

08.01.2016



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386

Entdeckung der Neutralen Ströme

Alexander Müller



[1]

Inhaltsverzeichnis



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386

1. Grundlagen und damaliges Wissen

2. Das Gargamelle Neutrino Experiment

3. Kritik und heutiges Wissen



1. Grundlagen und damaliges Wissen

1. Beobachtungen zur schwachen Wechselwirkung
2. Geladene Austauschteilchen und erlaubte Vertices
3. Elektroschwache Theorie und deren Vorhersagen

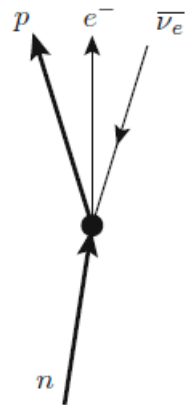
2. Das Gargamelle Neutrino Experiment

3. Kritik und heutiges Wissen



1.1. Beobachtungen zur schwachen Wechselwirkung

- Betazerfall:
 - Hypothese eines neuen Teilchens, dem Neutrino (Pauli 1930)
 - Erste theoretische Beschreibung des Betazerfalls durch Fermi (1934)
 - **Punktförmige Wechselwirkung**



Beta-Zerfall [2]

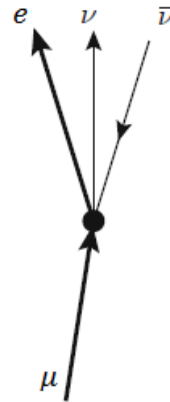


Elektroneneinfang [2]



1.1. Beobachtungen zur schwachen Wechselwirkung

- Myon-Zerfall
 - $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
 - Entdeckung des Myons 1938 (Anderson)
 - Entdeckung des Myonneutrinos 1962 (Lederman, Schwarz, Steinberger)



Myon-Zerfall [v.]



1.1. Beobachtungen zur schwachen Wechselwirkung

- Aus den Beobachtungen folgt:
 - Sowohl Leptonen als auch Quarks wechselwirken schwach
 - Anders als bei der elektromagnetischen Wechselwirkung ändert sich die Ladung der beteiligten Teilchen
 - Reichweite sehr kurz, falls nicht punktförmig
 - Neutrinos haben sehr kleine Masse

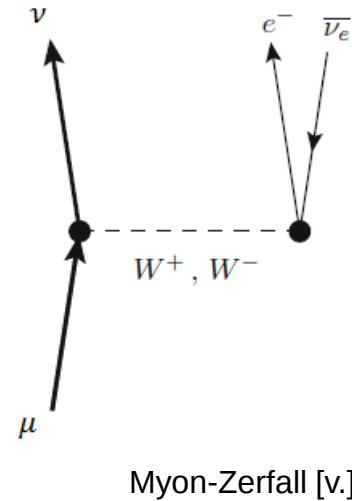
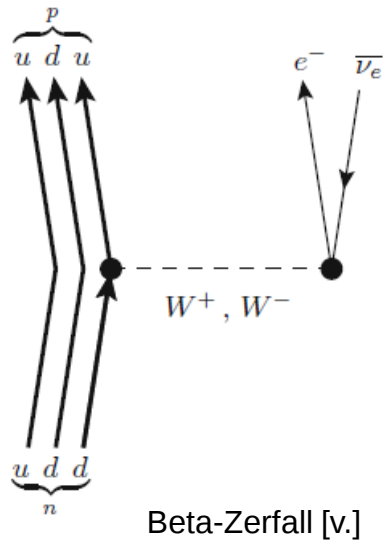


1.2. Geladene Austauschteilchen und erlaubte Vertices

- Es wurde auch bei der schwachen Wechselwirkung über mögliche Austauschteilchen spekuliert
 - Es war bekannt, dass eine **Feldtheorie ohne Austauschteilchen nicht renormierbar** ist
 - Die QED mit dem Austauschteilchen Photon ist auch renormierbar und zeigte große Erfolge
- Eigenschaften der Austauschteilchen:
 - Vermutlich Massebehaftet
 - Spin = 1
 - Geladen



1.2. Geladene Austauschteilchen und erlaubte Vertices





1.3. Elektroschwache Theorie und deren Vorhersagen

- Eine Quantenfeldtheorie in den 60ern entwickelt von Glashow, Salam und Weinberg (Nobelpreis 1979)
- 1961: Glashow versucht die verschiedenen Wechselwirkungen zu vereinigen
 - Aus seinen Gleichungen erhält er das schwache Isospin-Triplet $W^{\pm,0}$ sowie ein weiteres Boson B
 - Er nimmt an, dass sich B und W^0 zu γ und Z^0 überlagern
- 1967: Higgsmechanismus wird in die Gleichungen eingefügt
 - Resultat: 4 Austauschbosonen, eins masselos
- 1971: t'Hooft zeigt die Renormierbarkeit der Feldtheorie



1.3. Elektroschwache Theorie und deren Vorhersagen

- Die 4 Eichbosonen: $W^{\pm,0}, B$
 - W^+ und W^- sind die geladenen Wechselwirkungsteilchen
 - W^0 und B sind nicht beobachtbar, jedoch die orthogonalen Überlagerungen

$$\begin{aligned}\gamma &= W^0 \sin \theta_W + B \cos \theta_W \\ Z^0 &= W^0 \cos \theta_W - B \sin \theta_W\end{aligned}$$

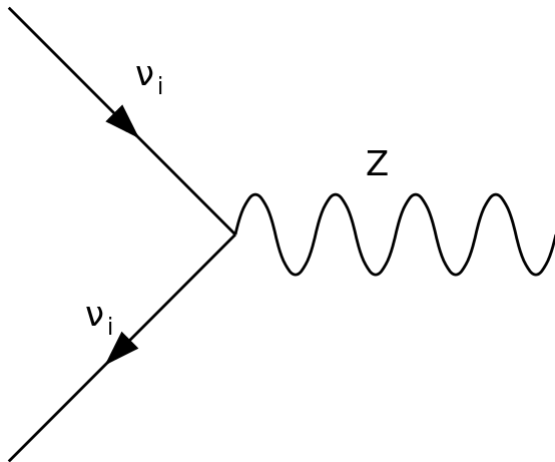
θ_W : *Weinbergwinkel*

- Als Neutraler Strom wird der durch das Z^0 vermittelte Prozess bezeichnet

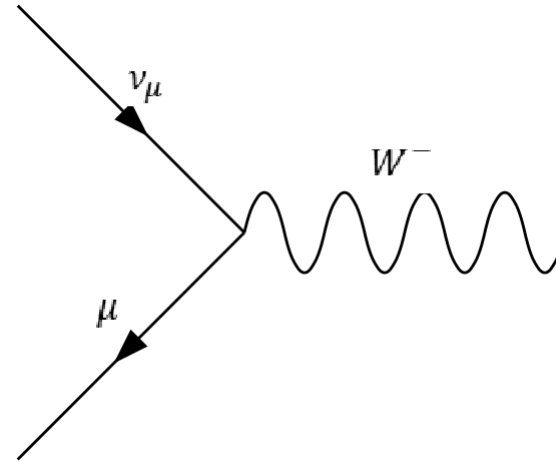


1.3. Elektroschwache Theorie und deren Vorhersagen

- Im Gegensatz zu γ koppelt Z^0 auch an elektrisch ungeladene Teilchen
- Prozesse wie elastische Neutrinostreuung werden möglich



Vertex Neutrinostreuung [2]



Vertex Neutrinoumwandlung [2]



1. Grundlagen und damaliges Wissen

2. Das Gargamelle Neutrino Experiment

1. Geschichte der Gargamelle Bubble Chamber
2. Aufbau des Experiments
3. Beobachtung der elastischen Neutrino Streuung
4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen

3. Kritik und heutiges Wissen



2.1. Geschichte der Gargamelle Bubble Chamber

- 1963: Planung von Gargamelle als große Blasenkommer für schwere Flüssigkeiten
- 1968: Erstellung einer Prioritätenliste

