

Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

Neutrinoexperimente und Tests des Partonmodells

30.04.2010

Charlotte Debus

Betreuer: N. Herrmann

Gliederung

1) Tiefinelastische Streuung

1) Wiederholung: Elastische und inelastische
Elektron-Nukleon-Streuung

2) Tiefinelastische Streuung

3) Neutrino-Nukleon-Streuung

2) Das CCFR-Experiment

1) Überblick

2) Aufbau

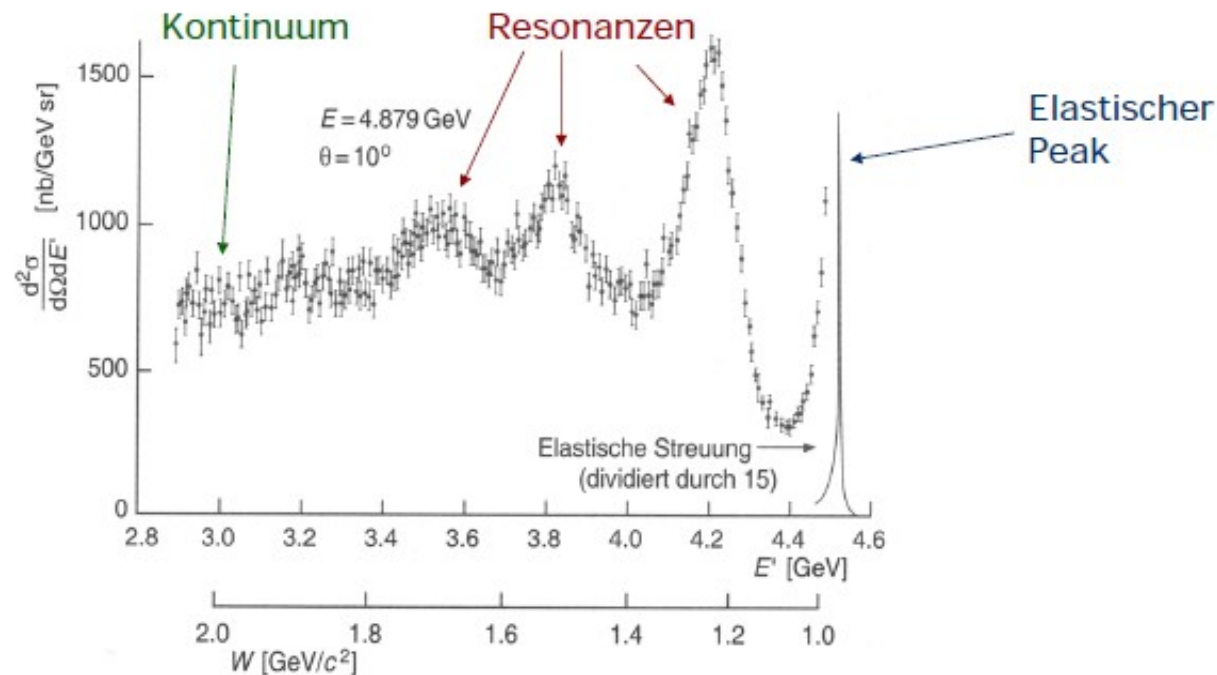
3) Ergebnisse und Deutung

1. Tiefinelastische Streuung

Worum geht es eigentlich?

→ Auflösung von Nukleonstruktur

Vorher: elastische und inelastische Streuung von Elektronen an Nukleonen (kleine Energien)



Spektrum der gestreuten Elektronen bei Elektron-Proton-Streuung, Elektronenenergie $E = 4.9 \text{ GeV}$, Streuwinkel $\theta = 10^\circ$

Resonanzen/Anregungen & Kontinuum → Hinweis auf innere Nukleonstruktur

Jetzt: Tiefinelastische Streuung, um Nukleonstruktur aufzudecken (größere Energien)

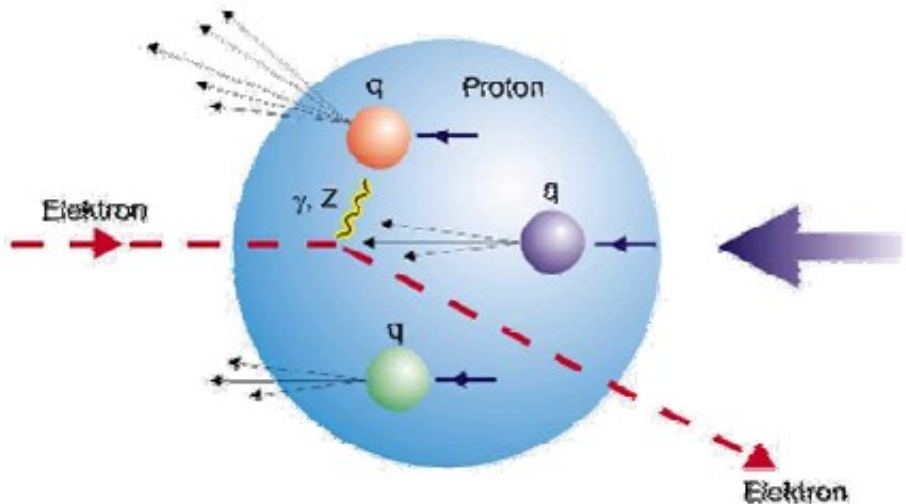
- Teste zuerst durch EM-Wechselwirkung:

Elektron wird an Nukleon gestreut

→ Invariante Masse:

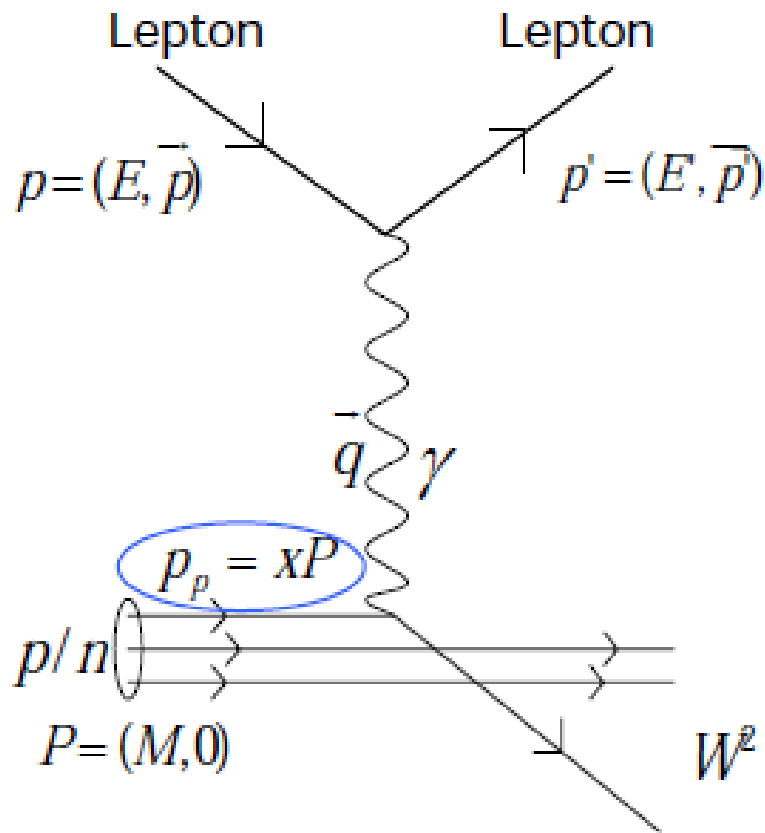
$$W^2 c^2 = M^2 c^2 + 2M \nu - Q^2$$

- Für elastische und inelastische Streuung: $W < 2,5 \text{ GeV}/c^2$
- Für Tiefinelastische Streuung $W > 2,5 \text{ GeV}/c^2$



Was wird im Streuprozess gemessen?

