

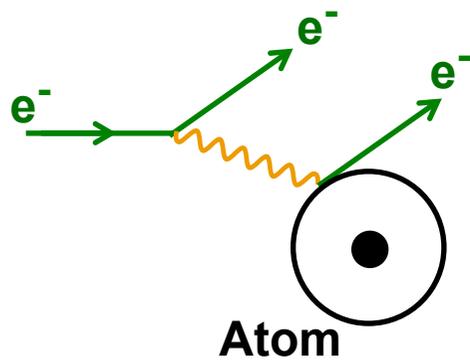
Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III
Vorlesung 7

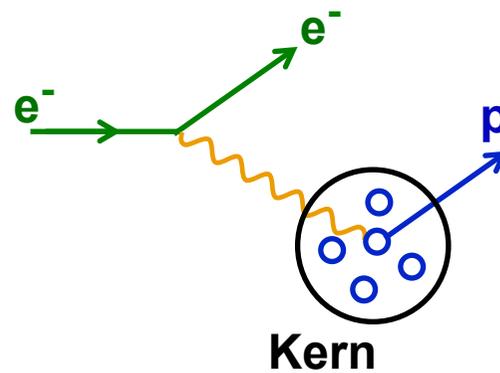
MICHAEL FEINDT
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Tief inelastische Streuung

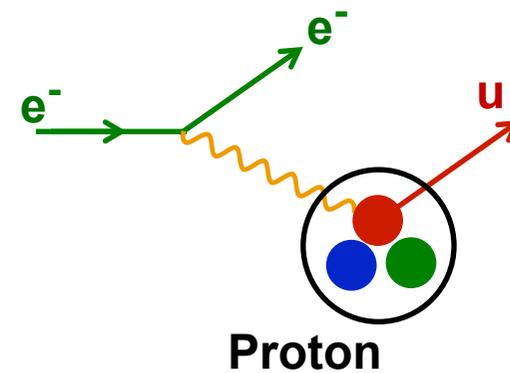
Atomphysik



Kernphysik



Teilchenphysik

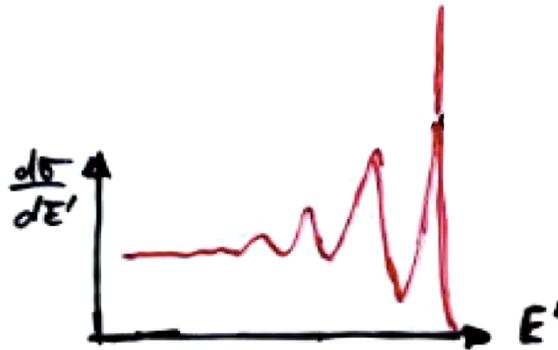


→ λ kleiner , Q^2 größer →

7.1 Nukleonresonanzen

- e p -
 - e n -
 - v N -
- } Streuung mit hoher Auflösung (< 1fm):

Bsp.:



Wirkungsquerschnitt hat
Maxima

⇒ **Substruktur !**

- Invariante Masse von angeregten Zuständen:

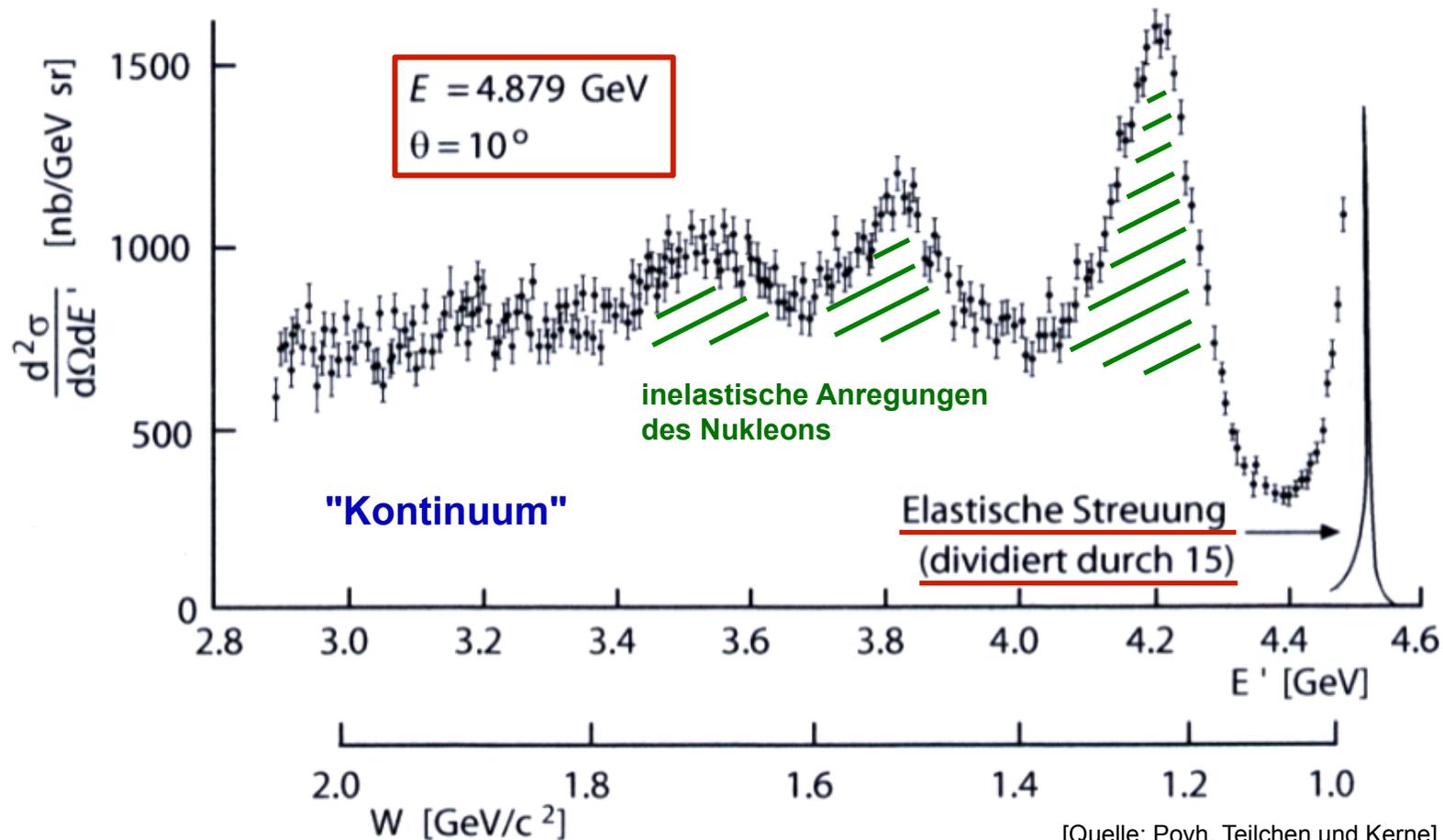
$$\begin{aligned}
 W^2 &= |\tilde{p}'|^2 = |\tilde{p} + \tilde{q}|^2 = M^2 + 2\tilde{P}\tilde{q} + \tilde{q}^2 \\
 &= M^2 + \underbrace{2M \cdot v}_{\text{Laborsystem}} - Q^2
 \end{aligned}$$

Laborsystem

$v := E - E'$

Nukleonresonanzen: ep – Streuung

- akzeptiere E' in variabel einstellbarem magnetischen Spektrometer
- Ereignisse zählen, normieren \Rightarrow WQ



[Quelle: Povh, Teilchen und Kerne]

Nukleonresonanzen

- **Energieübertrag ν :** lorentzinvariant:

$$\nu = E - E' = \frac{\tilde{\mathbf{P}} \cdot \tilde{\mathbf{q}}}{M}$$

Nukleon Photon

Proton im Laborsystem ruhend:

$$\tilde{\mathbf{p}} = \begin{pmatrix} M \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{q}} = \begin{pmatrix} E - E' \\ q \end{pmatrix} \Rightarrow \tilde{\mathbf{p}} \cdot \tilde{\mathbf{q}} = M \cdot (E - E') \Rightarrow \nu = E - E' = \frac{\tilde{\mathbf{P}} \cdot \tilde{\mathbf{q}}}{M}$$

Invariante Masse:

$$W^2 = M^2 + 2M(E - E') - 4EE' \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

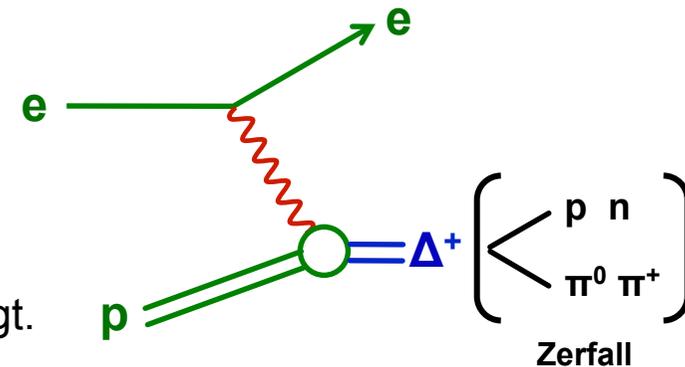
⇒ W aus E , θ und E' berechenbar

- 1. **Resonanz: $\Delta(1232)$:** $W = 1232$ MeV

Hier Δ^+ , da ep-Streuung keine Ladung überträgt.