Table 25.1. *Priority list for Gargamelle neutrino experiment, Milan collaboration meeting, November 1968*

-
-
1. $W^\pm$ search.
 2. Deep inelastic scattering, scaling.
 3. Current algebra sum rules, CVC, PCAC.
 4. Diagonal Model.
 5. $\Delta S = 1$ processes, inverse hyperon decay $\bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \Lambda + \mu^+$
 6. Inverse muon decay, $\nu_\mu + e^- \rightarrow \mu^- + \nu_e$.
 7. Electron-muon universality, $\sigma(\nu_e)/\sigma(\nu_\mu)$
 8. Neutral current search.
 9. Form factors in exclusive reactions.
 10. Search for heavy leptons.
-
-

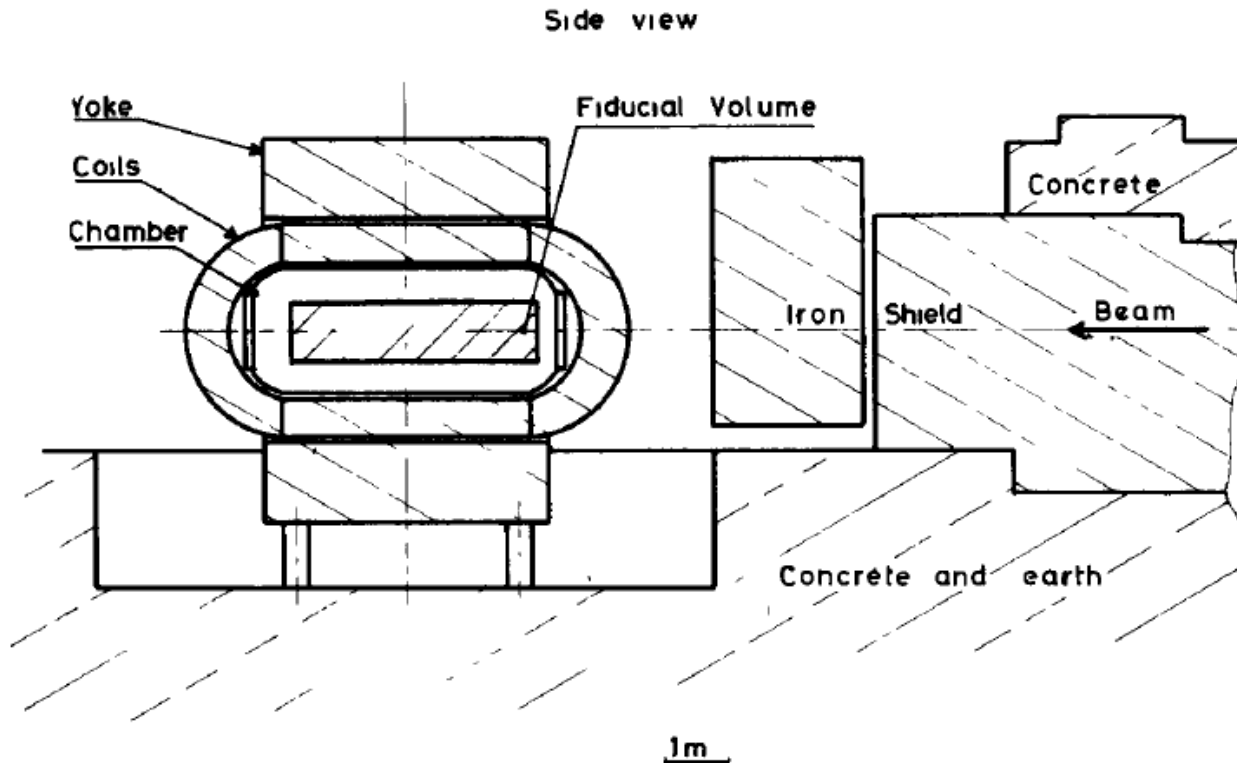
Prioritätenliste Gargamelle [v.]



2.1. Geschichte der Gargamelle Bubble Chamber

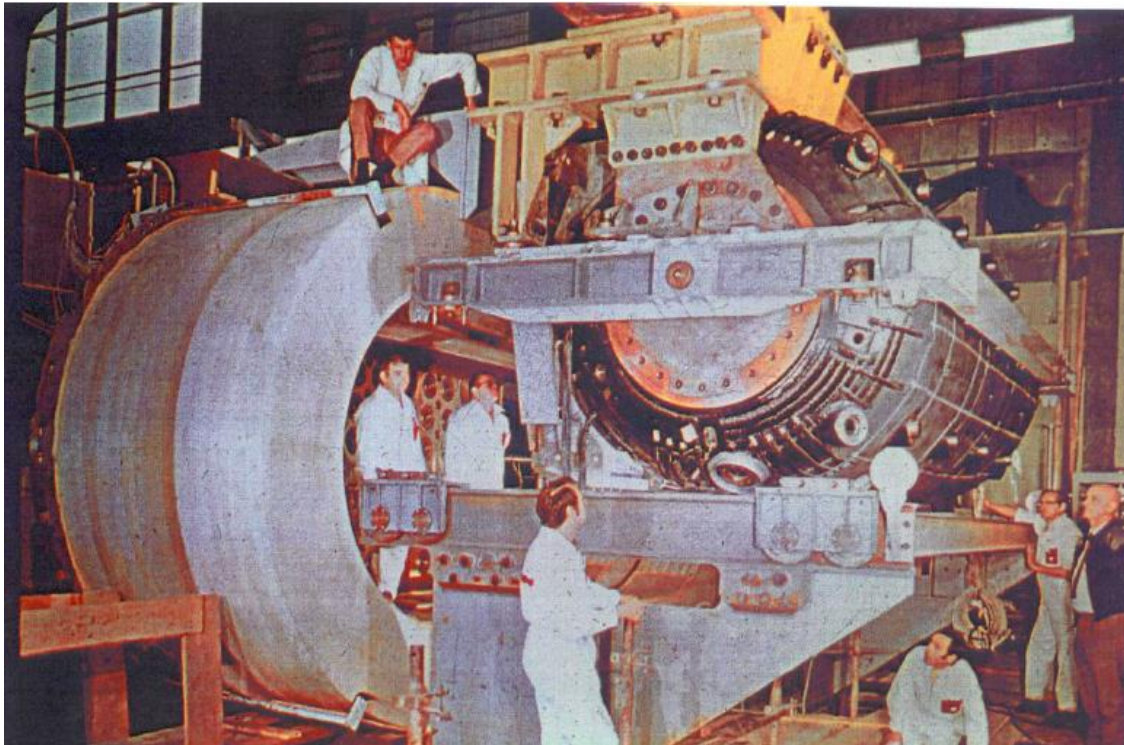
- 1970: Die Blasenkammer wurde fertig zusammengesetzt. Entworfen wurde sie von André Lagarrigue
- 1971: Beginn der ersten Experimente
- 1973: Entdeckung der neutralen Ströme
- 1978: Stilllegung nach großem Riss in der Kammer
- Technische Daten der Gargamelle Bubble Chamber:
 - Länge: 4.5m, Durchmesser: 1.92m
 - Messvolumen bis 11m³
 - Magnetfeld: 2.1T
 - Freon CF_3Br (Dichte: $1.5 * 10^3 \text{ kg/m}^3$, $X_0 = 11\text{cm}$, $\lambda_{Had} = 78\text{cm}$)

2.1. Geschichte der Gargamelle Bubble Chamber



Gargamelle: technischer Aufbau [ii.]