- Messe Energie und Winkelverteilung der gestreuten Leptonen



Impulsübertrag $Q^2 = -(\vec{q})^2$

Energieübertrag des gestreuten Leptons

$$\nu = \frac{Pq}{M} = E - E'$$

Definiere Bjorkensche SkalenvARIABLE

$$x = \frac{Q^2}{2M\nu}$$

- Führe Strukturfunktionen der elektromagnetischen Streuung ,W1 und W2 ein, als Formfaktor (ähnlich der Rosenbluthformel)
 - W1: beschreibt magnetischen Anteil
 - W2: beschreibt elektrischen Anteil
- Damit folgt ein Wirkungsquerschnitt für die tiefinelastische Elektron-Nukleon-Streuung:

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 \sigma}{d\Omega dE'} &= \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{Mott}^{\text{red}} \left[W_2(Q^2, \nu) + 2 W_1(Q^2, \nu) \tan^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 &= \frac{\alpha^2}{4 E'^2 \sin^4(\frac{\theta}{2})} \cos^2(\frac{\theta}{2}) \left[W_2(Q^2, \nu) + 2 W_1(Q^2, \nu) \tan^2(\frac{\theta}{2}) \right]
 \end{aligned}$$

- Führe mithilfe von x die dimensionslosen Strukturfunktionen F_1, F_2 ein

$$F_2(x, Q^2) = \nu W_2(Q^2, \nu)$$

$$F_1(x, Q^2) = Mc^2 W_1(Q^2, \nu)$$

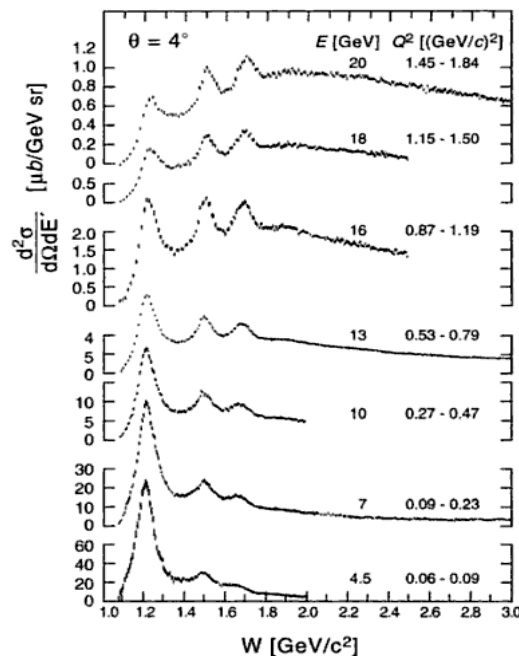
- Callan-Cross Relation: $F_2^{\nu, \bar{\nu}} = 2x F_1^{\nu, \bar{\nu}}$



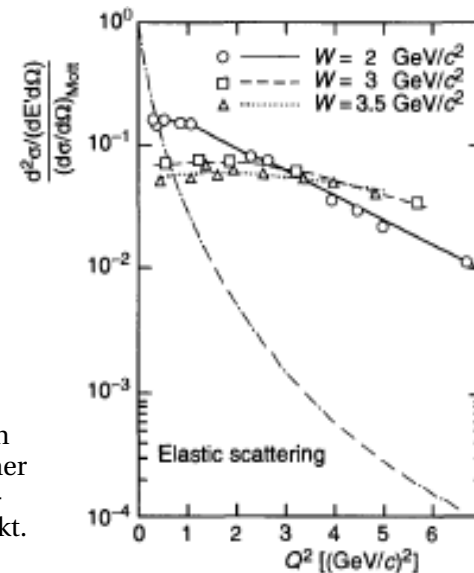
$$\frac{d^2 \sigma}{d\Omega dE'} = \frac{\alpha^2}{4E'^2 \sin^4(\frac{\theta}{2})} \left[\cos^2(\frac{\theta}{2}) \frac{F_2(Q^2, x)}{\nu} + \frac{2F_1(Q^2, x)}{M} \sin^2(\frac{\theta}{2}) \right]$$

Was kann man aus der e-N-Streuung lernen?

- Winkelverteilung der gestreuten Leptonen ähnlich zur Rutherford-Streuung
- Unabhängigkeit der Strukturfunktion von Q^2 bei festem x



Gemessene Anregungsspektren in tiefinelastischer Elektron-Nukleon-Streuung als Fkt. von W

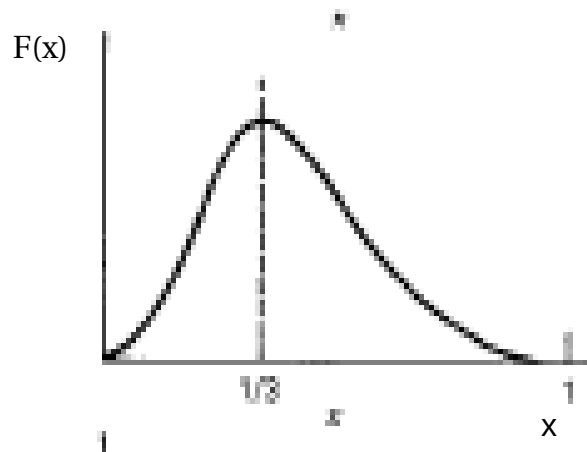


Elektron-Proton-Streuung: gemessener Wirkungsquerschnitt normiert auf Mott-WQ als Fkt. von Q^2 für verschiedene Werte der invarianten Masse W

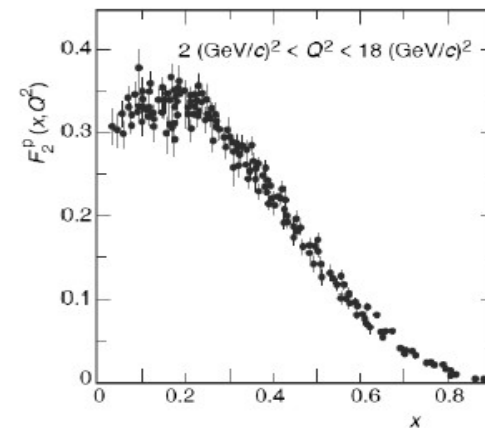
→ elastische Streuung an geladenen, punktförmigen Konstituenten

- Parton Modell von Feynmann & Bjorken
 - Punktförmige geladene Konstituenten
 - Proton: uud, Neutron: udd
- Strukturfunktionen zeigen, wo die Ladungen im Proton/Nukleon sitzen

Erwartet:



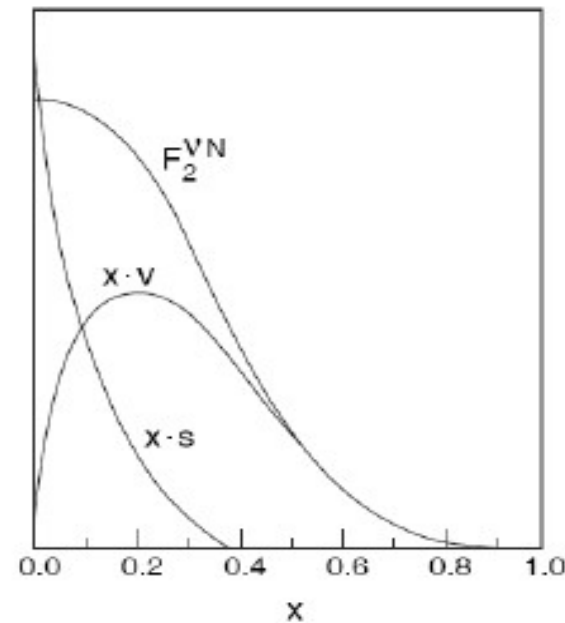
Gemessen:



