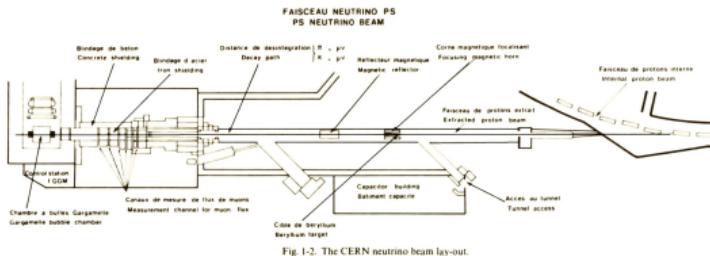
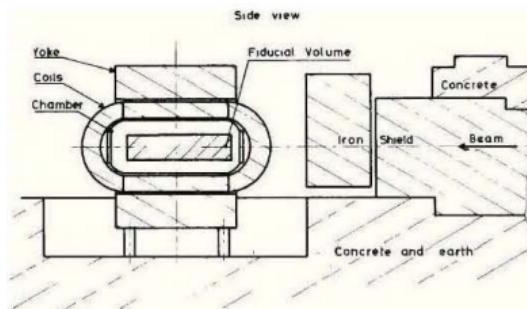


Fig. 1-2. The CERN neutrino beam lay-out.



Eckdaten Gargamelle Blasenkammer

- $\varnothing = 1.9\text{m}$, $L = 4.8\text{m}$
- Freon gefüllte Blasenkammer mit $V = 12\text{m}^3$
→ fiducial Volumen ca. $V_{fig} = 3\text{m}^3$
- Magnetfeld $B = 2\text{T}$, Wasserkühlung

Eckdaten Neutrino beam

- $\sqrt{s} = 26\text{GeV}$ Beam vom PS
- Beryllium Target ($L = 90\text{cm}$, $\varnothing = 5\text{mm}$)
- Magnethorn
- 70m Zerfallstunnel
- Eisenschild

Suche nach NC

ν stammen hauptsächlich aus $\left(\begin{array}{c} \pi \\ K \end{array} \right) \rightarrow \mu + \nu$
 $\Rightarrow \nu\text{-Fluss} \propto \mu\text{-Fluss}$

Programm

- W -Suche etc. dominiert das Physik Programm
- Beweis der Renormalisierung schafft erstes Interesse an NC
- **Aber:** gebremst durch den hohen Neutronen Untergrund (UG)
- verschiedene Theoretiker unter anderem Prof. **Paschos** begannen erste experimentelle Auswirkungen des Weinberg-Salam-Modells zu berechnen
→ lieferten 1973 Vorhersage, dass $R = \frac{NC}{CC}$ mindestens 18 % ist

Probleme

- großes Volumen notwendig zur Untersuchung des Neutronen UG
→ zu Beginn Maschinentest
- Wechselwirkung von Hadronen und Materie noch nahezu unerforscht
→ trotzdem begannen die ersten Untersuchungen zu NC's

Event Klassifizierung

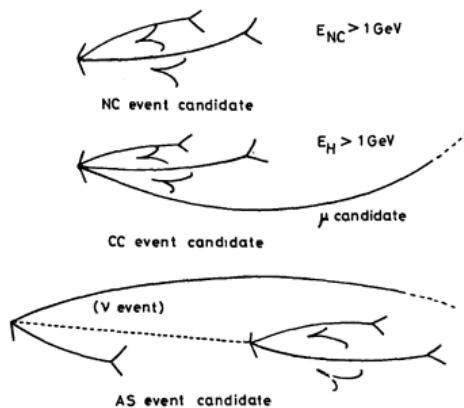


Abbildung: Schematische Darstellung der in der Blasenkammer sichtbaren Spuren für die drei Eventtypen. Es wird unterschieden zwischen neutralen Strömen NC, geladenen Strömen (engl.: charged current) CC und assoziierten Neutronenereignissen AS.