2.1. Geschichte der Gargamelle Bubble Chamber



Gargamelle Einbau [3]



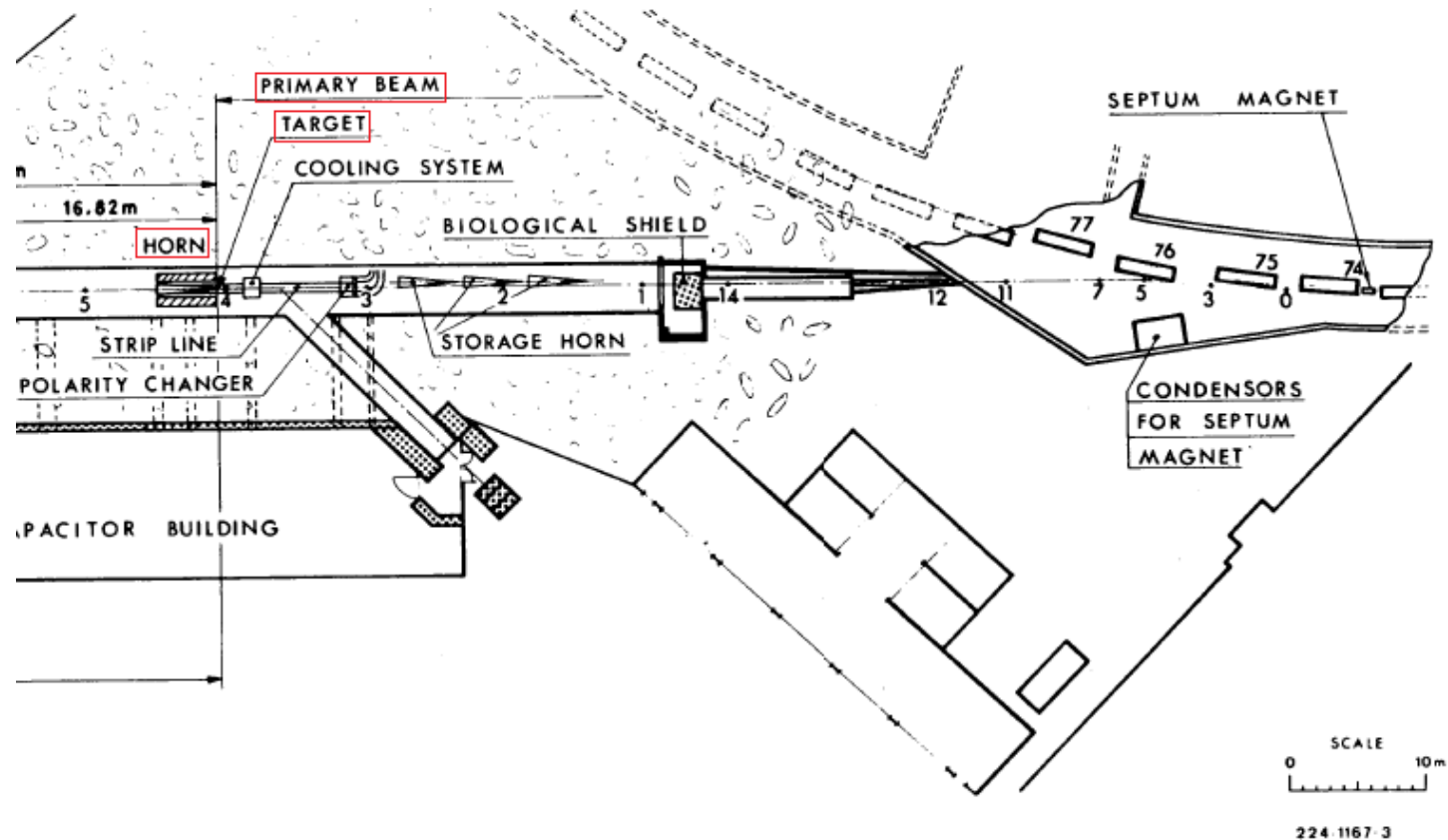
2.1. Geschichte der Gargamelle Bubble Chamber



Gargamelle heute [4]



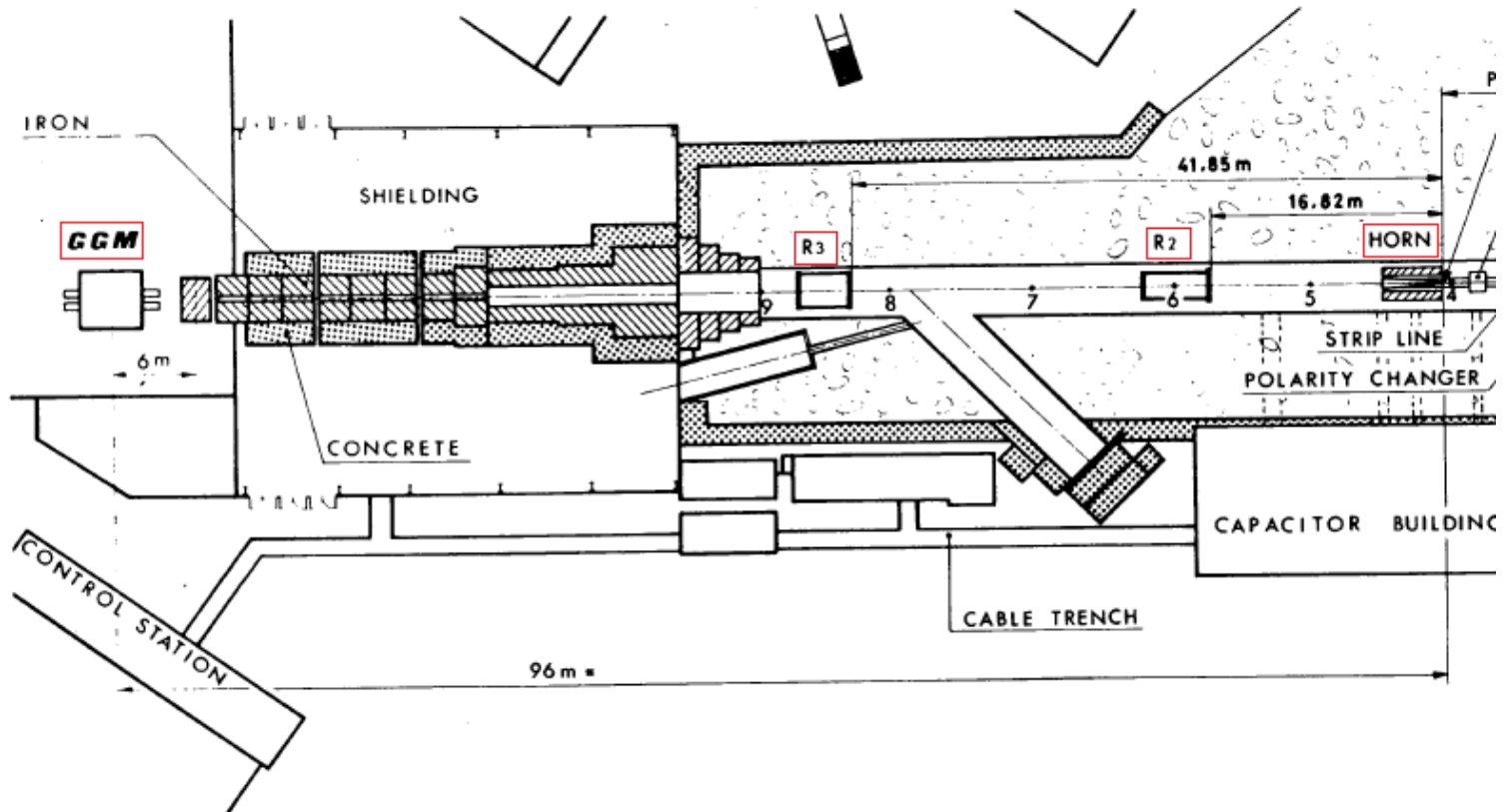
2.2. Aufbau des Experiments



Aufbau des Experiments 1 [vi.]