Gemessene Strukturfunktion F_2 des Protons
als Funktion von x bei Q^2 -Werten zwischen 2
 GeV/c^2 und 18 GeV/c^2

- Erklärungsansatz: unterscheide Valenzquarks (nur quarks, machen Quantenzahlen aus) und Seequarks (virtuelle Quark–Antiquark-Paare)

→ Motivation: Zeige Antiquarks im Nukleon



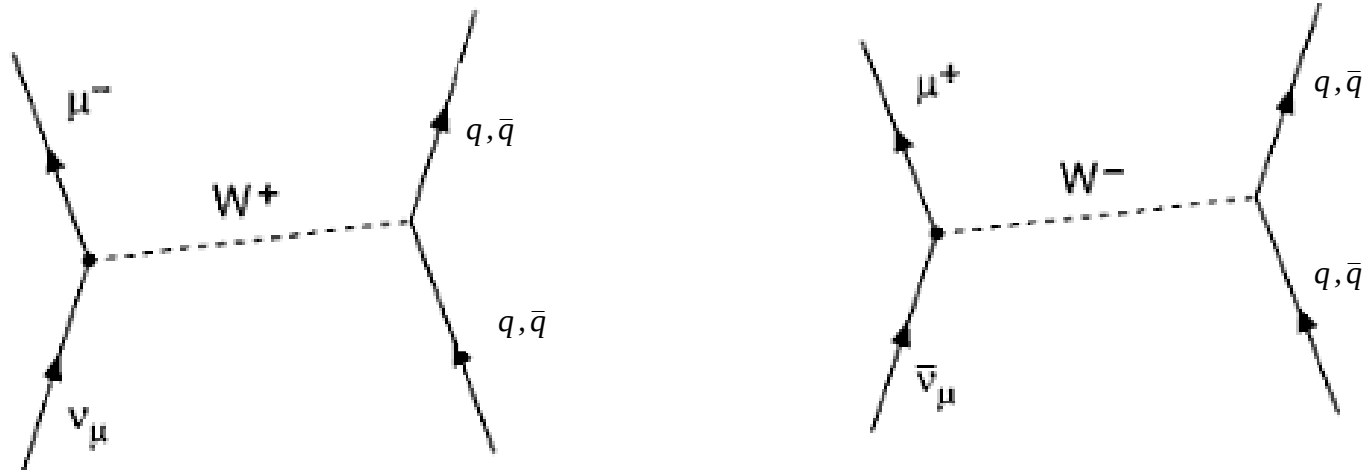
Schematische Darstellung der Strukturfunktion F_2 des Nukleons, gemessen in (Anti-)Neutrinostreuung, sowie der mit x gewichteten Impulsverteilungen von Valenzquarks (v) und Seequarks (s)

Neutrino-Nukleon Streuung

- Warum eigentlich ausgerechnet Neutrinos? (Wechselwirken nur schwach und sehr wenig)

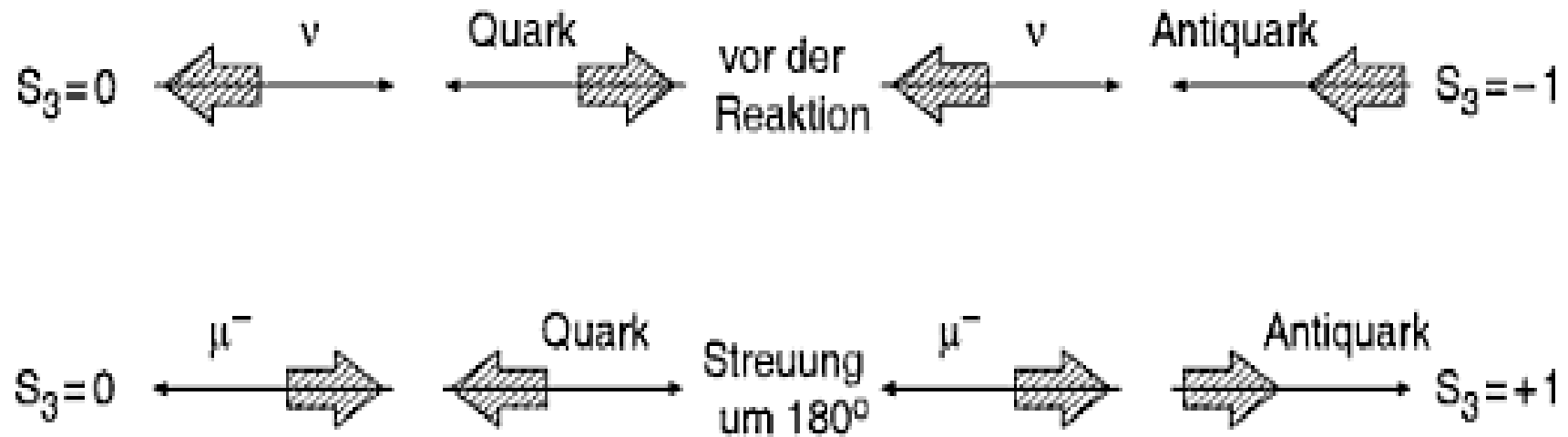
→ Helizitätsargument: Neutrinos/Antineutrinos koppeln unterschiedlich an Quarks und Antiquarks

nutze dies um Verteilung von Quarks und Antiquarks im Nukleon getrennt zu bestimmen



Wie funktioniert das mit den Neutrinos

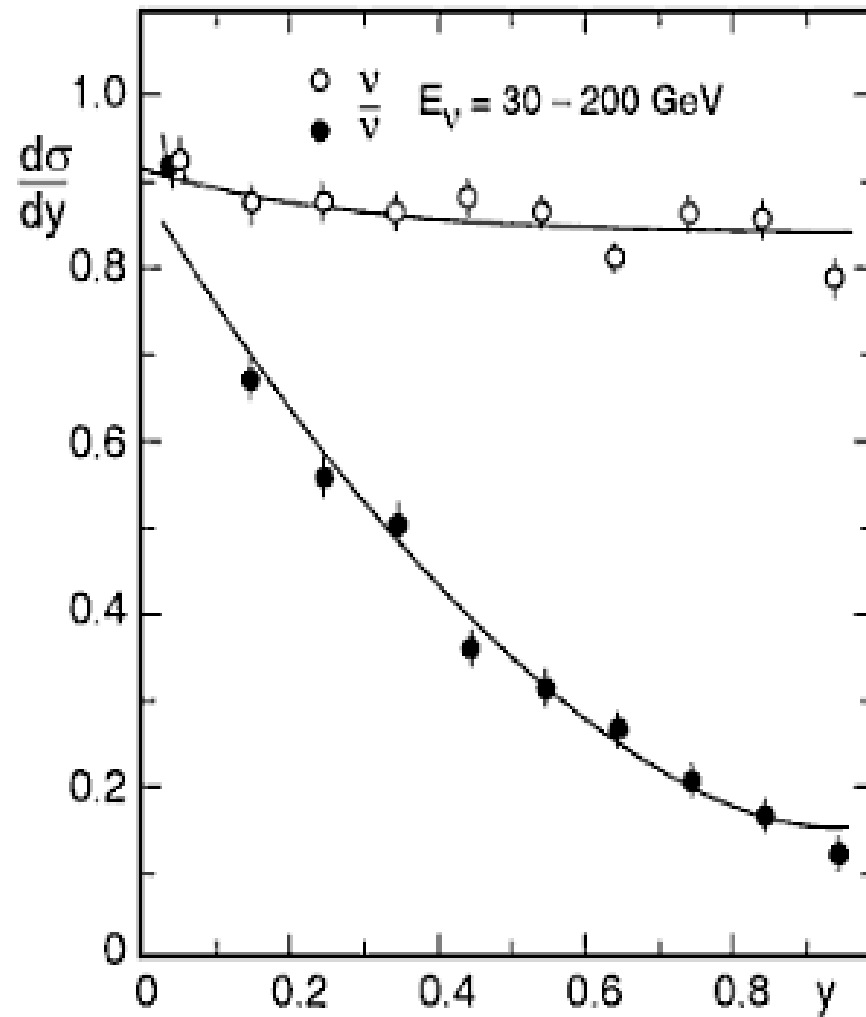
Betrachte Streuung um 180° :