Problem

- Energiemessung: bei NC unbekannt, wie viel Energie das Neutrino davonträgt
→ **Lösung:** Verhältnis $R = \frac{NC}{CC}$ ist Energieunabhängig
- Hadronischer Zerfall von Neutronen
→ exponentielle Absorption komplett in der Blasenkammer ⇒ Verlauf studieren, Länge und Winkelverteilung ermöglichen eine Simulation zu erstellen
- Peak der Energieverteilung von NC Ereignisse und AS Ereignissen an unterschiedlichen Stellen ⇒ **Energie-Cutoff**

Das Bilderbuch-Ereignis

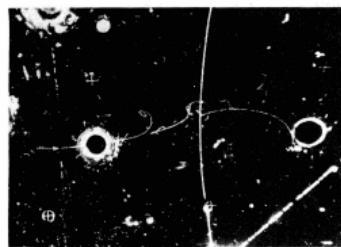
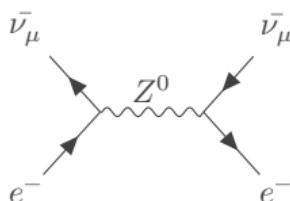


Abbildung: Das 1973 entdeckte erste
 $\bar{\nu}_\mu + e^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^-$ Ereignis.



$\Rightarrow 3\%$ Wahrscheinlichkeit, dass es kein NC Ereignis ist

- NC-Ereigniss mit Elektronneutrinos sind strahlnah ($< 5^\circ$)
- keine angrenzenden Ereignisse

Bilderbuch-Ereignis

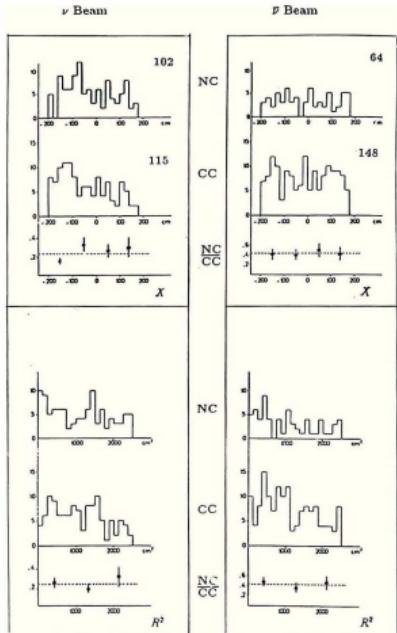
$$m_e = 385 \pm 100 \text{ MeV}$$

Abstand zum Neutrino beam $1.4^{+1.6^\circ}_{-1.4^\circ}$

Untergrundabschätzung

- 1) $\nu_e + n \rightarrow e^- (\nu_e < 5^\circ) + p$
 \rightarrow empirische Lösung: 0.03 ± 0.02 Ereignisse
- 2) Compton-Elektronen und asymmetrische Elektronpaare
 $\rightarrow 0.04 \pm 0.02$ Ereignisse

Signal und Untergrund



→ sowohl die longitudinale als auch radiale Verteilung deuten auf die Existenz von NC hin ⇒ genaue Untersuchung der Untergründe Untergründe

- Teilchen die mit dem Beam in die Kammer gelangen und dort wechselwirken
- Neutronen und Kaonen, die von außen eindringen
- Kosmische Strahlung
- Myonen, die in Flüssigkeit stoppen
- K_L^0 deren Wechselwirkung eventuell durch Regenerationseffekte größer ist
- und weitere

Neutronenuntergrund

→ zwei verschiedene Arten von Neutronenereignissen

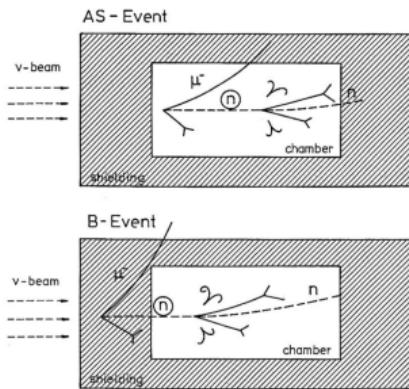


Abbildung: Neutronenereignisse, die fälschlicher Weise als NC identifiziert werden.