Später auch Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^-

⇒ 4 Ladungszustände, $4 = 2I + 1 \Rightarrow$ Isospin $I = 3/2$



- **Breite** von Resonanzen: **instrumentell** oder **physikalische Eigenschaft?**

Auslösung in gemessene Größen θ , E , E'

⇓
oft Gauß-verteilt

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar \quad (\text{Unschärferelation})$$

$$\Gamma \cdot \tau = \hbar$$

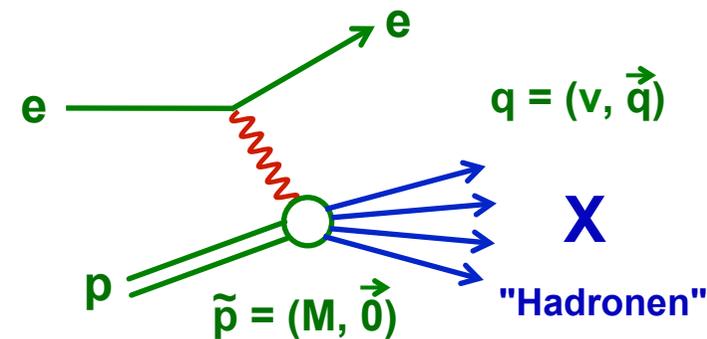
↳ Lebensdauer
↳ Resonanzbreite

$$\Delta^{++}: \Gamma \approx 100 \text{ MeV} \quad \tau = 5 \cdot 10^{-24} \text{ s} \quad (\text{Breit-Wigner-verteilt})$$

7.2 Strukturfunktionen

- $W \gtrsim 2.5 \text{ GeV}$:

keine Resonanzen mehr,
aber viele neue Hadronen
(inklusive Endzustände $e X$)



- **Elastische Streuung:** nur 1 freier Parameter

$$W^2 = \tilde{P}'^2 = M^2 + \underbrace{2M\nu - Q^2}_{=0} = M^2 \quad \text{E gegeben: } E', \theta, Q^2 \text{ korreliert}$$

also: $2M\nu - Q^2 = 0$

- **Inelastische Streuung:** Anregungsenergie : $W > M$ und $2M\nu - Q^2 > 0$

Dynamik wieder mit Formfaktoren beschrieben, die nun Strukturfunktionen heißen und von zwei unabhängigen Parametern abhängen:

(E', θ) oder (Q^2, ν)

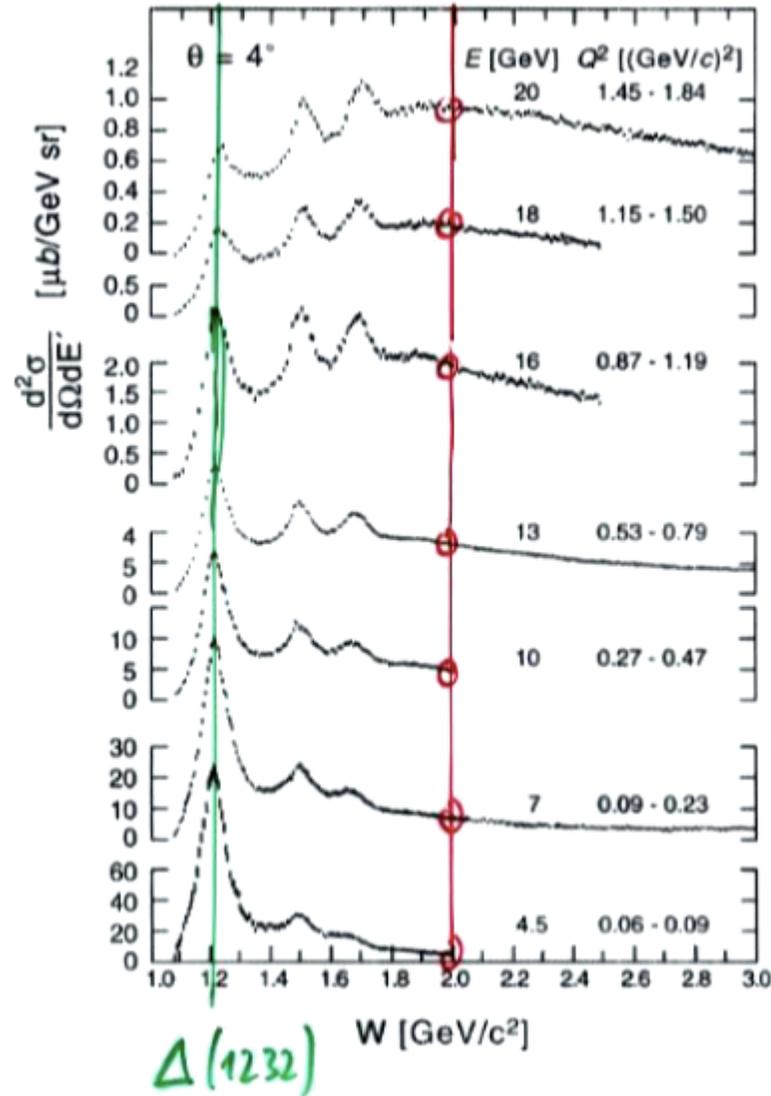
$$\frac{d\sigma}{dE' d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{Mott}^* \cdot \left[W_2(Q^2, \nu) + 2 \cdot W_1(Q^2, \nu) \tan^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