- W-Boson koppelt nur an linkshändige Fermionen und rechtshändige Antifermionen
- Spinflip aus Streuung und Erhaltung der Teilchenhändigkeit

- Messe Winkel- und Energieverteilung der gestreuten Myonen
 - Neutrino und Quark haben beide negative Helizität → Projektion des Gesamtspins auf z-Achse vor und nach Streuung $S_3 = 0$
 - Isotrope Streuung
 - Bei WW linkshändiges ν mit rechtshändigem Antiquark: Spinprojektion vor Streuung $S_3 = -1$, nach Streuung $S_3 = +1$ → Streuung um 180° nicht möglich → Winkelabhängigkeit im WQ $\sim (1 + \cos\Theta)^2$ → Energieabhängigkeit $(1 - y)^2$,

$$y = \frac{\nu}{E_\nu} = \frac{E_\nu - E_\nu'}{E_\nu}$$



Differentieller Wirkungsquerschnitt in willkürlichen Einheiten für Neutrino- bzw. Antineutrino-Nukleon-Streuung als Funktion von y

Wirkungsquerschnitt:

- Durch Substitution mit x und y folgt der Wirkungsquerschnitt für die Neutrino-Nukleon-Streuung

EM:

$$\frac{d^2 \sigma}{d\Omega dE'} = \frac{\alpha^2}{4 E'^2 \sin^4(\frac{\theta}{2})} \left[\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \frac{F_2(Q^2, x)}{\nu} + \frac{2F_1(Q^2, x)}{M} \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \right]$$

Schwache WW:

$$\frac{d^2 \sigma^{\nu, \bar{\nu}}}{dx dy} = 2ME \left(\frac{G^2}{2\pi} \right) \frac{1}{(1 + Q^2/m_W^2)^2} \left((1-y) F_2^{\nu, \bar{\nu}} + \frac{y^2}{2} 2xF_1^{\nu, \bar{\nu}} \pm \left(y - \frac{y^2}{2} \right) xF_3^{\nu, \bar{\nu}} \right)$$

- F_3 berücksichtigt Teilchenhändigkeit

Wirkungsquerschnitt: Was messe ich und wie bekomme ich die Strukturfunktionen?

$$\frac{d^2\sigma^{\nu,\bar{\nu}}}{dxdy} = \frac{G^2 m_N E_\nu}{\pi} \frac{1}{(1+Q^2/m_W^2)^2} \left((1-y) F_2^{\nu,\bar{\nu}} + \frac{y^2}{2} 2xF_1^{\nu,\bar{\nu}} \pm \left(y - \frac{y^2}{2} \right) xF_3^{\nu,\bar{\nu}} \right)$$

Messgrößen: Teilchenfluss, Ereignisrate

Aus: E_ν , E_μ und Streuwinkel

Aus: E_ν und E_μ

Wollen wir haben!!

$E_\nu \approx E_{\text{Hadr.}} + E_\mu$

Hadronische Kalorimeter

Aus: Myonimpuls -> Driftkammern

Flugbahn des Myon -> Szintillatoren, Driftkammern

Nun zur Praxis...

2. Das CCFR Experiment

(California Institute of Technology, Columbia University, Fermilab, University of Rochester)

Ein paar Eckdaten

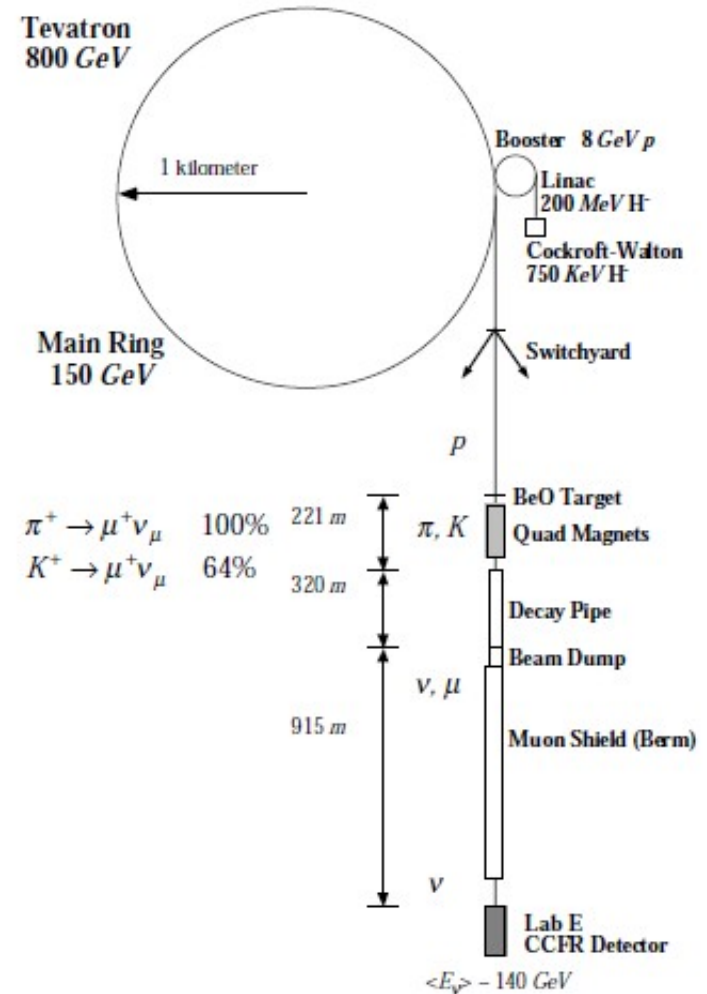
- Fermilab, CCFR Detektor in LabE
- Zwei runs:
 - E744 : Februar bis August 1985
 - E770 : Juni 1987 bis Februar 1988
- Mit dem 800GeV Tevatron-Beam wurde ein Breitband – Neutrinostrahl hergestellt und dieser auf einen Targetdetektor geschossen
- Ziel: Messung der Strukturfunktionen/Verteilungen von Quarks und Antiquarks im Proton

Der Neutrino-Strahl

- ν entsteht aus π und K Zerfällen
 - 800GeV Proton-Strahl des Tevatron
 - trifft nach Erzeugen und Beschleunigen auf 33cm dickes BerylliumOxid Fixed-Target
- Hadronen entstehen, werden von Triplett von Quadrupolmagneten fokussiert
- 320m decay region

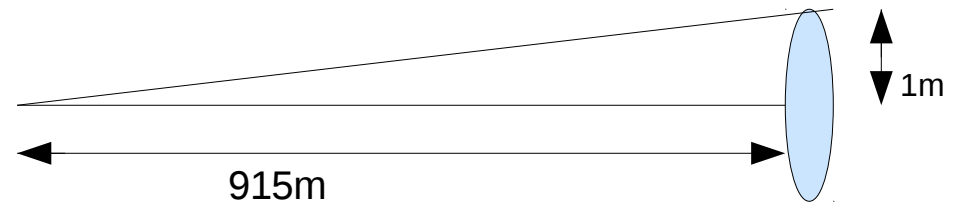
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu, \pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad \text{BR} = 99.99\%$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu, K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \quad \text{BR} = 63.5\%$$