$$N_{\text{ges}} = B + AS$$

$$\frac{B}{AS} = \frac{1}{\langle 1 - \exp\left(\frac{-L}{\lambda}\right) \rangle - 1}$$

$L \hat{=} \text{Abstand zum Ende des Downstreams}$
 $\lambda \hat{=} \text{gem., charakteristische Wechselwirkungslänge}$
somit lässt sich N bestimmen
⇒ nur ca. 20 % der NC stammen aus Neutronen-UG

Finale Auswahlkriterien und Ergebnisse

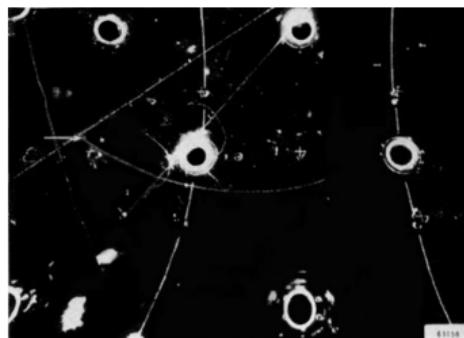


Abbildung: Blasenkammer Foto eines Neutralen-Strom-Ereignisses. Der Pfeil kennzeichnet den elastischen Stoß des nicht sichtbaren Neutrinos mit einem Quark. Daraus entsteht ein nach rechtsläufiger Hadronenschauer.

Auswahlkriterien

- hohe E-Cuts ca. 1 GeV
- mögliche geladene Ereignisse, die keine Myonen sein könnten, werden verworfen
- analog für kosmische Strahlung
- Teilchen, die eventuell mit dem Beam eintreffen, werden verworfen
- "μ-kink"-Ereignisse werden verworfen (plötzlich verschwundene Myonspur)
→ Hinweis auf Pion oder Proton

Ergebnisse

- ν -Beam: $R = 0.21 \pm 0.03$
- $\bar{\nu}$ -Beam: $R = 0.43 \pm 0.09$
- gemischter Beam: $R = 0.28 \pm 0.03$
→ NC existieren
- Weinberg-Theorie:
 $0.3 \leq \sin^2 \theta_W \leq 0.4$

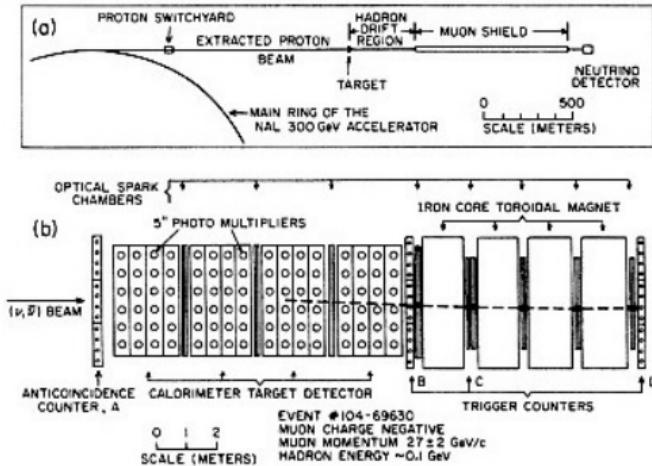
Die HWPF-Kollaboration

- am Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab): Neutrinoexperiment E1A
- Ende 1969 haben sich Hann, Cline und Rubbia für phys. Programm zusammengetan
→ daher HWPF-Kollaboration (**H**arvard-**W**isconsin-**P**ennsylvania-**F**ermilab)

1. W-Suche + Untersuchung des Parton Modells
2. Suche nach Punkt-WW $\nu_\mu + Z \rightarrow \nu_\mu + \mu^+ + \mu^+ + Z$
3. Messung von $\frac{d^2\sigma}{d(q^2)d(E_\nu-E_h)}$ und $\sigma(\nu_\mu + p \rightarrow \mu^+ + X)$