$W_1(Q^2, \nu)$ magn. WW
 $W_2(Q^2, \nu)$ elektr. WW

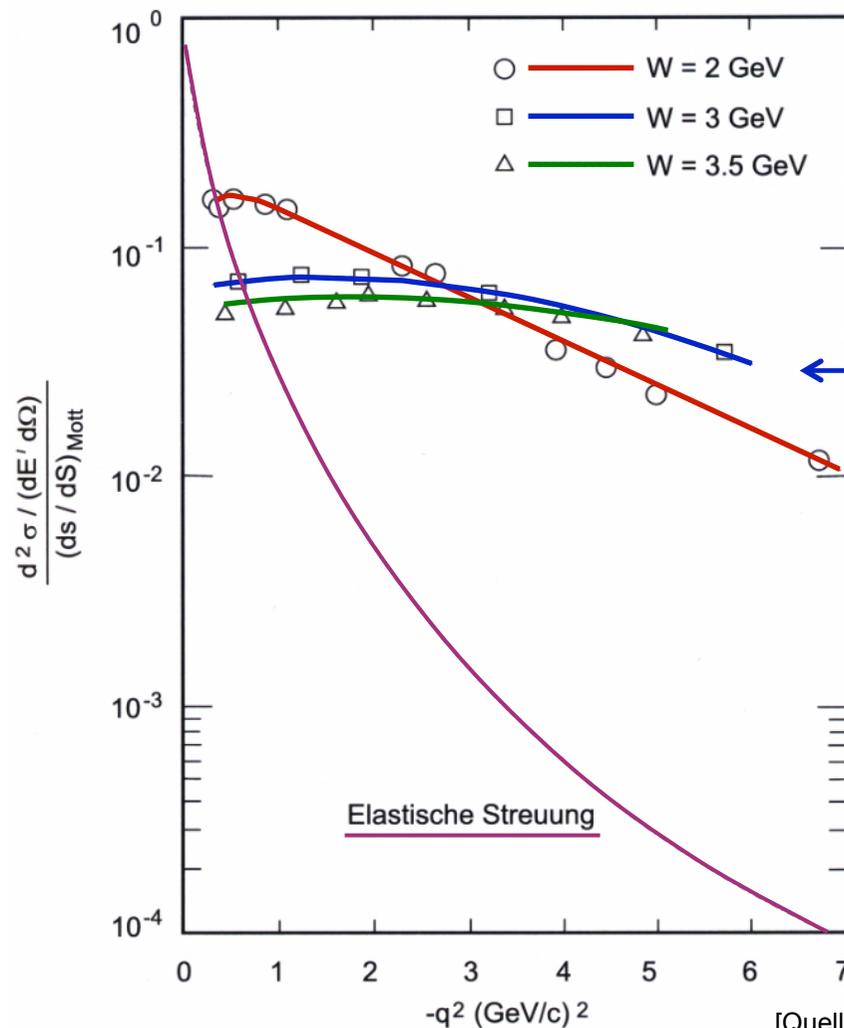
ep – Streuung, SLAC 1975

- $\theta = 4^\circ$, fest

○ :
 Schnitte für feste W
 ↓
 WQ (Q^2)