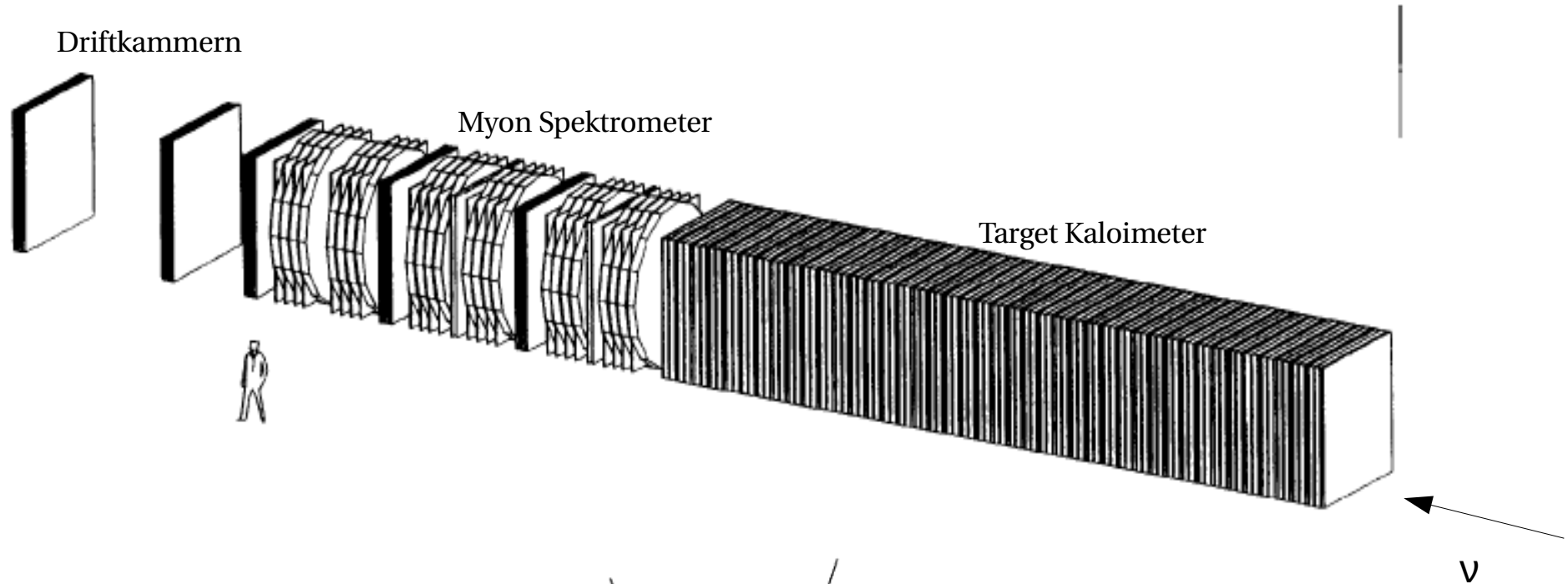


Fermilab neutrino beamline layout.

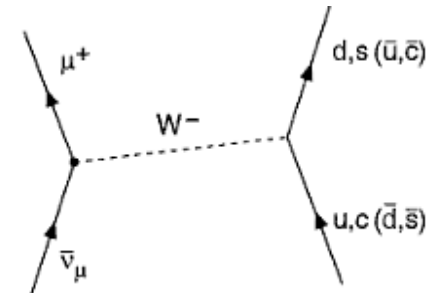
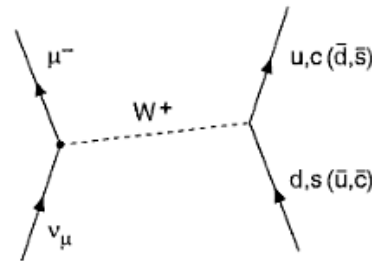
- Mesonenreste des Strahls (nur 1/10 zerfällt) → Beam dump
- Myonen: in ~241m Stahl-Abschirmung und 582m Erde deponiert
- Nach 915m CCFR Detektor
- 915m Fluglänge, Auftrefffläche auf Detektor ~1m Radius
→ Öffnungswinkel ~1mrad
- Mittlere Energie: 140 GeV , Maximalenergie: 600 GeV
→ Breitband-Strahl



Der Detektor



- Target Kalorimeter
- Myon Spektrometer



Das Target Kalorimeter

- Stahl-Szintillator Kalorimeter mit Driftkammern für Tracking von geladenen Teilchen
- Masse: 690 Tonnen, 17.7 m lang, 3m x 3m Fläche
- sechs module → carts
- Jede cart enthält 28 Stahlplatten, 7 Driftkammern und 14 Szintillatoren
- Stahlplatten : 3m x 3m x 5.15 cm

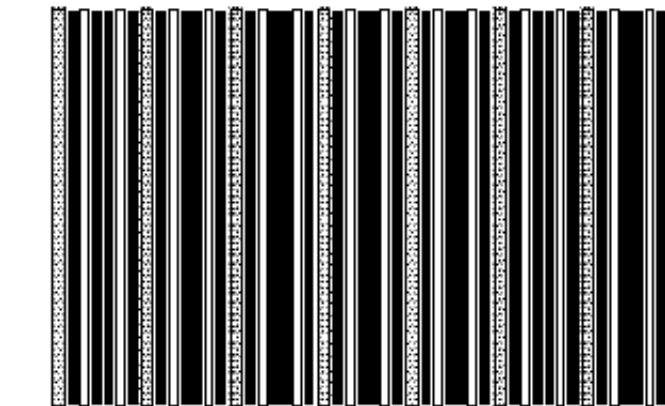
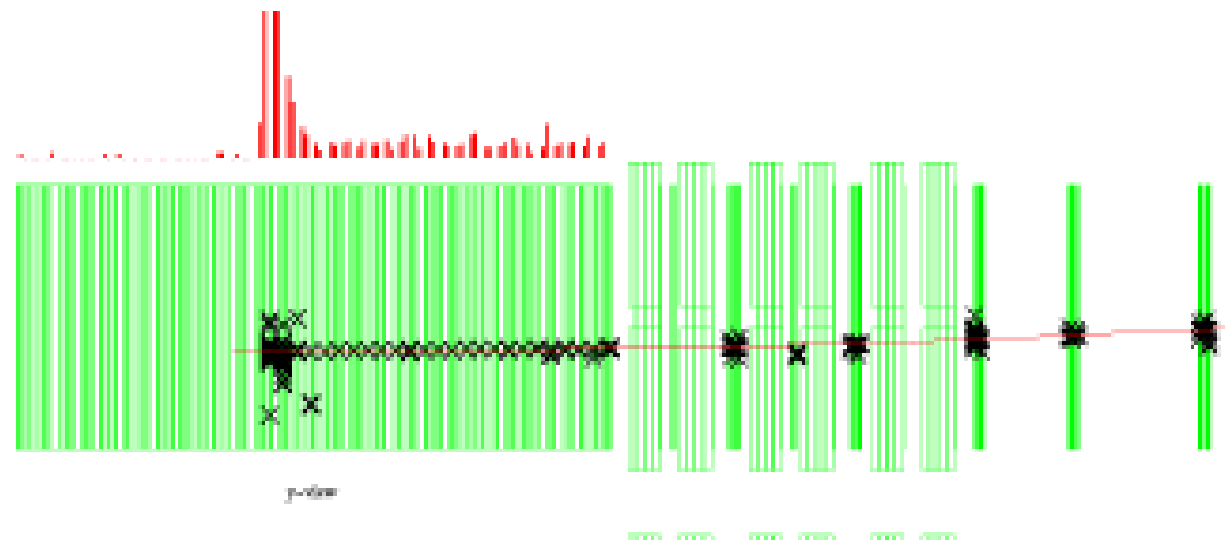


Figure 2.6: Stack layout of a CCFR target cart. A drift chamber is positioned after every two steel plates and a scintillation counter is found after every four.