- **keine** NC, somit Detektordesign darauf nicht optimiert

E1A-Experiment



- 4 Targetmodule aus Mineralölszintillatoren
- 4 wide gap optische Funkenkammern
- 4 Toroidmagneten
- 4 narrow gap optische Funkenkammern
- 3 Triggerzähler
- 1 Antizähler
- gemischter Beam

Vorteile:

- E_ν -Bestimmung durch Energie im Kalorimeter + Myon-Energie im Spektrometer
- Faktor 100 in der Rate (100 t Target statt 10 t, $E_\nu = 20$ GeV statt 2 GeV)
- aktive Funkenkammern → keine ungesiehenen Neutronenereignisse

Probleme am E1A

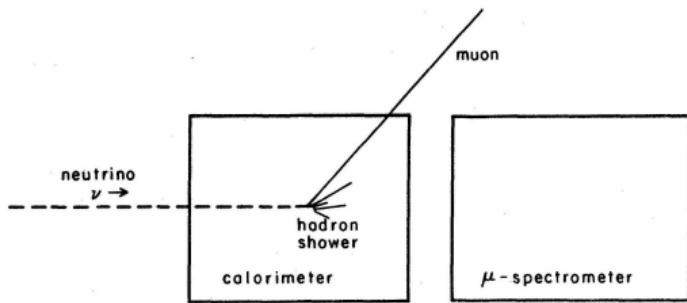
- nicht auf NC-Suche ausgelegt: Trigger löst nur bei Event mit Myon aus
 - ⇒ Neuer Trigger: gewisse E-Schwelle im Kalorimeter übertreten oder Signal in der Myonkammer
- sofort gab es Events auch ohne Myon
 - fühlte sich unnatürlich an

Zitat Mann (1980)

"You can say, well, we came to the conclusion immediately that we had seen weak neutral currents. But you'd be surprised, that was the last conclusion, we came to take and that we were making some mistake and that these muons were somehow escaping the apparatus or being missed by us in some way and that no effect of that magnitude could exist."

⇒ GIM-Mechanismus nahezu unbekannt + Ergebnis im Widerspruch zu bisherigen Messungen

Lösungsstrategien Myonenproblem



Lösungsidee: MC-Simulation (Parton Modell)
⇒ Verlustrate für Myonen

$$\begin{aligned}R(300 \text{ GeV}) &= 0,42 \pm 0.08 \\R(400 \text{ GeV}) &= 0,20 \pm 0.09 \\R(\text{komb.}) &= 0,29 \pm 0.09\end{aligned}$$

Abbildung: Endkommendes Myon

Am 03.08.1973 eingereicht, aber erst am 08.04.1974 veröffentlicht

- ebenfalls vereinbar mit Weinberg-Theorie, Rubbia 6σ , dass es nicht statistische Fluktuation ist.
- **ABER:** Vertrauen Daten nicht!
 - Lösung: **Verbesserung des Detektors**