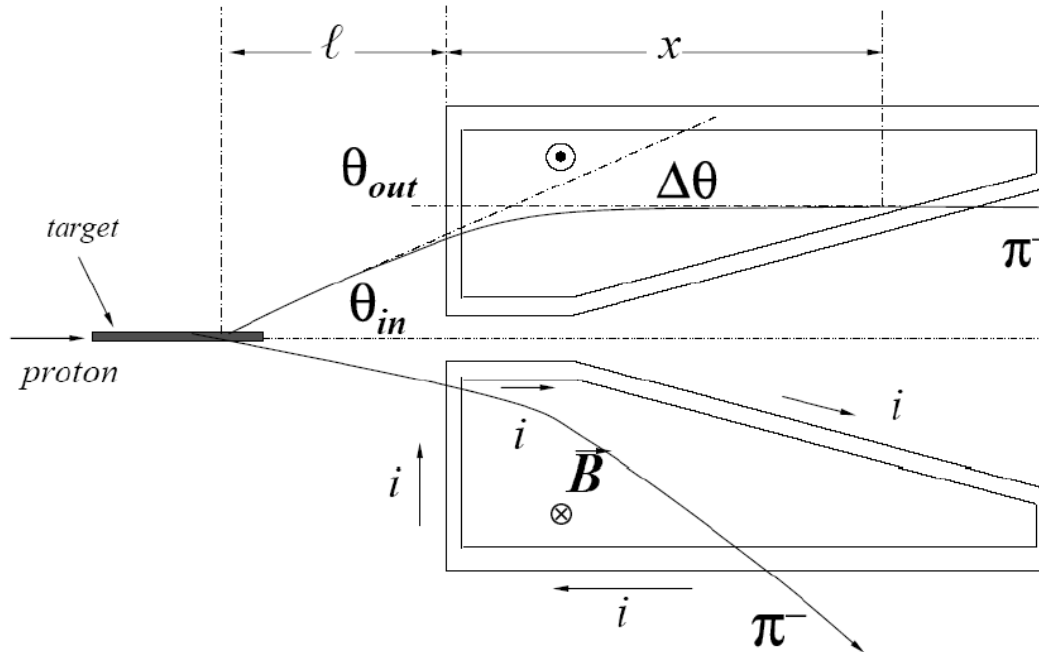
2.2. Aufbau des Experiments



Aufbau des Experiments 2 [vi.]



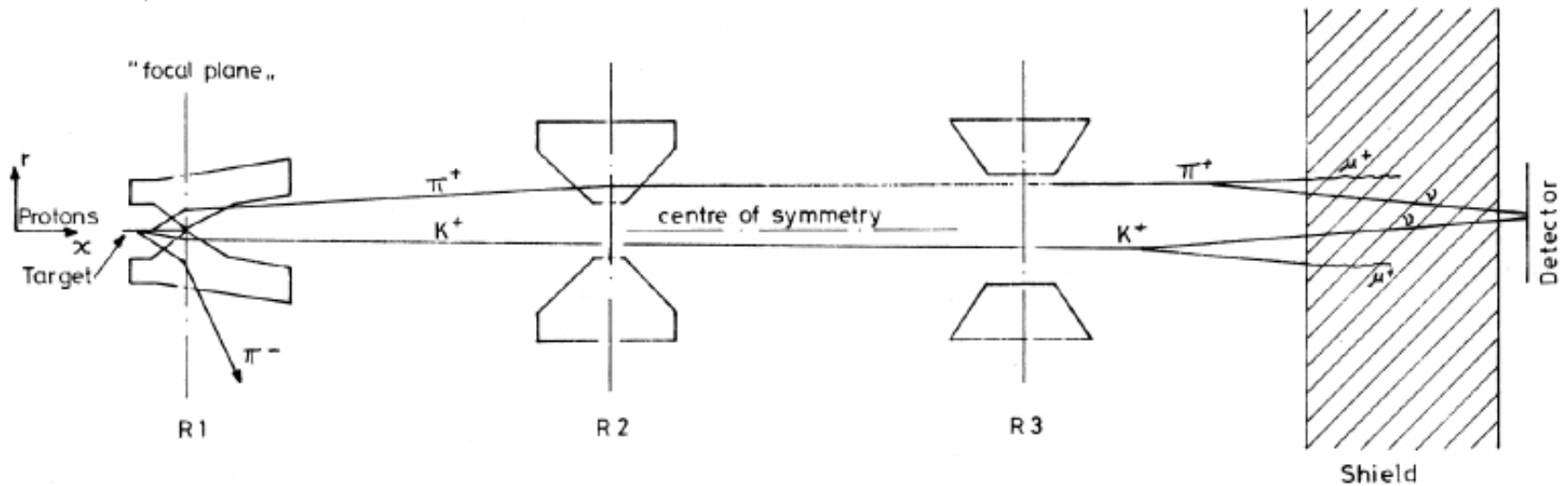
2.2. Aufbau des Experiments



Funktionsweise Magnetic Horn [xi.]



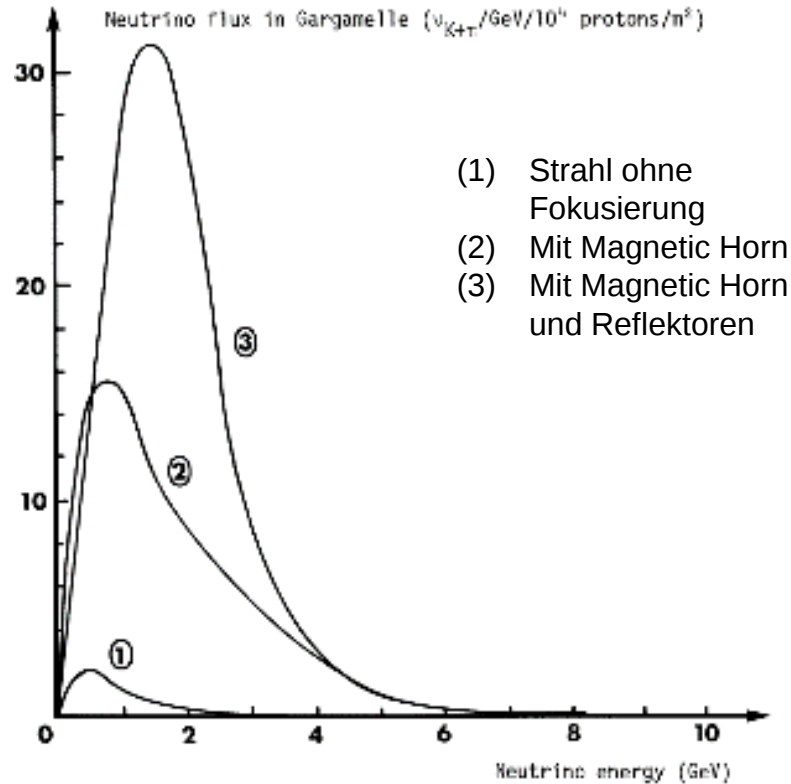
2.2. Aufbau des Experiments



Magnetic Horn und Reflektoren [xi.]



2.2. Aufbau des Experiments



Verbesserungen des Neutrinoflusses [vi.]



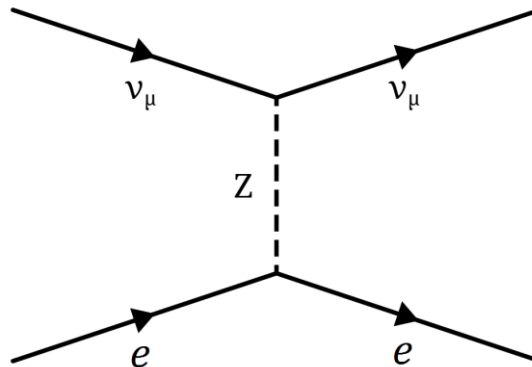
2.2. Aufbau des Experiments

- Beim Stoß auf das Target entstehen Kaonen und Pionen, die u.a. in Myonenneutrinos zerfallen
- $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (64%) und $\pi^+ + \pi^0$ (21%)
 - Es gibt auch einen kleinen Anteil bei dem Positronen und Elektronenneutrinos entstehen
- $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
 - Ein Zerfall in eine Positron ist aus Helizitätsgründen stark unterdrückt
- Die selben Formeln gelten für die Antiteilchen