A typical charged-current event as seen by the elements of the CCFR detector. Hits in the drift chambers are shown as "X". Pulse heights in the calorimeter scintillators are shown in a logarithmic scale above the target

Das Myon Spektrometer

- Zur Messung von Energie und Winkel der gestreuten Myonen
- 3 große toroide Eisen-Magnete → Myonen (geladene Teilchen) werden abgelenkt → Impulsbestimmung
- Gefolgt von Driftkammern

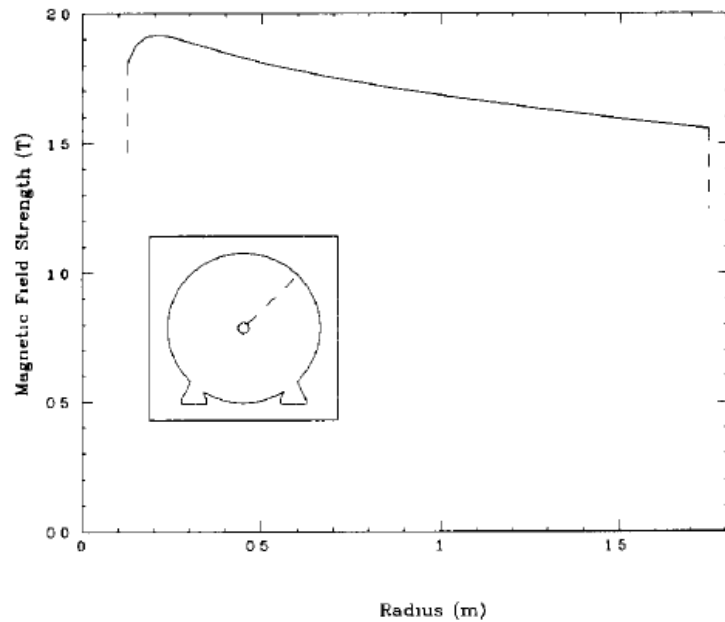


Fig. 2. The radial dependence of the magnetic field strength in the toroidal magnets. The radial direction is given by the dashed line in the inset.

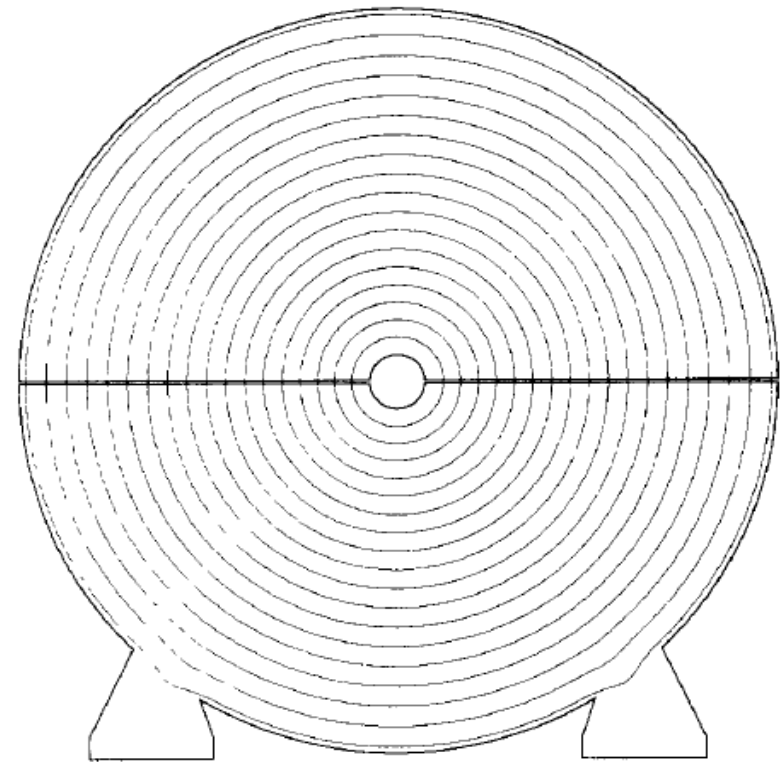


Fig. 3. Map of magnetic field lines for a cross-section of the toroidal magnets, showing the approximate azimuthal symmetry of the field and the small perturbation due to the iron legs of the toroid. The field lines are spaced at intervals of 0.152 Tm.