Umbau des Experiments

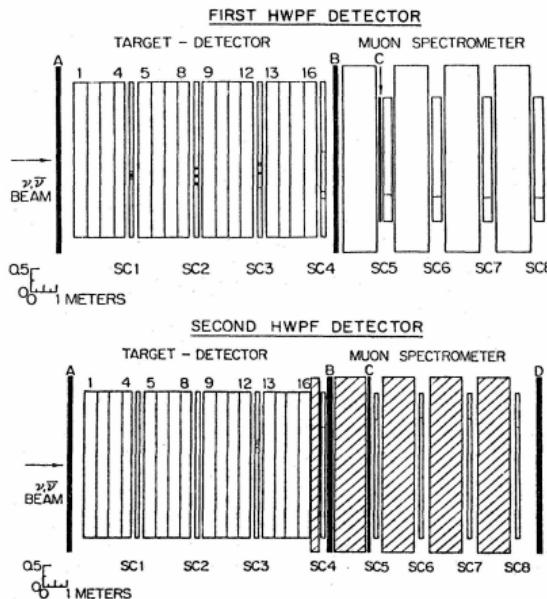


Abbildung: Escaping Muon

- Mitte September 1973 abgeschlossen
- die vierte Funkenkammer wurde vergrößert
⇒ größeren Winkelbereich abdecken
- um nah genug am Kalorimeter zu sein, musste Eisenschild schmäler werden
- 13 inch dicke Eisenplatte vor der 4. Funkenkammer, um Hadronen aufzufangen
- die anderen Eisenplatten bleiben bei 4 feet Dicke

Problem des Punchthrough

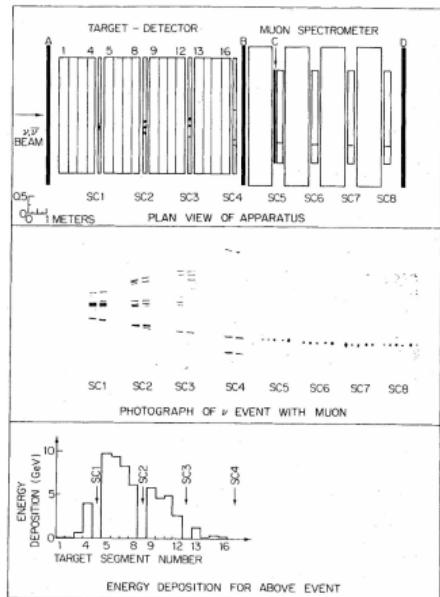


Abbildung: Myon-Ereignis in dem ursprünglichen Detektor.

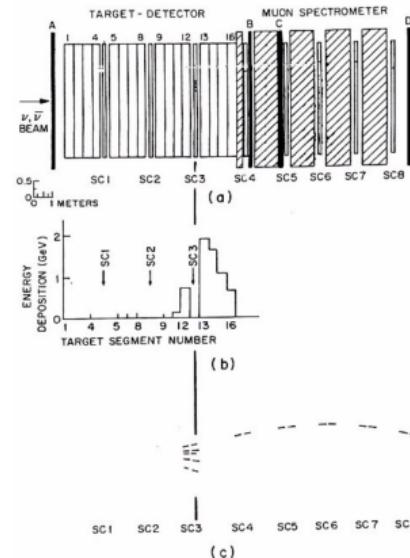


Abbildung: Punchthrough-Ereignis in dem weiterentwickelten Detektor.

Problem des Punchthrough

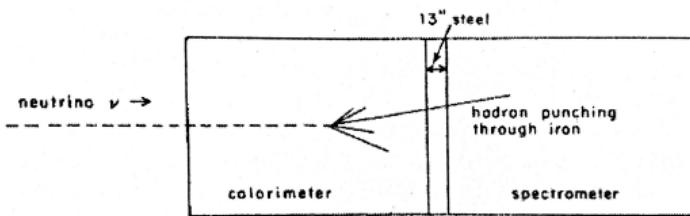


Abbildung: Hadronischer Punchthrough durch das Eisenschild in die Myonkammern.

Zitat Cline 28.09.1973

"The new iron placed behind the calorimeter is very effective in reducing the hadron penetration to ... [spark chamber 4]. Some small number of events do show penetration, but the fraction is very likely less than 20 %. ... More study of the data is needed to make this a reliable conclusion."

