
Tests des Partonmodells und Neutrinoexperimente

Fernando Oster

Betreuer: Prof Norbert Herrmann

Seminar: Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

fernando@gmx.de

Heidelberg, den 24.04.2009

Gliederung

- Wiederholung tiefinelastischer eP-Streuung
- Partonmodell
- Neutrino-Proton-Streuung
- CCFR-Experiment am Fermilab
- Extraktion der Strukturfunktion
- Skalenbrechung der Strukturfunktionen

Zielsetzung

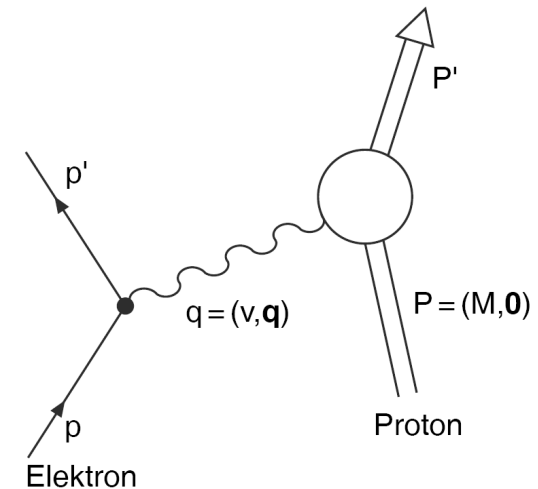
Auflösung der inneren Struktur von Nukleonen

Wirkungsquerschnitt bei tiefin. eP-Streuung

- Elektronen werden auf Protonen geschossen

$$\frac{d^2 \sigma}{d\Omega dE'} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Mott}} \left[\frac{1}{\nu} F_2(Q^2, x) + \frac{2}{Mc^2} F_1(Q^2, x) \tan^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

- Mott: Wirkungsquerschnitt für Spin $\frac{1}{2}$ Punktteilchen
- F_1 : magnetische Strukturfunktion
- F_2 : elektrische Strukturfunktion



Elektron-Proton-Streuung

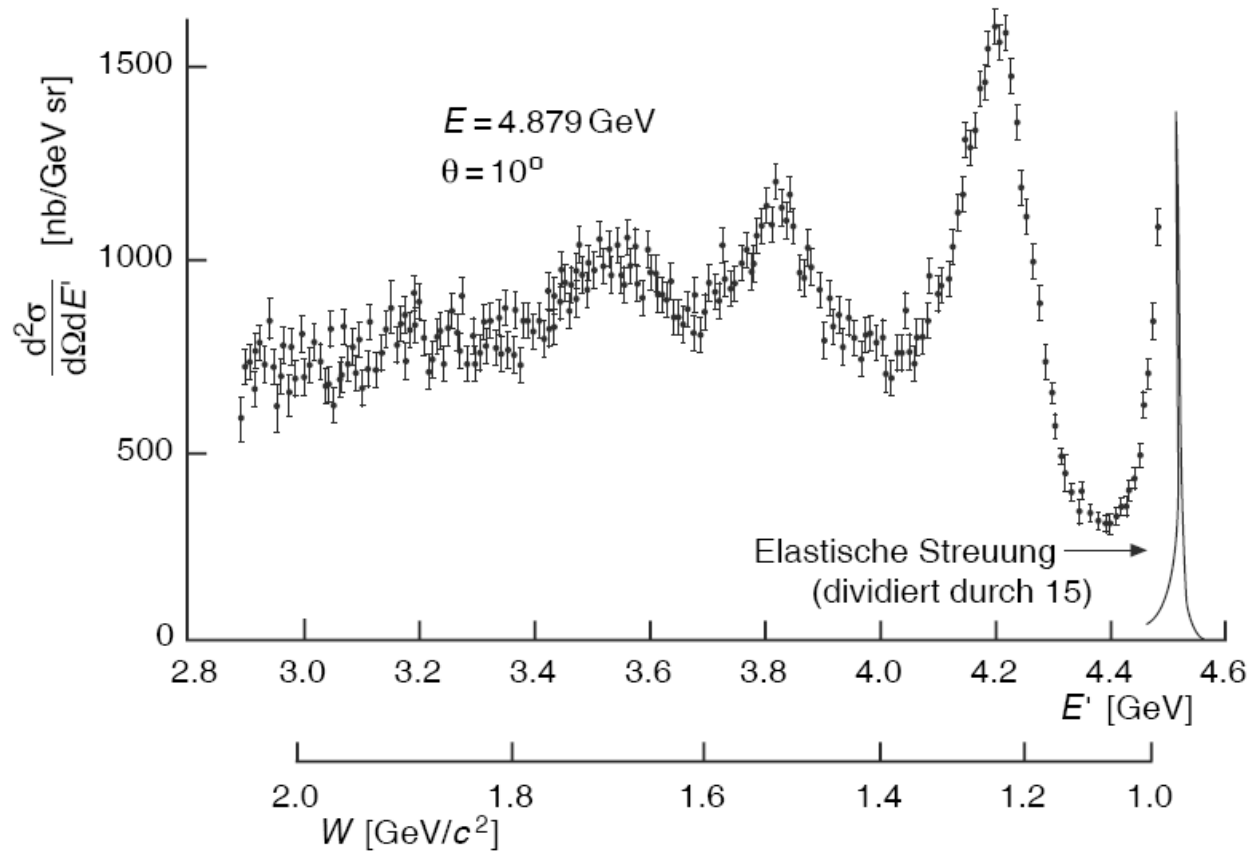


Abbildung 7.1. Spektrum der gestreuten Elektronen bei Elektron-Proton-Streuung, aufgenommen bei einer Elektronenenergie $E = 4.9 \text{ GeV}$ unter einem Streuwinkel $\theta = 10^\circ$ (nach [Ba68])