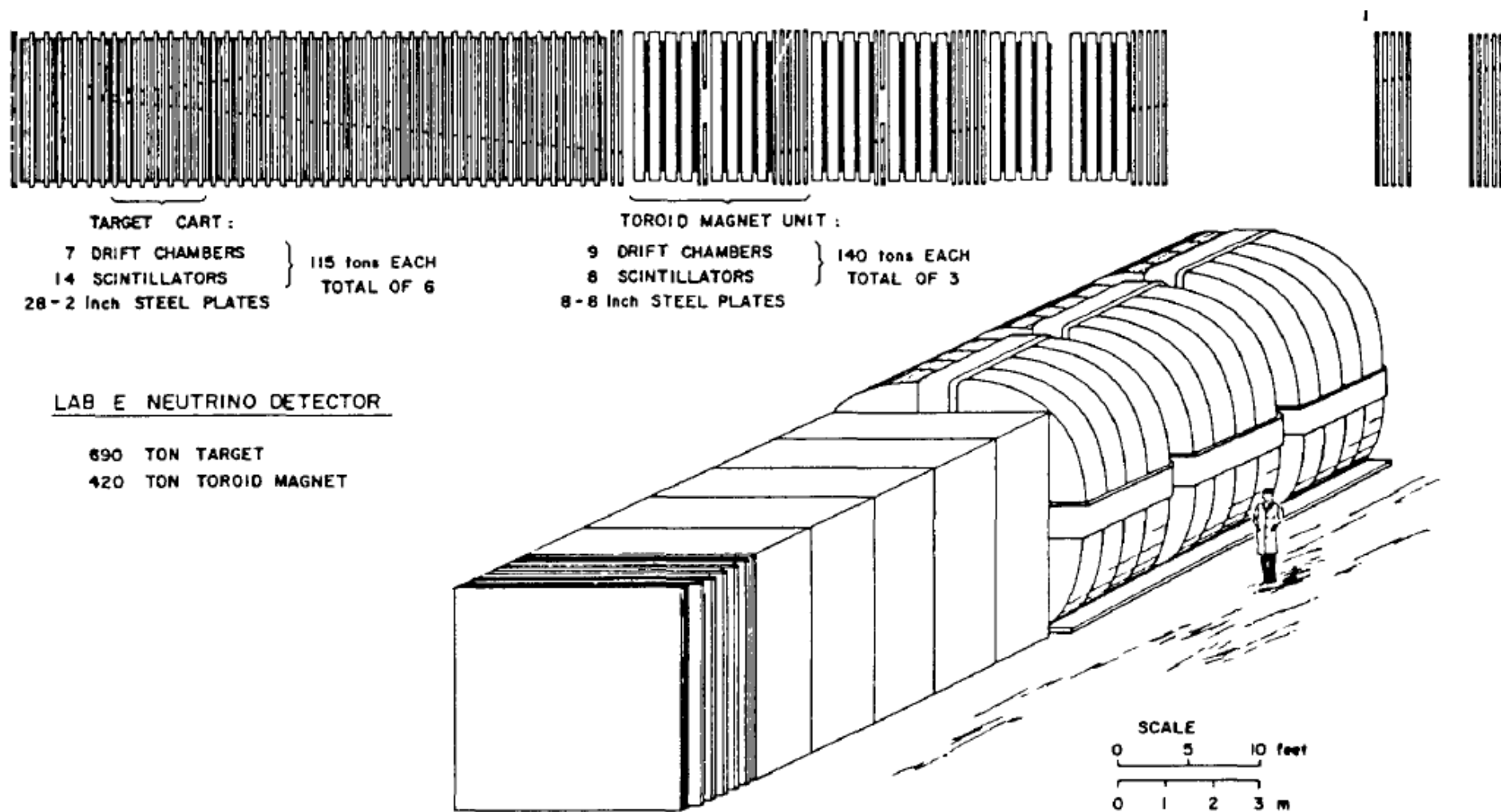
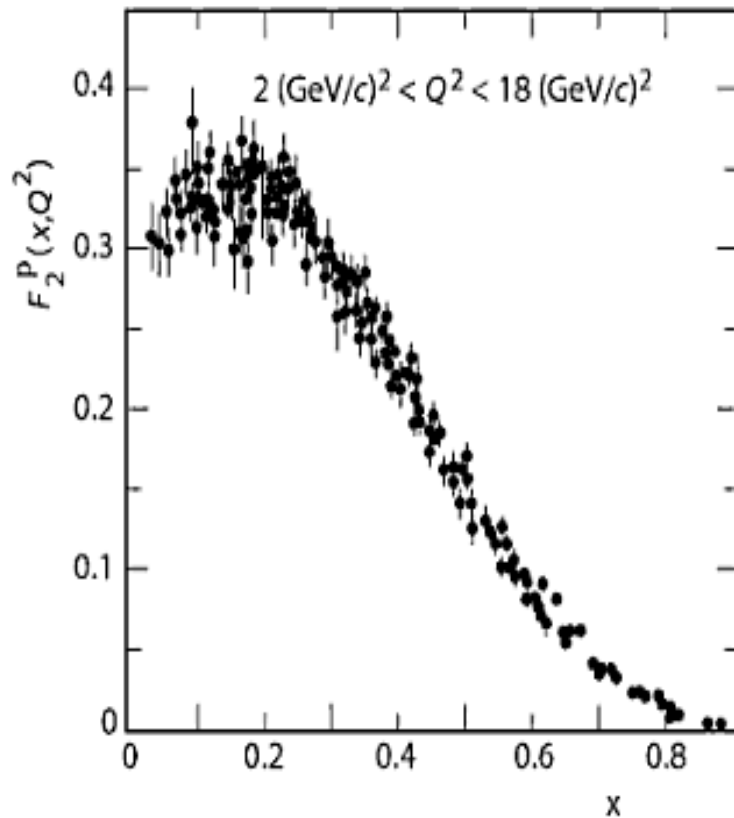


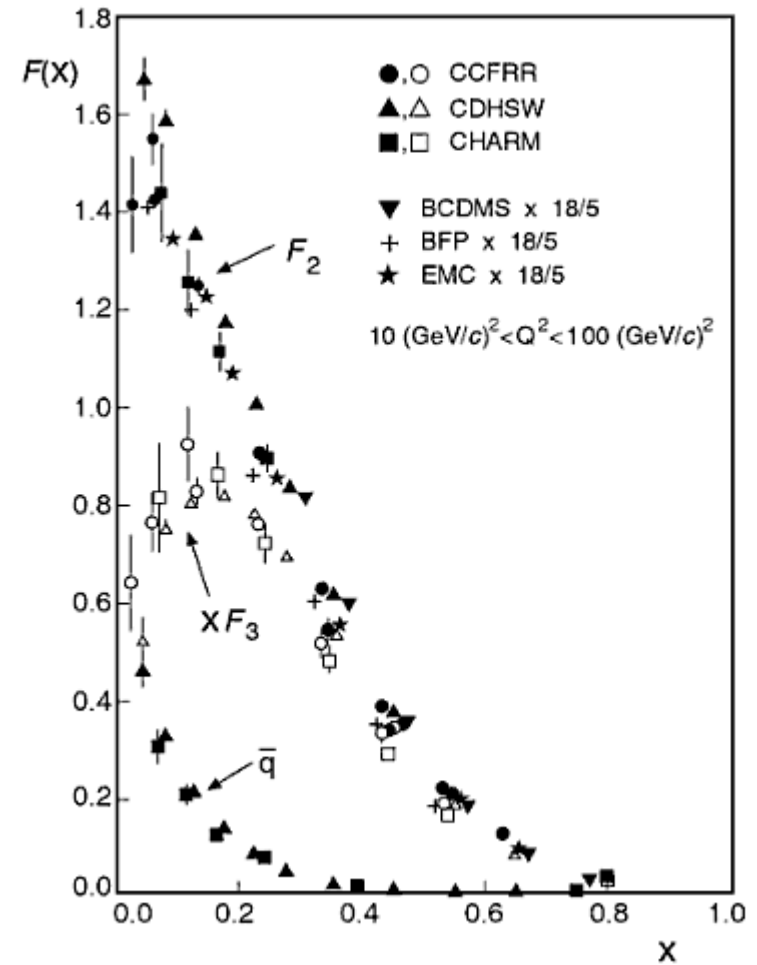
Fig. 1. The CCFR neutrino detector.

Ergebnisse des CCFR Experiments

- Gemessene Wirkungsquerschnitt:
 - E744/E770 $\sigma^{\bar{\nu}}/\sigma^{\nu} = 0.509 \pm 0.002 (stat.) \pm 0.012 (sys.)$
 $\sigma^{\nu Fe}/E_{\nu} = (0.677 \pm 0.014) 10^{-38} cm^2/GeV$
- Anzahl von ν Ereignissen: 1,300,000 (in E744/770)
- Anzahl von $\bar{\nu}$ Ereignissen: 270,000 (in E744/770)