→ Berechnungen Punchthrough $\approx 13\%$ \Rightarrow eigentlich doppelt so groß

Problem nicht erkannt, weil:

1. im ersten Experiment nicht aufgetreten
2. hadr. WW mit Eisen war unbekannt (nicht vermessen)
3. E-Verteilung von π nicht genau bekannt
4. Druck zu veröffentlichen

Ergebnisse des neuen Detektors

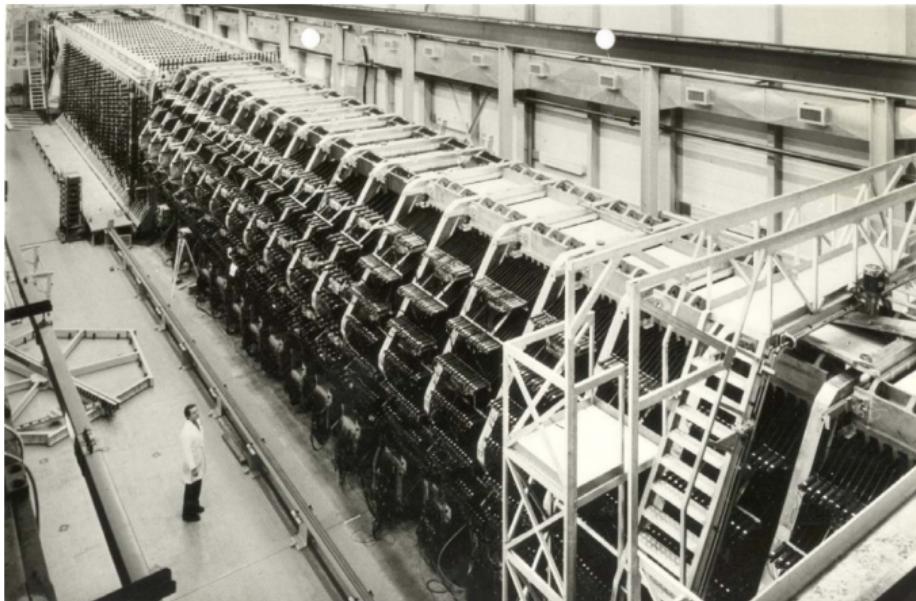
- November 1973: $R = 0.02^{+0.05}_{-0.03} \Rightarrow$ keine Messung zu Punchthrough
- Brief an Lagarrique, nie abgesendet, aber durch **Rubbia** trotzdem übergeben
- Sulak setzt sich für die Untersuchung des Punchthroughs ein

Zwei grundlegende Möglichkeiten

1. # events mit mehreren Tracks nach Eisenplatte
 - # events mit einem Track nach Eisenplatte
 - Problematisch: Tracks nicht immer gut dargestellt
 - die zwei Kameras ($x[y]$ -Ebene) haben unterschiedliche Ergebnisse
 2. # „NC“-Ereignisse als Funktion der longitudinalen Distanz entlang der Maschine plotten
 - Plot hat rapiden Abfall
 - aber #(CC + NC)-Ereignisse blieb konstant
- Sulak lässt Interpretation der Ergebnisse offen, Ford und Mann haben diese nicht als Beweis für Punchthrough gewertet
 - Am Ende (etwa um Dez. '73): noch einmal NC events untersucht, von 20 haben 5 keine Hinweise auf Myonen mit hohem Winkel gehabt
 - keine MC notwendig
 - ⇒ am Ende doch mit urspr. Veröffentlichung