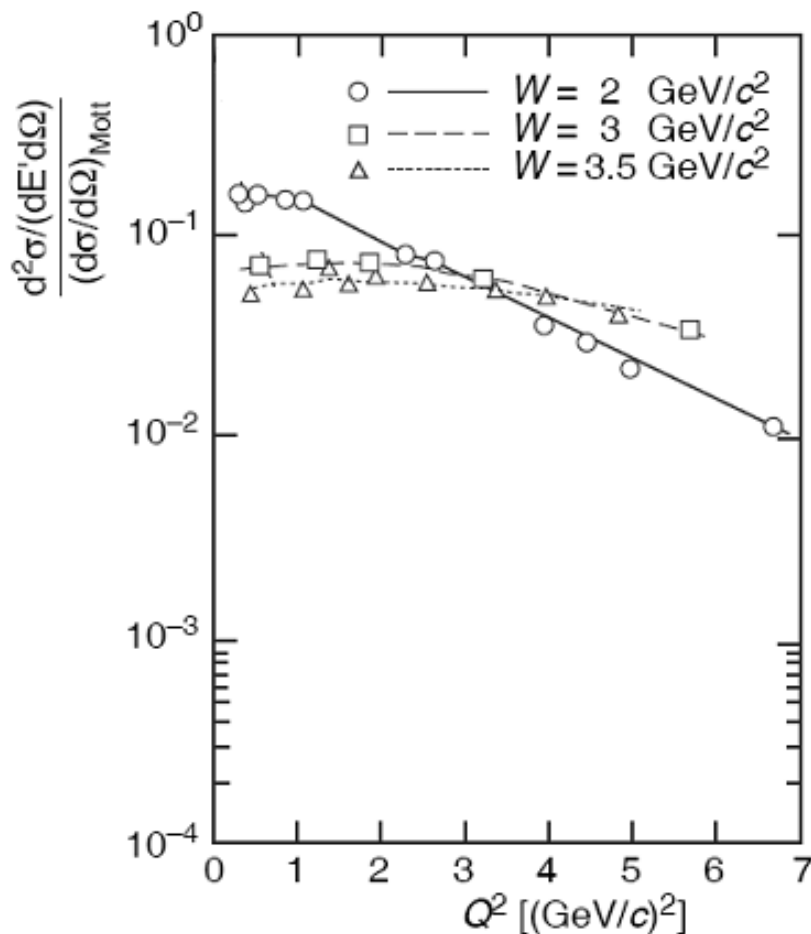
Ortsauflösung

$$\lambda = \frac{\hbar}{|q|} = \frac{\hbar}{\sqrt{Q^2}}$$

- Ortsauflösung gegeben durch reduzierte Wellenlänge des Austauschphotons
- Protonradius: Größenordnung **1 fm = 1 × 10⁻¹⁵ m**
- Bsp:

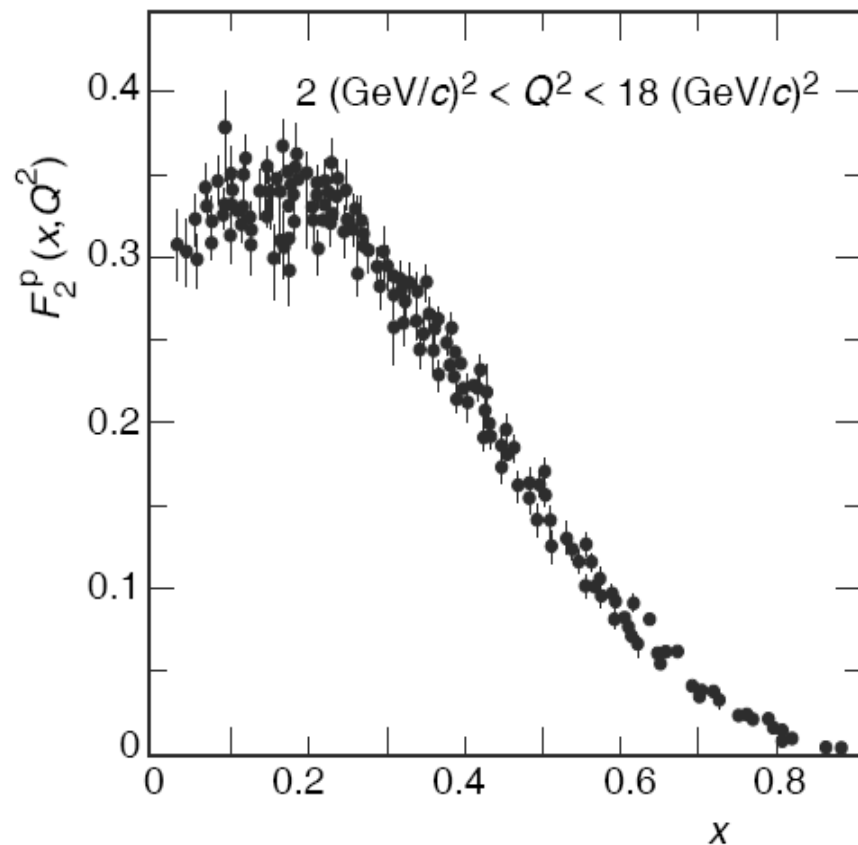
$$\lambda \simeq 10^{-17} \text{ m} \quad \text{für} \quad Q^2 = 4 (\text{GeV}/c)^2$$

Partonmodell



- Strukturfunktion unabhängig von Q^2
→ **Skaleninvarianz**
- Proton besteht aus punktförmigen Partonen
- Interpretation: Inelastische Streuung am Proton ist elastische Streuung an Partonen
- Partonen=Quarks
- Quark-Parton-Modell (QPM)

Gemessene Strukturinformation bei eP-Streuung



- Unabhängigkeit von Q^2 wieder zu beobachten
- x ist Bruchteil des Gesamtimpulses P eines Protons
- Wie kann man diese Strukturfunktion deuten?