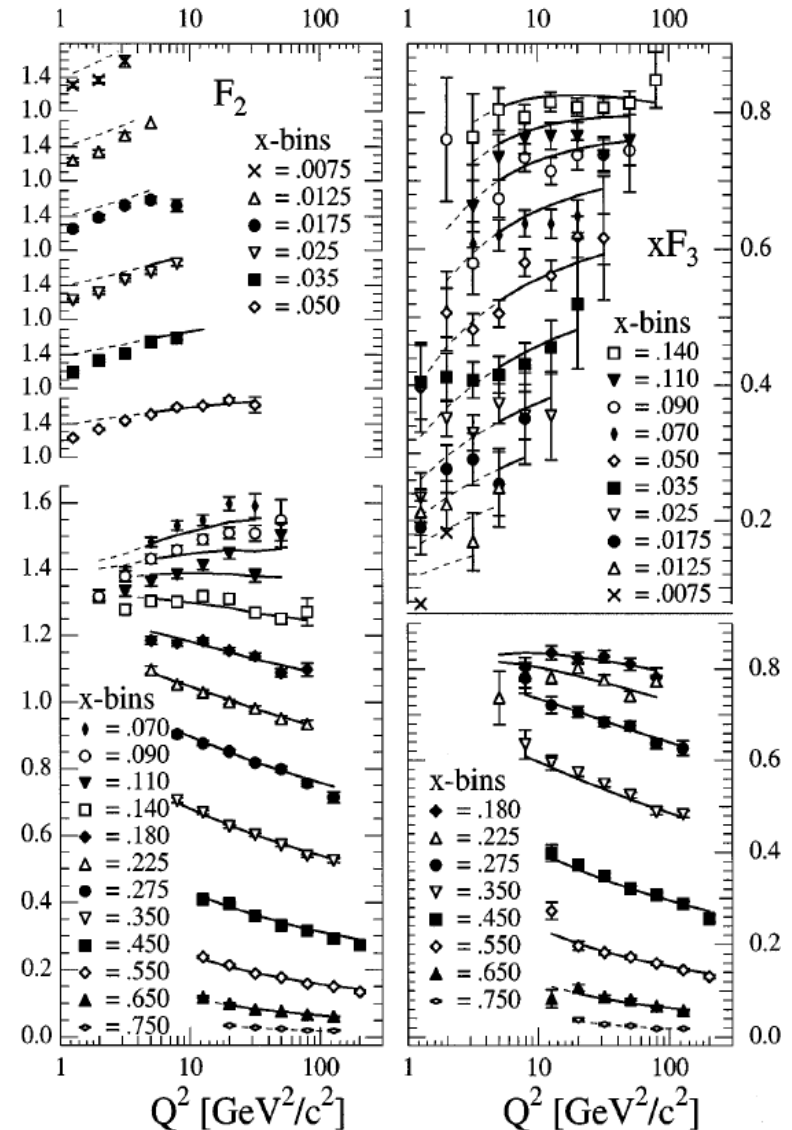
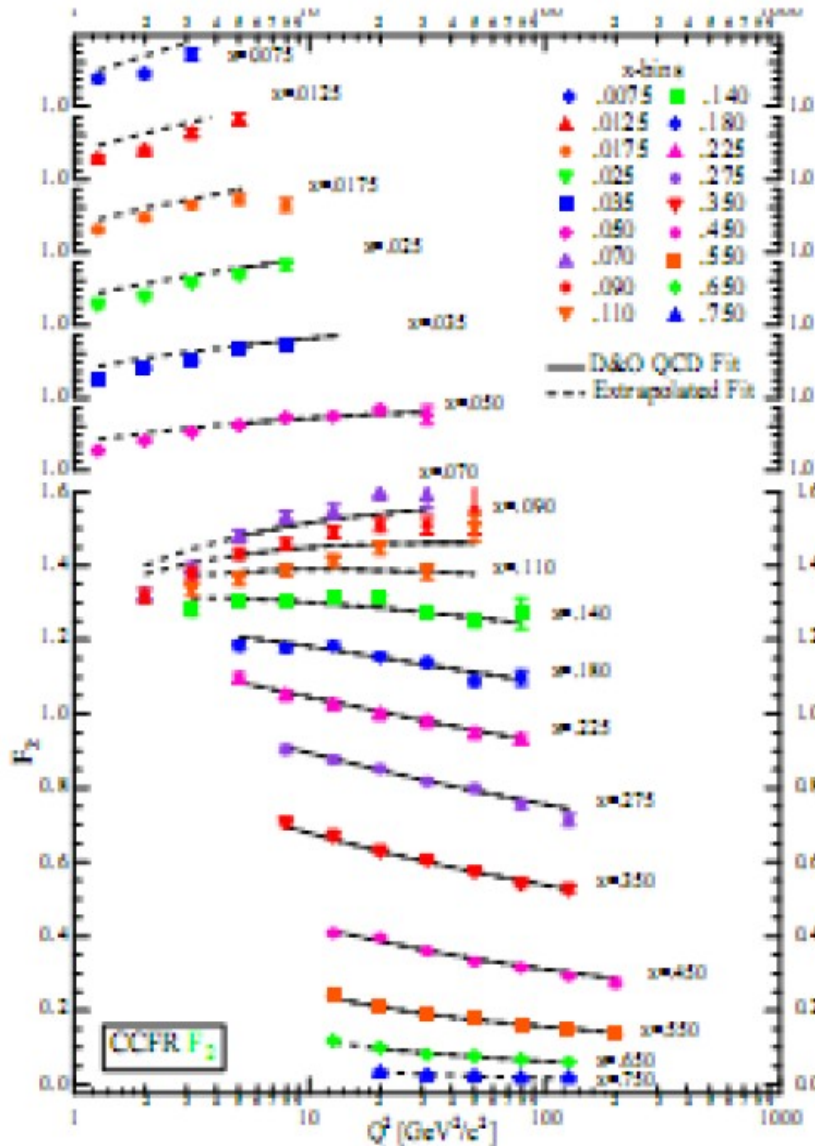


Gemessene Strukturfunktion F_2 des Protons als Funktion von x bei Q^2 -Werten zwischen $2 \text{ GeV}/c^2$ und $18 \text{ GeV}/c^2$



Vergleich der Strukturfunktionen, die man bei tiefinelastischer Streuung mit geladenen Leptonen und Neutrinos erhält. Neben der Strukturfunktion F_2 sind die Verteilungen der Antiquarks $\bar{q}(x)$, aus der sich die Seequarkverteilung ergibt, und die Verteilung der Valenzquarks (hier mit $xF_3(x)$ bezeichnet) angegeben

Messung von $F_2(x)/xF_3(x)$



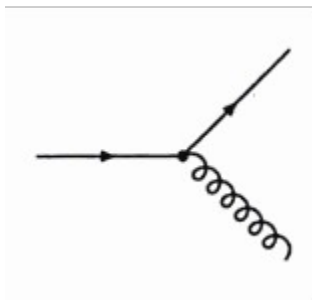
Deutung

- Es wurde angenommen, dass F_2 nur von x , nicht von Q^2 abhängt $\rightarrow$ punktförmige geladene Konstituenten
- Messungen von CCFR zeigen: leichte Q^2 -Abhängigkeit für feste x
 - Für kleine x steigt F_2 mit Q^2 , für große x fällt F_2 mit Q^2
 $\rightarrow$ Skalenbrechung

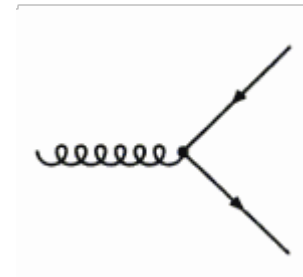
Erklärungsansätze der Skalenbrechung

- Skalenbrechung durch fundamentale Wechselwirkungs-Prozesse der Konstituenten mit sich selbst
 - Quarks können Gluonen abstrahlen/absorbieren
 - Gluonen können sich in $q\bar{q}$ Paare aufspalten

$$q \rightarrow q + g$$



$$g \rightarrow q + q$$



- Aktuelles Forschungsgebiet (NuTeV, HERA, etc.)

Quellen

- Povh, Rith, Scholz, Zetsche - Teilchen und Kerne(6. Auflage)
- N. Schmitz – Neutrinoophysik
- Phys. Rev. Lett. 79, 1213–1216 (1997), W.G.Seligman et. al.: Improved Determination of α_s from Neutrino-Nucleon Scattering,
- Rev. Mod. Phys. 70, 1341–1392 (1998), Conrad et. al.: Precision measurements with high-energy neutrino beams,
- Valerie Lang, Bestimmung der Nukleonstruktur mit CDHS (2007)
- W.G.Seligman, A Next-to-Leading-Order QCD Analysis of Neutrino-Iron Structure Functions at the Tevatron
- Nuclear Physics B - Proceedings Supplements , Yang et. al.: A measurement of $x F_3^\nu - x F_3^{\bar{\nu}}$ and R with the CCFR detector

Vielen Dank fürs Zuhören!