2.3. Beobachtung der elastischen Neutrino Streuung

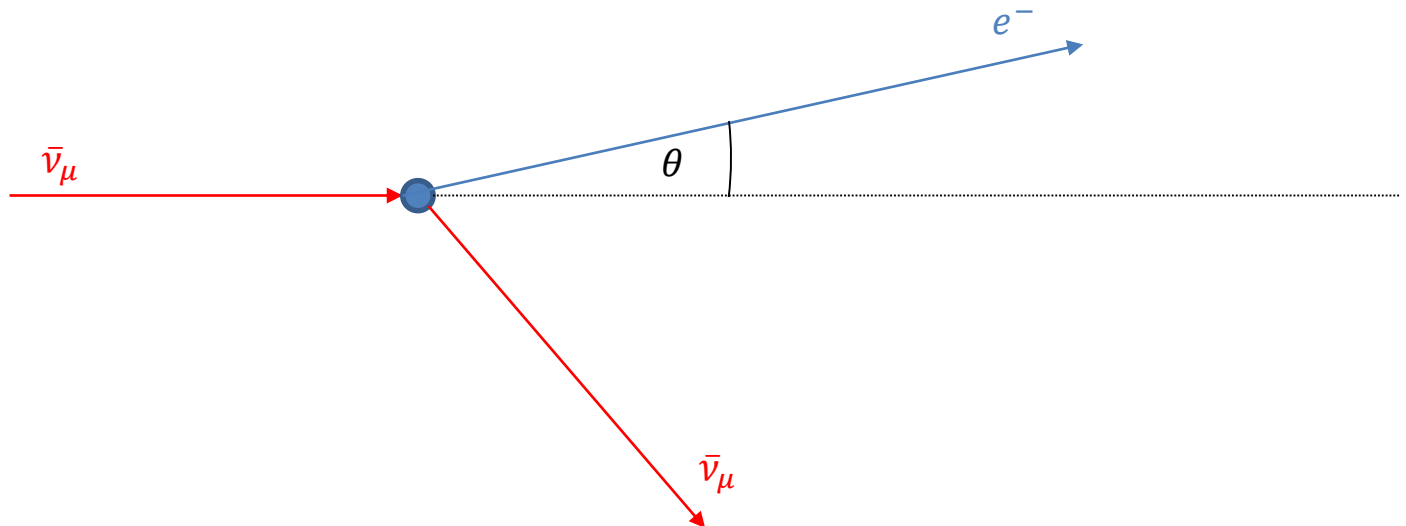
- Die Myonneutrinos können sowohl mit den Atomkernen als auch mit den Elektronen reagieren.
- Die Reaktion mit einem Elektronen hat sehr geringen Wirkungsquerschnitt



Streuung eines Myonneutrinos am Elektron [5]



2.3. Beobachtung der elastischen Neutrino Streuung



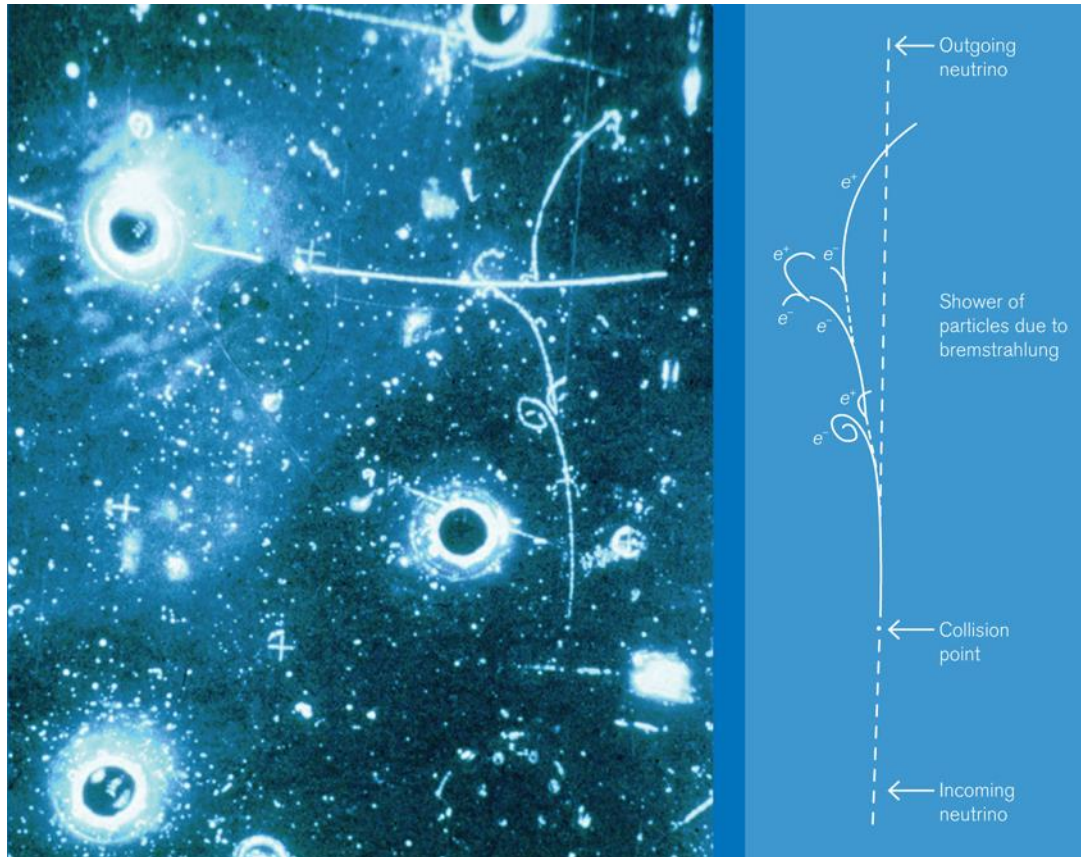
Skizze: Streuung eines Myon neutrinos am Elektron



2.3. Beobachtung der elastischen Neutrino Streuung

- Wie genau sollte das Blasenkammerbild aussehen?
 - $\theta \approx \sqrt{\frac{2m}{E_{\bar{\nu}}}} \approx 2^\circ$
 - Elektromagnetische Schauer ($X_0 = 11cm$)
- Erstes Ereignis wurde Ende 1972 entdeckt

2.3. Beobachtung der elastischen Neutrino Streuung



Blasenkammer: Myoneneutrino-Streuung am Elektron [6]



2.3. Beobachtung der elastischen Neutrino Streuung

- Warum war dies nicht ausreichend als Entdeckung der neutralen Ströme?
 - Es gibt im Prinzip einen Untergrund von: $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$
 - Die ν_e würden aus der Reaktion $K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$ stammen
 - Der Wirkungsquerschnitt wäre zwar deutlich größer, allerdings handelt es sich um ein Bild bei dem K^+ defokussiert wird ($\bar{\nu}_\mu$)
 - Die Hintergrundreaktion wurde zu 1% erwartet