Strukturinformation im QPM

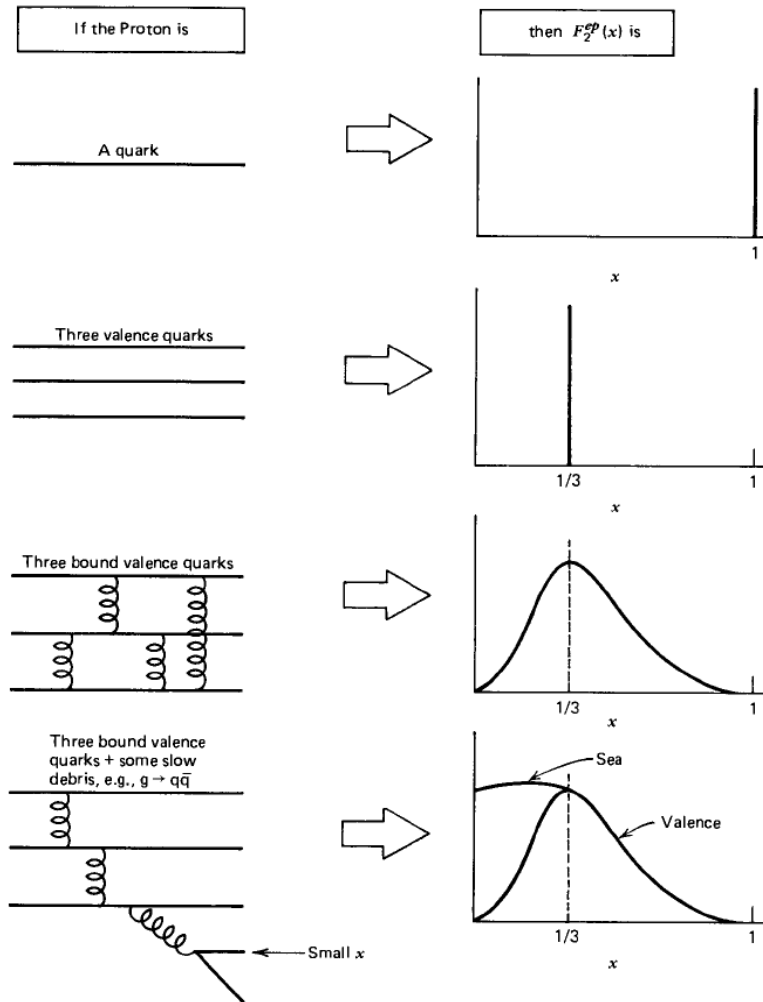


Fig. 9.7 The structure function pictured corresponding to different compositions assumed for the proton.

- x ist Bruchteil des Gesamtimpulses P eines Protons
- Enger Zusammenhang zwischen Impulsverteilung der Quarks und Strukturfunktion im WQ
- $xq(x)$: Impulsverteilung eines Quarks q im Proton

$$F_2(x) = x \cdot \sum_f z_f^2 (q_f(x) + \bar{q}_f(x))$$

→ Neutrinostreuung für die Unterscheidung von Valenz- und Seequarks

Gliederung

- Wiederholung tiefinelastischer eP-Streuung
- Partonmodell
- Neutrino-Proton-Streuung
- CCFR-Experiment am Fermilab
 - Extraktion der Strukturfunktion
- Skalenbrechung der Strukturfunktionen

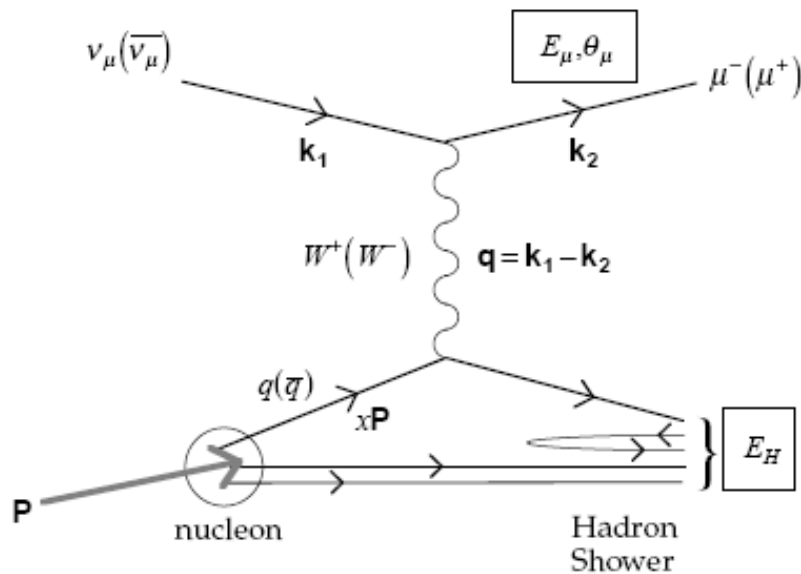
Jetzt

- Tiefinelastische Neutrino-Nukleon-Streuung
 - Untersuchung der Nukleonstruktur
- Wechselwirkung nun schwach und nicht em.
 - Unterscheidung von Valenz- und Seequarks
- Probleme
 - Sehr geringe Wirkungsquerschnitte
 - Wechselwirkungswahrscheinlichkeit sehr gering