CDHS-Detektor

Experiment der Cern-Dortmund-Heidelberg-Saclay Kolloboration



Konzeptidee: 1973

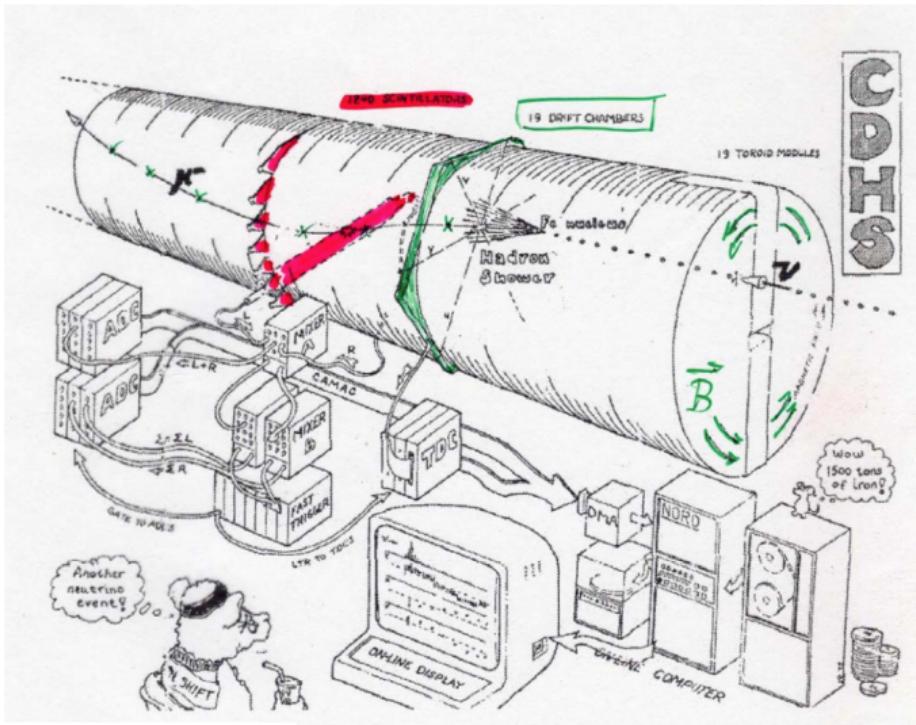
Laufzeit: 1976-1984

**designed zur Untersuchung von tiefinelastischer
Streuung von Neutrinos in Eisen**

→ damit präzise Bestimmung von $R = \frac{NC}{CC}$, engere
Einschränkung des Weinberg-Winkel

→ Untersuchung der high- y Anomaly in den
HWPF-Messungen (veröff. 21.06.1976)

CDHS-Funktionsweise

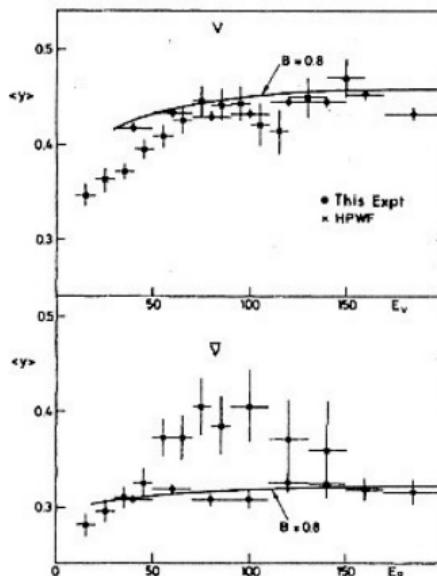
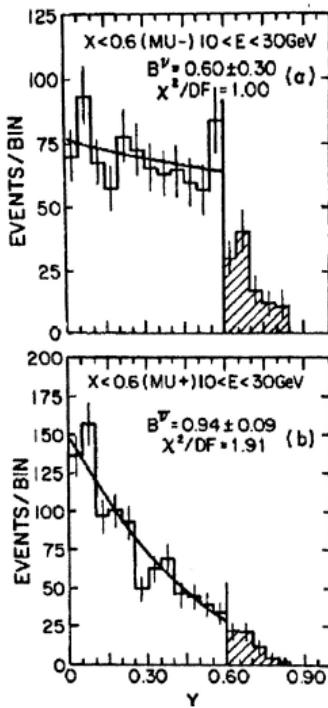


Aufbau

- Dimensionen: $L = 20 \text{ m}$, $m_{ges} \approx 1250 \text{ t}$
- 20 magnetisierte Eisenmodule aus
 - 1) Interaction Target
 - 2) Kalorimeter
 - 3) Myon-Spektrometer
- zwischen den Modulen Driftkammern zur Spurrekonstruktion

Folgeexperiment CDHS

Existiert eine high-y Anomaly?