2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen

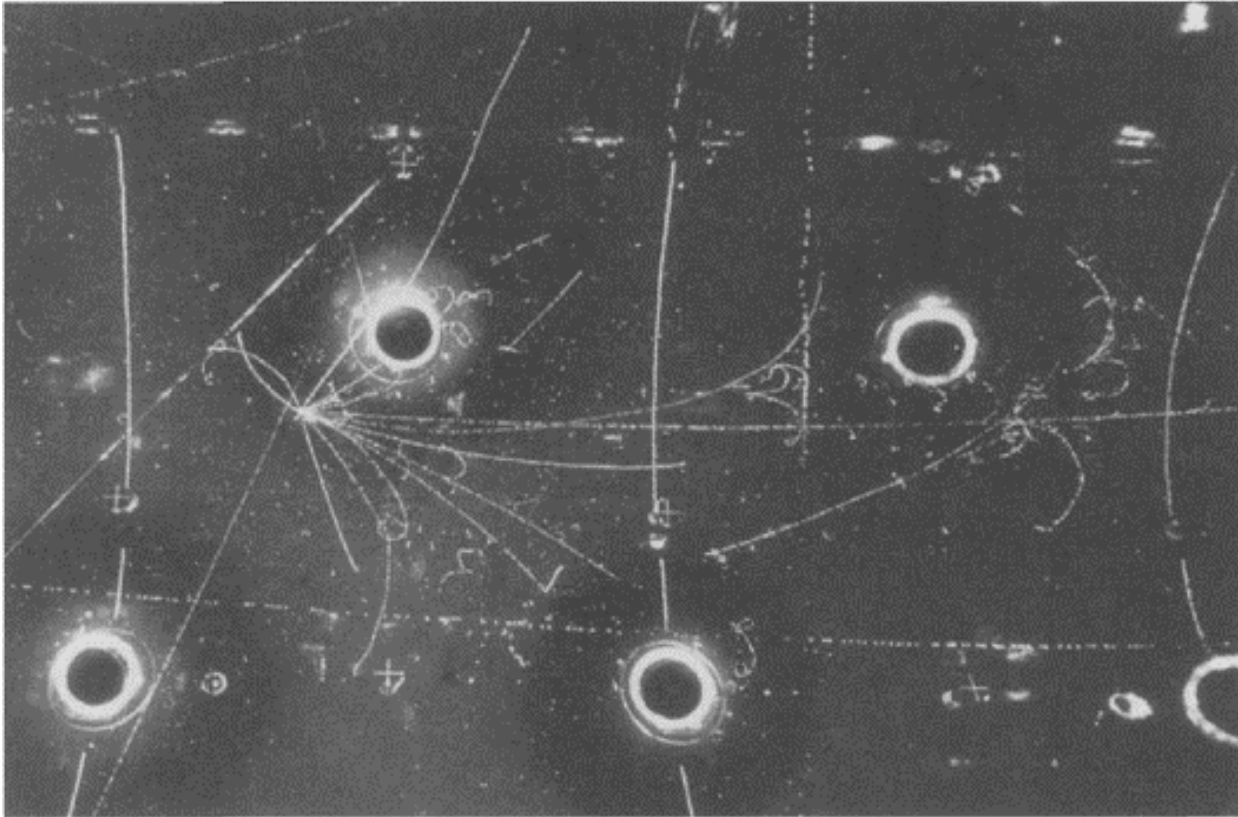
- Wechselwirkungsprozesse von Neutrinos mit Hadronen haben sowohl einen klaren Vorteil als auch einen klaren Nachteil:
 - Durch höheren Wirkungsquerschnitt mehrere hundert Ereignisse
 - Ein hoher und schwer einschätzbarer Untergrund von Neutronen
- Hauptaufgabe des Experiments ist es herauszufinden wie viele Reaktionen wirklich von Neutrinos induziert wurden



2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen

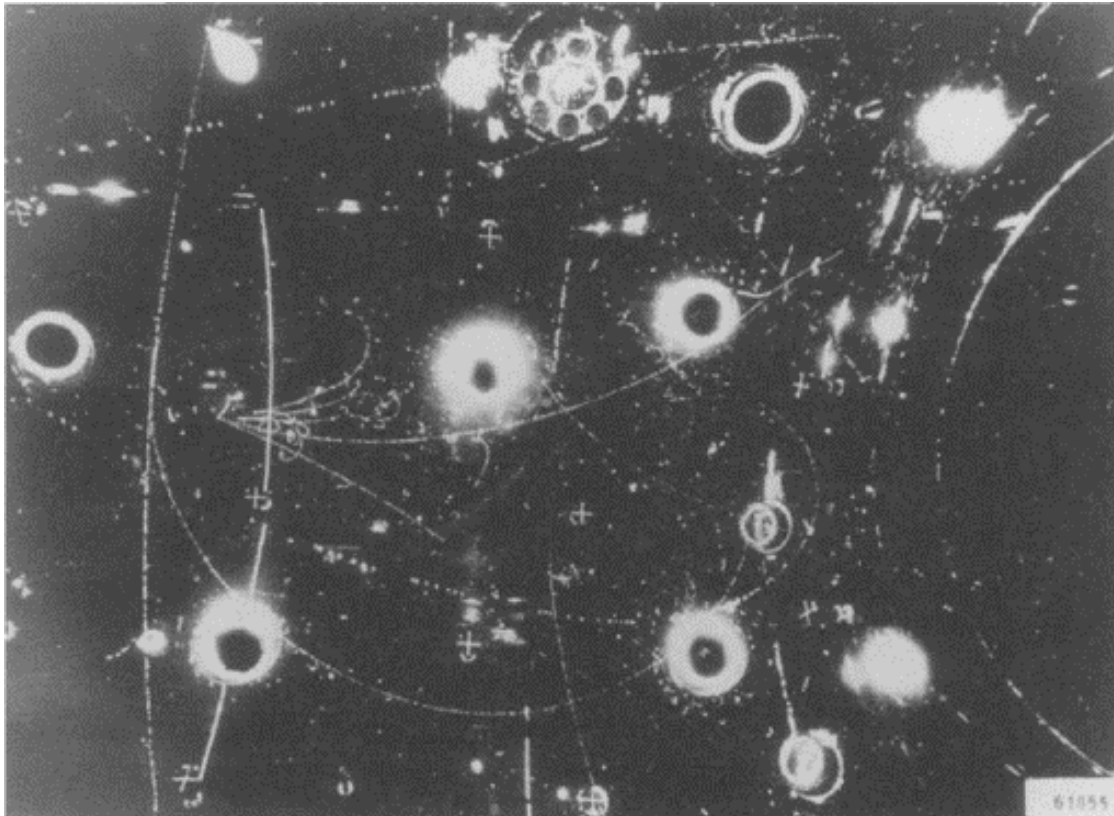
- In diesem Experiment gibt es prinzipiell 3 verschiedene Reaktionen
 - $\bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \text{Hadrons}$ [NC]
 - $\bar{\nu}_\mu + N \rightarrow \mu^- + \text{Hadrons}$ [CC]
 - $n + N \rightarrow \text{Hadrons}$ [NC*]
 - [CC] gefolgt von [NC*] [AS]

2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen



Blasenkammerbild CC [v.]

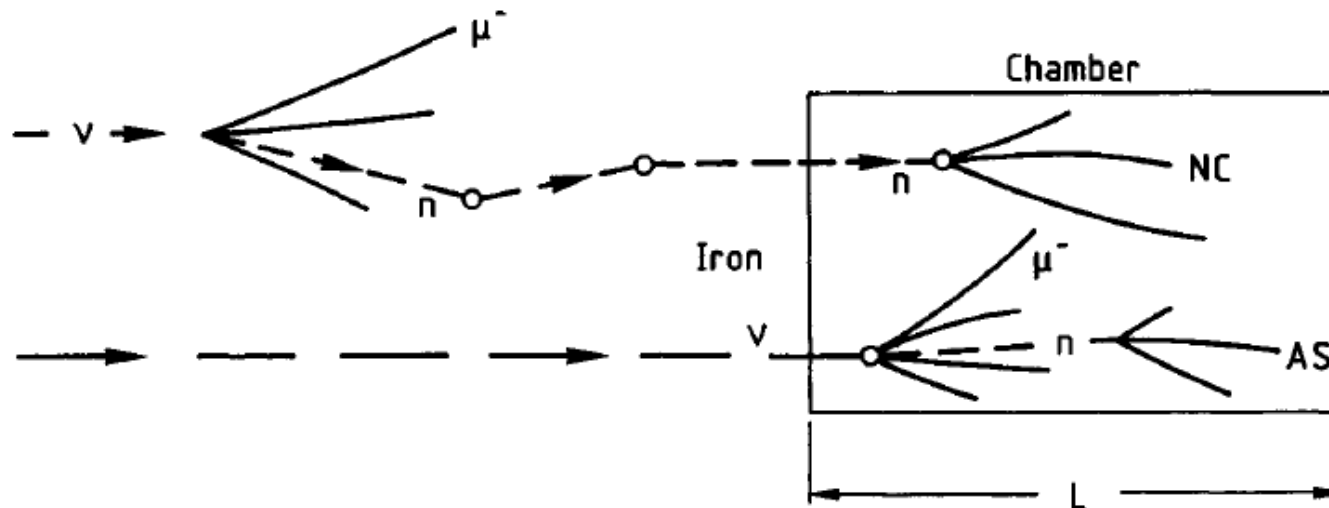
2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen



Blasenkammerbild NC [v.]