Partonmodell bei Neutrino-Streuung

■ Kinematik

- Durch folgende Größen charakterisiert



Energieübertrag

$$E_H = E_\nu - E_\mu$$

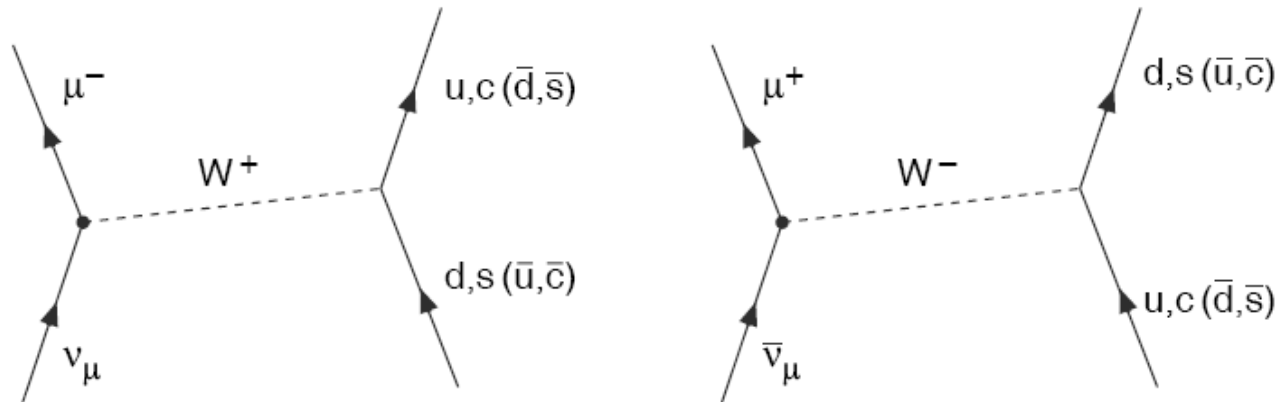
Bjorken SkalenvARIABLE x :

$$x = \frac{Q^2}{2 M_N E_H}$$

- y enthält Winkelabhängigkeit

$$y = \frac{E_H}{E_\nu}$$

Neutrinos



- Maximale Paritätsverletzung:
 - Linkshändige Neutrinos wechselwirken nur mit neg. geladenen linkshändigen Quarks und rechtshändigen Antiquarks
 - Rechtshändige Antineutrinos wechselwirken nur mit pos. geladenen rechtshändigen Quarks und linkshändigen Antiquarks
- verschiedene Winkelabhängigkeiten bei Neutrino-Quark und Neutrino-Antiquark Streuung

Strukturfunktion im QPM

- Wirkungsquerschnitte für Streuung an punktförmiges Quark

$$\nu q - \text{ oder } \bar{\nu} \bar{q} - \text{Streuung} : \frac{d\sigma}{dy} = \sigma_0$$

$$\nu \bar{q} - \text{ oder } \bar{\nu} q - \text{Streuung} : \frac{d\sigma}{dy} = \sigma_0 (1 - y)^2$$

- Im Proton gibt es Quarks mit verschiedenen Impulsverteilungen $q(x)$

$$\nu P - \text{Streuung} : \frac{d^2 \sigma}{dx dy} = x \sigma_0 \{ d(x) + s(x) + (\bar{u}(x) + \bar{c}(x)) (1 - y^2) \}$$

$$\bar{\nu} P - \text{Streuung} : \frac{d^2 \sigma}{dx dy} = x \sigma_0 \{ \bar{d}(x) + \bar{s}(x) + (u(x) + c(x)) (1 - y^2) \}$$

Strukturfunktion

- Wirkungsquerschnitt außerhalb des QPM
→ Strukturfunktionen, da Proton nicht punktförmig ist

$$\nu P - \text{Streuung} : \frac{d^2 \sigma}{dx dy} = \sigma_0 \left\{ (1 - y) F_2(x) + x y^2 F_1(x) + \left(y - \frac{y^2}{2} \right) x F_3(x) \right\}$$

$$\bar{\nu} P - \text{Streuung} : \frac{d^2 \sigma}{dx dy} = \sigma_0 \left\{ (1 - y) F_2(x) + x y^2 F_1(x) - \left(y - \frac{y^2}{2} \right) x F_3(x) \right\}$$

- Bemerkung: F_3 ist zusätzlicher Term im Vergleich zur em. WW, genau wegen der Paritätsverletzung