$$\text{nach Bjorken gilt: } y = \frac{(E_{\bar{\nu}} - E_\mu)}{E_{\bar{\nu}}}$$

Bei HWPF: Parton Modell für ν kompatibel, für $\bar{\nu}$ aber nicht

⇒ Ladungssymmetrie und Skaleninvarianz ist verletzt

→ **Lösungsidee:** neue Teilchenproduktion bei $\bar{\nu}$ ⇒ am CERN wurde diese These mit Hilfe des CDHS-Detektors widerlegt

Zusammenfassung der Probleme

- Druck zu Publizieren/ etwas zu Entdecken
- zu wenige statistische Untersuchungen → Untergang + Maschinenkenntnisse
- Detektor nicht für Suche geeignet
→ μ unter zu großem Winkel abgestrahlt
- Wechselwirkung zwischen Hadronen und Eisen nur hinreichend bekannt → Detektorupdate führte zu Punchthrough + diesen unterschätzt
- zu wenig Wissen über Monte Carlos → den Ergebnissen dieser wurde nicht vertraut
- MCs wurden an die Daten angepasst, statt theoretisches Parton Modell zu verwenden

Fazit

Wissenschaftliches Fehlverhalten, da Ergebnisse nicht ausreichend hinterfragt wurden und absichtlich die statistischen Untersuchungen nur ausreichend durchgeführt wurden, um schneller publizieren zu können.

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!
Gibt es noch Fragen?

Literatur I

-  Ernest S. Abers und Benjamin W. Lee. „7. The Weinberg-Salam model“. In: *Physics Reports* 9.1 (1973), S. 40–44. ISSN: 0370-1573. DOI: [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(73\)90035-5](https://doi.org/10.1016/0370-1573(73)90035-5).
-  A. C. Benvenuti u.a. „Further Data on the High Y Anomaly in Inelastic anti-neutrino Scattering“. In: *Phys. Rev. Lett.* 36 (1976), S. 1478. DOI: [10.1103/PhysRevLett.36.1478](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.1478).
-  A. Benvenuti u.a. „Observation of Muonless Neutrino Induced Inelastic Interactions“. In: *Phys. Rev. Lett.* 32 (1974), [5.19(1974)], S. 800–803. DOI: [10.1103/PhysRevLett.32.800](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.32.800).
-  A Benvenuti u.a. „Early Observation of Neutrino and Antineutrino Events at High Energies“. In: *Physical Review Letters - PHYS REV LETT* 30 (Mai 1973), S. 1084–1087. DOI: [10.1103/PhysRevLett.30.1084](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.30.1084).
-  Peter Galison. „How the first neutral-current experiments ended“. In: *Rev. Mod. Phys.* 55 (2 Apr. 1983), S. 477–509. DOI: [10.1103/RevModPhys.55.477](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.55.477).
-  S. L. Glashow, J. Iliopoulos und L. Maiani. „Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry“. In: *Phys. Rev. D2* (1970), S. 1285–1292. DOI: [10.1103/PhysRevD.2.1285](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.2.1285).
-  F. J. Hasert u.a. „Observation of Neutrino Like Interactions Without Muon Or Electron in the Gargamelle Neutrino Experiment“. In: *Phys. Lett.* B46 (1973). [5.15(1973)], S. 138–140. DOI: [10.1016/0370-2693\(73\)90499-1](https://doi.org/10.1016/0370-2693(73)90499-1).

Literatur II



F.J. Hasert u.a. „Search for elastic muon-neutrino electron scattering“. In: Physics Letters B 46.1 (1973), S. 121–124. ISSN: 0370-2693. DOI: [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(73\)90494-2](https://doi.org/10.1016/0370-2693(73)90494-2).



M. Holder u.a. „Is There a High Y Anomaly in anti-neutrino Interactions?“ In: Phys. Rev. Lett. 39 (1977), S. 433. DOI: [10.1103/PhysRevLett.39.433](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.39.433).



M. Holder u.a. „A detector for high-energy neutrino interactions“. In: Nuclear Instruments and Methods 148.2 (1978), S. 235–249. ISSN: 0029-554X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(70\)90173-4](https://doi.org/10.1016/0029-554X(70)90173-4).