2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen



Schematische Darstellung von NC* und AS [v.]



2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen

- Es wurden 83.000 Neutrino und 207.000 Antineutrino Bilder aufgenommen
- Es wurden nur Reaktionen beachtet mit Hadronenenergie $> 1\text{GeV}$
- Man findet für die Neutrinos:
 - 102 NC
 - 428 CC
 - 15 AS
- Man findet für Antineutrinos:
 - 64 NC
 - 148 CC
 - 12 AS

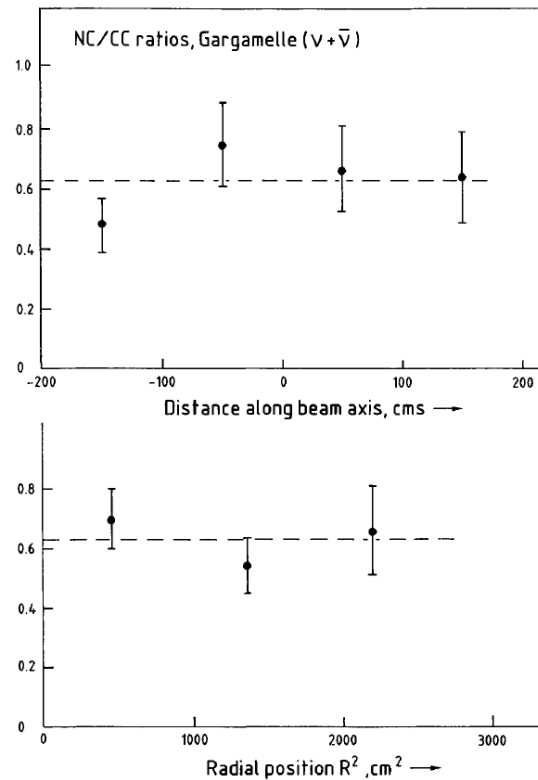


2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen

- Neutrino:
 - $NC/CC = 0,24$
 - $NC/AS = 6,8$
- Antineutrino:
 - $NC/CC = 0,42$
 - $NC/AS = 5,3$



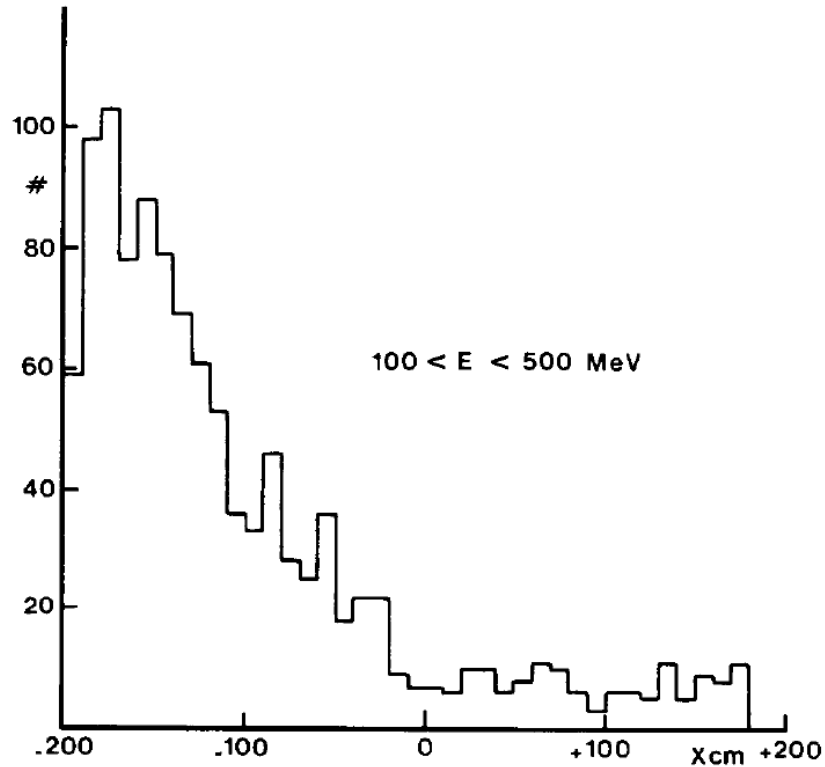
2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen



Räumliche Verteilung von NC/CC [ν]



2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen



NC Ereignisse mit $100 < E < 500$ MeV [ii.]



2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen

- Zur Abschätzung des Untergrunds muss man wissen wie sich die Neutronen in den verschiedenen Medien ausbreiten
- Freon
 - Im Prinzip bekannt: $\lambda_{Had} = 78cm$
 - Problem: Nicht alle Neutronen werden berücksichtigt
 - Effektiver Wert berechnet zu: $\lambda_{Had,eff} = (95 \pm 10)cm$
- Abschirmung/Eisen
 - Auch hier im Prinzip bekannt: $\lambda_{Had} = 16cm$
 - Problem: ein gestreutes Neutron kann immer noch in die Kammer gelangen



2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen

- Die mittlere Reichweite ($\lambda_{Had,eff}$) eines Neutrons aus der Abschirmung, das ein NC Ereignis auslösen kann, ist eine Funktion von:
 - Der Startenergie des Neutrons
 - Der unteren Energiegrenze (1GeV)
 - Form der Elastizitätskurve
(Elastizität ist der Anteil der Energie nach dem Stoß)

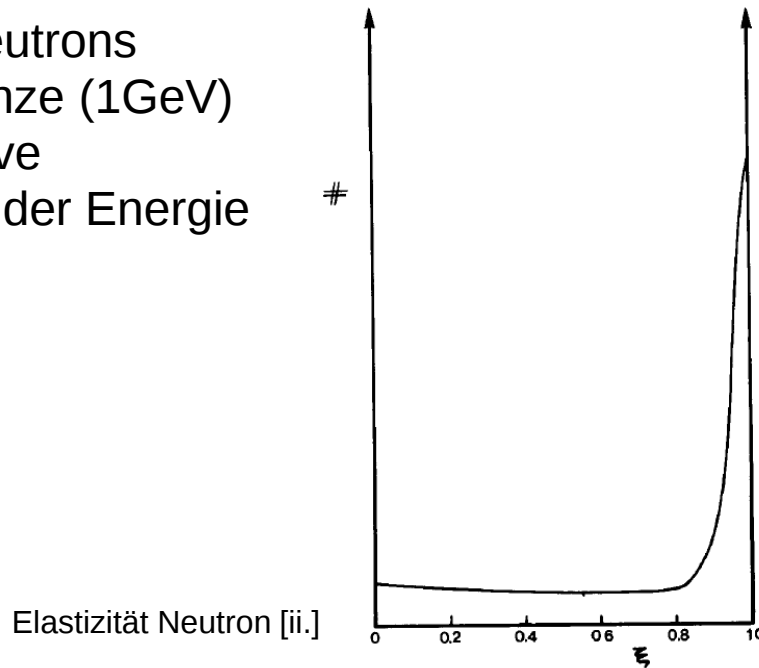


Fig. 15. Distribution of neutron elasticity, ξ .