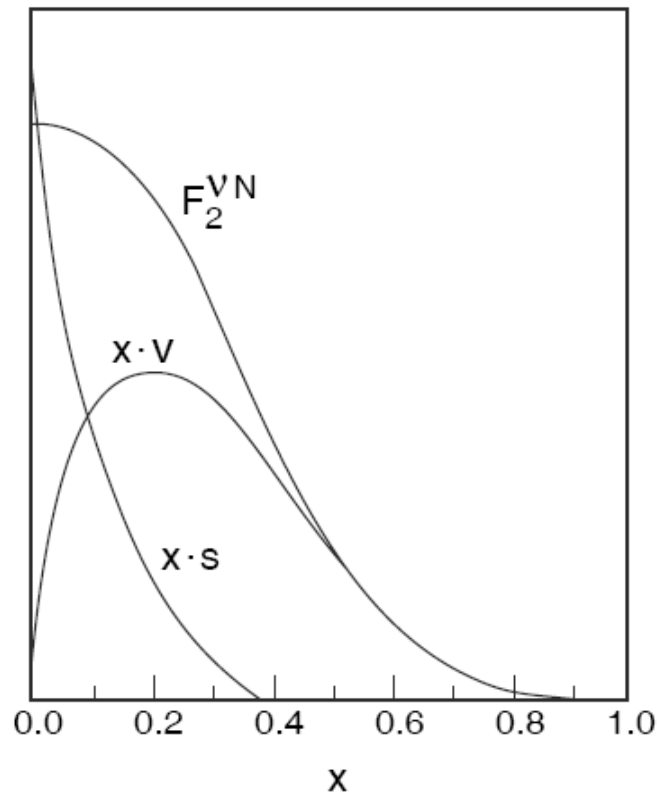
Ergebnis für Strukturfunktionen

- Vergleich der zu erwartenden Wirkungsquerschnitte im und außerhalb des QPM führt zu:

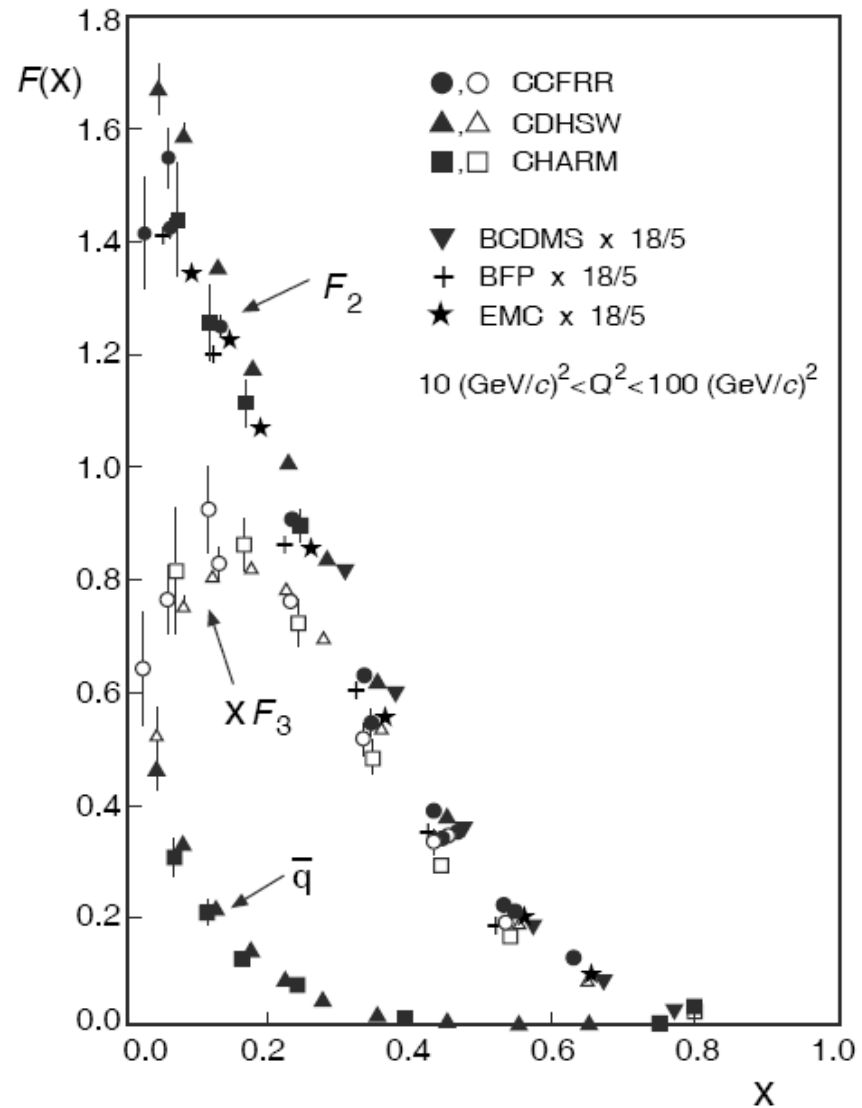
$$\mathbf{F}_3(\mathbf{x}) = \sum_i [\mathbf{q}_i(\mathbf{x}) - \bar{\mathbf{q}}_i(\mathbf{x})]$$

$$\mathbf{F}_2(\mathbf{x}) = \sum_i \mathbf{x} [\mathbf{q}_i(\mathbf{x}) + \bar{\mathbf{q}}_i(\mathbf{x})]$$

Ergebnisse



Schematisch



Gliederung

- Wiederholung tiefinelastischer eP-Streuung
- Partonmodell
- Neutrino-Proton-Streuung
- CCFR-Experiment am Fermilab
 - Extraktion der Strukturfunktion
- Skalenbrechung der Strukturfunktionen

CCFR Experiment

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

Experiment	Beam Energy (GeV)	target	ν events	$\bar{\nu}$ events	ref
CCFR (E616)	30-300	Fe	150,000	23,000	(MacFarlane <i>et al.</i> , 1984)
CCFR (E701)	30-300	Fe	35,000	7,000	(Auchincloss, <i>et al.</i> , 1990)
CCFR (E744/770)	30-360	Fe	1,300,000	270,000	(Seligman, 1997)

- Ziel: Tiefinelastische Neutrino-Nukleon-Streuung
- Wirkungsquerschnitte für Neutrino Reaktionen sehr gering
 - Größenordnung: 10^{-14} barn
- Bedürfnis hoher Targetmasse und hoher Strahlintensität

Neutrinostrahl

- Protonen treffen auf Target (zB. BeO)
- Erzeugung von Kaonen und Pionen aus Kernstößen
- Magn. Dipol: Selektion der Ladung der Teilchen
- Magn. Quadrupol: Fokussierung des Strahls
- Weiterleitung in Zerfallstunnel
- Lange Abschirmung (zB. Aus Eisen oder Erde) zur Absorption der verbliebenen Hadronen und Myonen (Ionisations- und Strahlungsverluste)
- Dichromatischer Strahl

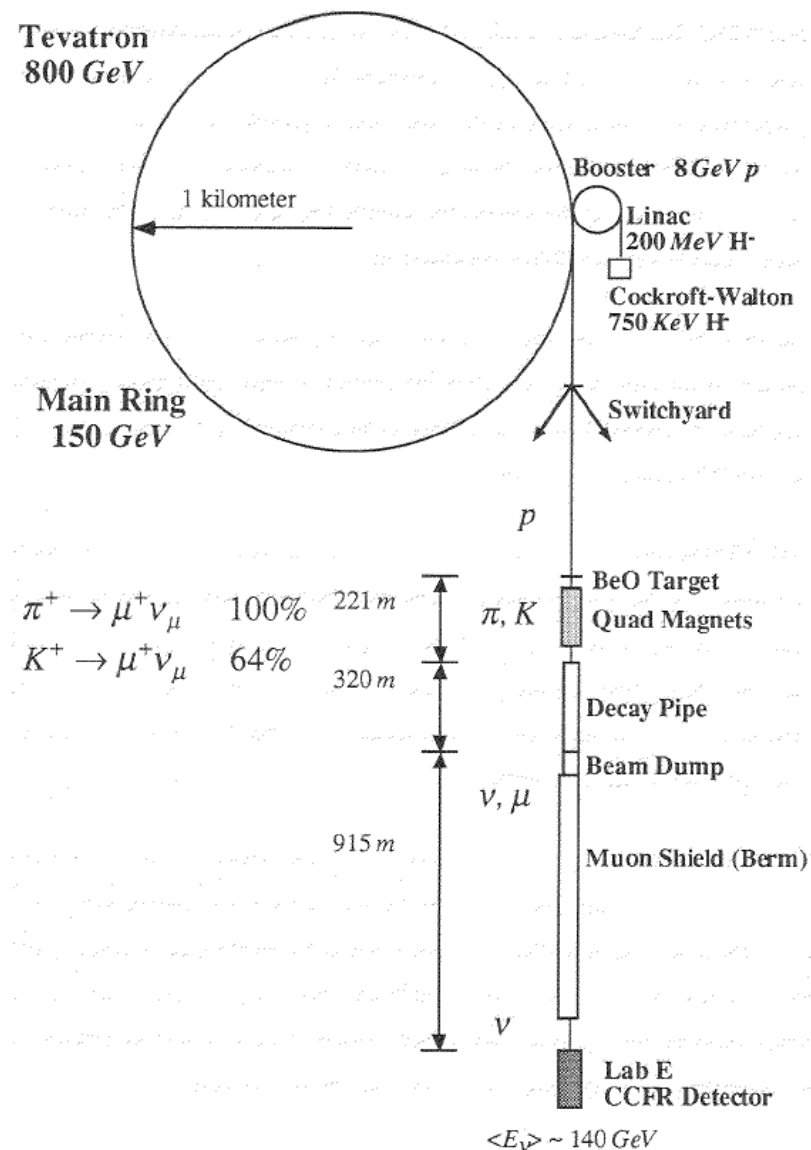


Figure 2.1: Fermilab neutrino beamline layout.

Motivation für die Länge des μ -Schilds

Bethe Bloch

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dL} = 1.3 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$$

$$E_{\mu} \approx 200 \text{ GeV}$$

$$\rho_{\text{Erde}} = 2.5 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

■ Abschätzung

$$E = \rho L 1.3 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2} \stackrel{!}{=} E_{\mu}$$

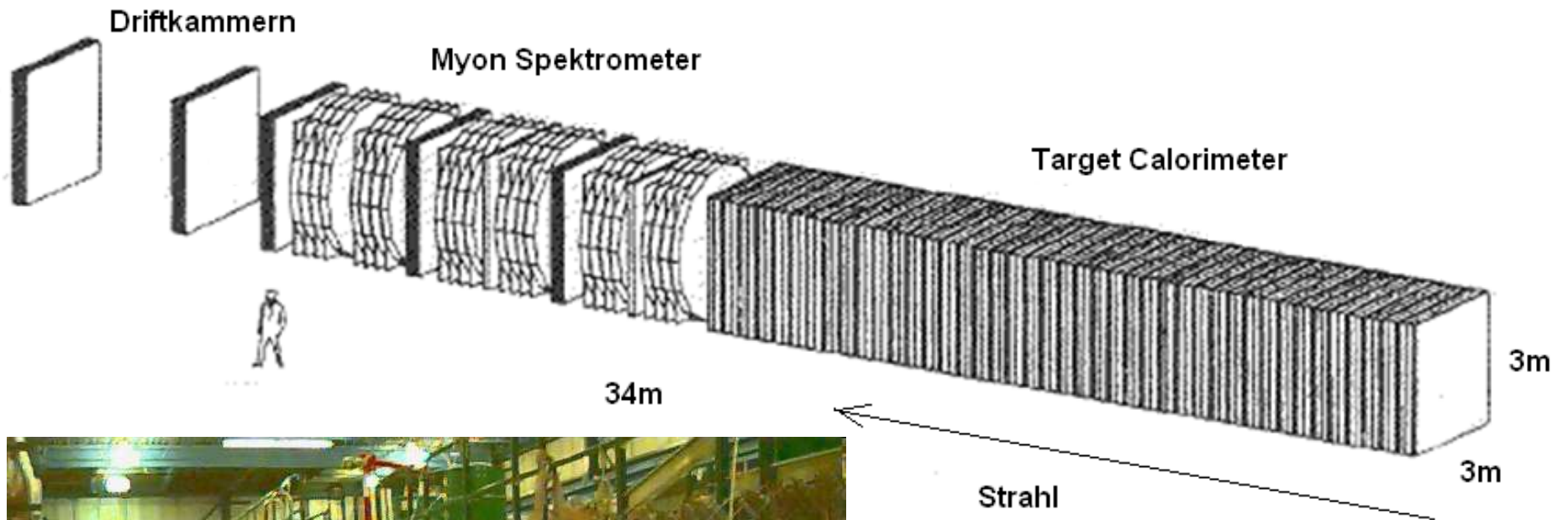
$$L = \frac{E_{\mu}}{1.3 \rho} \frac{\text{g/cm}^2}{\text{MeV}} = \frac{200}{1.3 \times 2.5} \times 10 \text{ m}$$