2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen

- Monte-Carlo Simulation soll NC* und AS berechnen
 - Annahme für die Startenergie: $\frac{dN}{dE} \propto E^{-n}$ mit Schnitt bei 10GeV
 - Annahme für Winkelverteilung: $\frac{dN}{d\Omega} \propto e^{-\frac{\theta^2}{2\theta_0^2}}$
 - Es bleiben die Parameter n und θ_0
- Mit der Annahme, dass alle NC Beobachtungen von Neutronen stammen erhält man die Fitparameter:
 - $n = 1,1 \pm 0,3$ und $\theta_0 = (350 \pm 50) mrad$



2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen

- Mit den Fitparametern lässt sich das Verhältnis NC/AS simulieren zu
 - $NC/AS = 1,00 \pm 0,25$
- Das Ergebnis ist im **starken Widerspruch zu den NC/AS Messwerten**. Die NC Ereignisse können also nicht ausschließlich von Neutronen stammen.
- Eine bessere Abschätzung erhält man indem man annimmt, dass die Neutronen sich ähnlich zu Protonen verhalten und übernimmt die daraus folgenden Fitparameter. Man erhält
 - $NC/AS = 0,6 \pm 0,3$



2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen

- Damit lässt sich der Untergrund NC^* in den Messwerten bestimmen zu
 - $NC^*_{\nu} = 10,8 \pm 4,5$
 - $NC^*_{\bar{\nu}} = 7,2 \pm 3,6$
- Die Neutronen aus der Abschirmung stellen den größten Teil des Untergrunds dar. Allerdings gibt es auch diverse kleine Beiträge
 - Langsame Myonen ($<100\text{MeV}$): 0 ± 5 CC Ereignisse
 - Kosmische Strahlung: kein Effekt
 - Schnelle Pionen ($>1\text{GeV}$): 24/43 „falsche“ Neutrino/Antineutrino CC Messungen

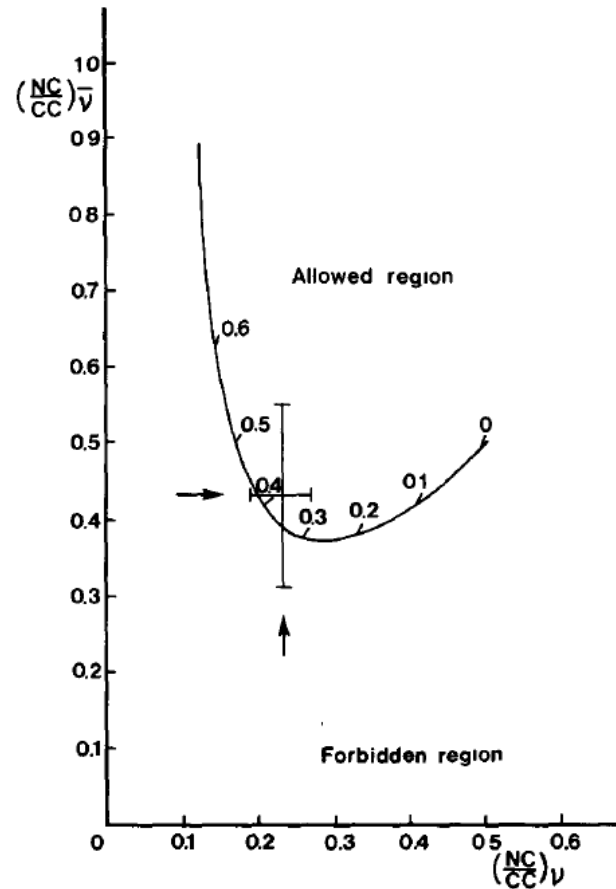


2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen

- Alle Effekte zusammen ergeben die Werte:
 - Neutrino: $\frac{NC}{CC} = 0,22 \pm 0,04$
 - Antineutrino: $\frac{NC}{CC} = 0,43 \pm 0,12$
- Die Signale lassen sich nur mit Neutralen Strömen erklären



2.4. Stöße der Neutrinos mit Atomkernen



Grobe Bestimmung des Weinbergwinkels [ii.]



1. Grundlagen und damaliges Wissen

2. Das Gargamelle Neutrino Experiment

3. Kritik und heutiges Wissen

1. Neutrale Ereignisse vor Gargamelle
2. HPWF
3. Nachfolgende Experimente und aktuelle Werte



3.1. Neutrale Ereignisse vor Gargamelle

- Seit 1964 gab es in einer kleineren Blasenkammer am CERN neutrale Events die unerklärt blieben (Neutronenerklärung schlug fehl)
- Man nahm an, dass der Kaskadenprozess in der Abschirmung nicht ganz verstanden sei oder es eine weitere Neutronenquelle gibt



3.2. HPWF

- HPWF = Harvard Pennsylvania Wisconsin Fermilab
- Juli 1973: Brief an CERN, dass man mehrere hundert NC Ereignisse hat und sich gerne auf die Gargamelle Ergebnisse beziehen würde
- Erste Veröffentlichung im September 1973 (3 Seiten, CERN)
- Ende 1973 negative Ergebnisse von HPWF, daraus folgt extremer Druck und Kritik an der CERN Gruppe
- Zweite Veröffentlichung im Januar 1974 mit aufwendiger Simulation (CERN)
- Später in 1974 wurden von HPWF korrigierte Ergebnisse veröffentlicht und die CERN Gruppe machte direkte Messungen von Protonen an Gargamelle und somit die Simulation überflüssig



3.3. Nachfolgende Experimente

- In den Experimenten UA1 und UA2 am SPS von CERN wurden 1983 sowohl das Z^0 gefunden sowie die $W^\pm$
- Masse Z^0 : $(91,1876 \pm 0,0021) \text{ GeV}$
- Masse $W^\pm$: $(80,385 \pm 0,015) \text{ GeV}$
- Weinbergwinkel: $\sin \theta_W = 0,22292 \pm 0,00028$



Zusammenfassung

- Die Glashow-Salam-Weinberg Theorie bzw. die elektroschwache Theorie postuliert schwache Neutrale Ströme (1971)
- In der Gargamelle Blasenkommer am CERN wird 1972 die Streuung eines Myonneutrinos an einem Elektron entdeckt, allerdings kann dies auch eine Hintergrundreaktion gewesen sein
- 1973 veröffentlicht das Gargamelle Team ein Paper in dem die Stöße von Myonneutrinos mit Atomkernen untersucht werden. Die beobachteten Ereignisse lassen sich nur mit Neutralen Strömen erklären. Dieses Paper gilt als deren Entdeckung

Quellen



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386

Textquellen:

- i. Hasert, FJ et. al.: Observation of Neutrino-Like Interactions without Muon or Electron in the Gargamelle Neutrino Experiment, Physics Letters B46, 1973
- ii. Hasert, FJ et. al.: Observation of Neutrino-Like Interactions without Muon or Electron in the Gargamelle Neutrino Experiment, Physics Letters B73, 1974
- iii. Demtröder Wolfgang: Experimentalphysik 4, 4. Auflage, 2013
- iv. Bleck-Neuhaus, Jörn: Elementare Teilchen, 2. Auflage 2012
- v. Perkins, Donald: Gargamelle and the Discovery of Neutral Currents, The Rise of the Standard Model, S.428-446, 1997
- vi. J.C. Dusseux et. al.: The Cern Magnetic Horn and its Remonte-Handling System, 1972
- vii. Lagarrigue, André: The “Gargamelle” Project
- viii. pdg.lbl.gov: The Mass and the Width of the W Boson, Stand: 06.01.2016
- ix. pdg.lbl.gov: Z, Stand: 06.01.2016
- x. pdg.lbl.gov: Atomic Nuclear Properties Freon-13b1, Stand: 06.01.2016
- xi. Kopp, Sacha E.: Accelerator Neutrino Beams, 2006

Quellen



UNIVERSITÄT
HEIDELBERG
ZUKUNFT
SEIT 1386

Zusätzliche Bildquellen:

- (1) home.cern: http://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/styles/medium/public/image/update-for_the_public/2013/07/neutral-currents2.jpg?itok=PVAaynFO
- (2) Wikipedia.de: <https://de.wikipedia.org/wiki/Feynman-Diagramm#Z-Bosonen>
- (3) Haidt, Dieter: The Discovery of Weak Neutral Currents http://www.desy.de/~haidt/nc30_text.pdf
- (4) Wikipedia.it: <https://it.wikipedia.org/wiki/Gargamelle>
- (5) danielscully.co.uk: <http://danielscully.co.uk/thesis/img/figure-feynman-nce.png> verwendet als Grundlage für ein eigenes Feynman Diagramm
- (6) Symmetrymagazine.org: <http://www.symmetrymagazine.org/article/august-2009/weak-neutral-current>

Stand: alle 06.01.2016