$$L = 615 \text{ m}$$

Größenordnungen

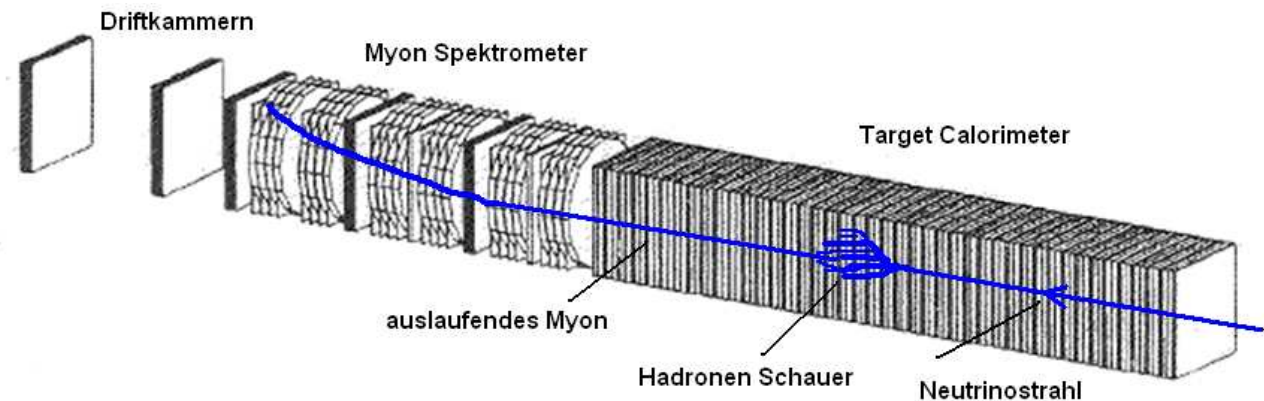
■ Größenordnungen:

- Mittlere freie Weglänge der Neutrinos in Stahl: 10^9 m
- Teilchenzahlen:
 - 10^{13} Protonen
 - 10^{12} π / K
 - 10^{10} ν
- Man beobachtet ungefähr 10 Ereignisse pro Ping (Paket)
- Teilchenfluss: Man misst die Ströme der Kaonen und Pionen und bestimmt indirekt den Fluss der Neutrinos



Detektor

Detektor



- **Gemessen: $E(\text{Hadronen})$, $p(\text{Myon})$, Winkel(Myon)**
- **Target Calorimeter**
 - ❑ Sandwich mit mehreren Lagen Target, Szintillator und Driftkammer
 - ❑ Target: 690 ton Stahl (WW zwischen Neutrino und Nukleon)
 - ❑ Szintillator: Energie- und Zeitmessung der erzeugten Hadronen
 - ❑ Driftkammern: Winkelbestimmung
- **Myon Spektrometer**
 - ❑ Toroidaler Magnet zur Impulsbestimmung des Myons
 - ❑ Driftkammern: Winkelbestimmung des Myons

Gliederung

- Wiederholung tiefinelastischer eP-Streuung
- Partonmodell
- Neutrino-Proton-Streuung
- CCFR-Experiment am Fermilab
 - Extraktion der Strukturfunktion
- Skalenbrechung der Strukturfunktionen

Extraktion de Strukturinformation

$$N = \rho L N_A \int_{x-bin} \int_{Q^2-bin} \left[\int_{all \text{ energies}} \frac{d^2 \sigma}{dx dQ^2} \Phi(E) dE \right]$$

N : Anzahl der Ereignisse

ρ : Dichte des Targets

L : Länge des Targets

N_A : Loschmidt – Zahl (Avogadro)

Wirkungsquerschnitt: $\frac{d^2 \sigma}{dx dQ^2} = \frac{d^2 \sigma}{dx dQ^2} (F_1, F_2, F_3)$

Strahlflussdichte : Φ

Modifizierte Callan-Groß-Beziehung

$$2 x F_1 = F_2 \frac{1 + 4 M^2 x^2 / Q^2}{1 + R}$$

Extraktion de Strukturinformation

- Wirkungsquerschnitte unterschiedlich für Neutrinos und Antineutrinos
- Umformen nach Strukturfunktion
- Zurückführung auf ein lineares Gleichungssystem
- Hier: enorme Vereinfachung, eigentl. sehr komplex

$$A^{\nu, \bar{\nu}} = \frac{G^2 M}{\pi} \iiint dx \frac{dQ^2}{2ME x} dE E \Phi^{\nu, \bar{\nu}}(E) \left(1 - y - \frac{Mxy}{2E_\nu} + \frac{y^2}{2} \frac{1 + 4M^2 x^2 / Q^2}{1 + R(x, Q^2)} \right)$$

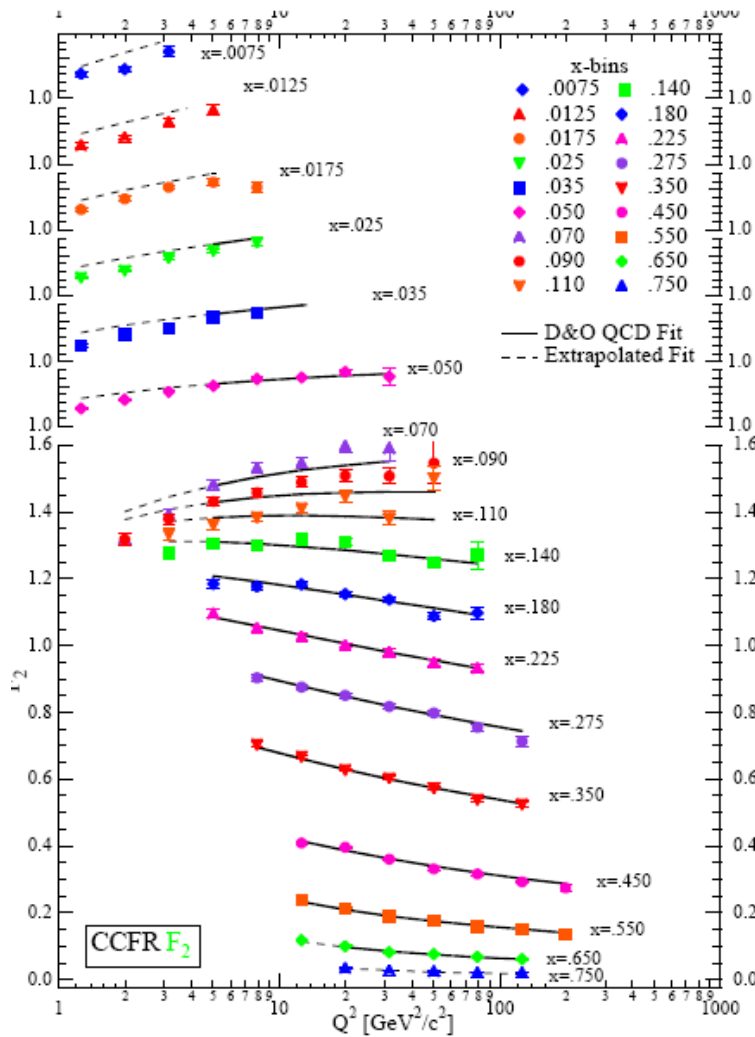
$$F_2(x, Q^2) = \left(B^{\bar{\nu}} N^{\nu} + B^{\nu} N^{\bar{\nu}} \right) / \det$$

$$xF_3(x, Q^2) = \left(A^{\bar{\nu}} N^{\nu} + A^{\nu} N^{\bar{\nu}} \right) / \det$$

Gliederung

- Wiederholung tiefinelastischer eP-Streuung
- Partonmodell
- Neutrino-Proton-Streuung
- CCFR-Experiment am Fermilab
 - Extraktion der Strukturfunktion
- Skalenbrechung der Strukturfunktionen

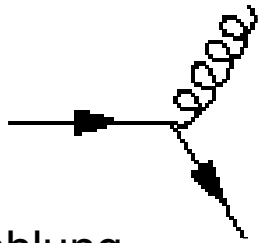
Skalenbrechnung



- Aktuelles Forschungsgebiet
- QCD, Quantenchromodynamik ist die quantenfeldtheoretische Beschreibung der starken Wechselwirkung
- Beschreibung der sogenannten Skalenbrechnung der Strukturfunktionen
 - Strukturfunktion zeigt doch leichte Q^2 -Abhängigkeit

Quantenchromodynamik

$$q \rightarrow q + g$$



Gluonbremsstrahlung

$$g \rightarrow q + \bar{q}$$



Paarerzeugung von Quarks
und Antiquarks

- Bei großen x nimmt F_2 mit steigender Auflösung Q^2 etwas ab
- Bei kleinen x nimmt F_2 mit steigender Auflösung Q^2 etwas zu

- **Wechselwirkung der Quarks
und Gluonen**

Zusammenfassung

- Skaleninvarianz der Strukturfunktion
→ Partonmodell
- ν N-Streuung zur Unterscheidung von Valenz- und Seaquarks (Paritätsbrechung)
- Wirkungsquerschnitte bei Neutrinostreuung winzig
- Ergebnisse der ν N-Streuung sind konsistent mit eP-Streuung einschließlich der Skalenbrechung

Quellen

- Teilchen und Kerne, Povh, Springer
- Neutrino-physik, Schmitz, Teubner
- Feynman-Graphen und Eichtheorien für Experimentalphysiker, Schmüser, Springer
- A Next-to-Leading Order QCD Analysis of Neutrino-Iron Structure Functions at the Tevatron, W G Seligman, Columbia University
- RevModPhys98_9707015v1
- <http://home.fnal.gov/~bugel/tour.html>
- http://www.e18.physik.tu-muenchen.de/skript/Grundzuge_Quantenchromodyna.html