Verhältnis WQ-exp / Mott-WQ



Je größer W, desto langsamer der Abfall im WQ als Funktion von Q^2

fast konstant

Experimentelle Zählraten viel (>100 !) größer, als für elastische Streuung erwartet:

$\propto Q^{-8}$ aus Dipol-Formfaktor

[Quelle: Bethge, Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen]

Verhältnis WQ-exp / Mott-WQ

- Überraschung: $\sigma/\sigma_{\text{Mott}}$ fällt bei hohem W kaum mit Q^2 ab.
Dipol-Formfaktor hätte $\propto 1/Q^8$ erwarten lassen
- Führe **Björken'sche Skalenvariable x** ein

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

Grenzfall elastische Streuung: $W = M$, $Q^2 = 2M\nu \Rightarrow x = 1$
inelastische Streuung: $W > M$ und daher $0 < x < 1$

\Rightarrow x beschreibt dimensionslos die **INELASTIZITÄT** von Streuprozessen

- Verwende dimensionslose Strukturfunktionen F_1 und F_2 :

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

magn. WW

und

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

elektr. WW

\Rightarrow aus WQ kann man $F_1(Q^2)$, $F_2(Q^2)$ für feste x extrahieren (lange Messungen!)

zB. Graph $F_2^p(x, Q^2)$: \sim unabhängig von Q^2 ("Scaling").

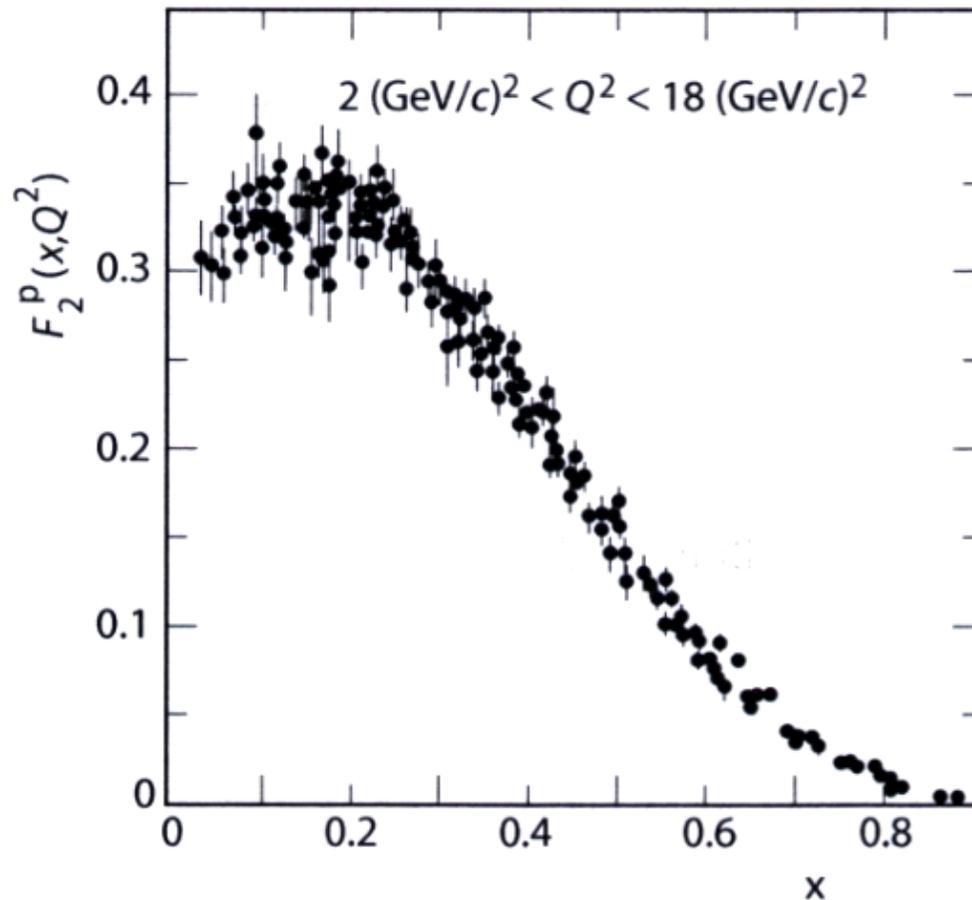
\Rightarrow Strukturfunktion $\hat{=}$ Fouriertransformierte der Ladungsverteilung

$F_2(Q^2) = \text{konst} \Leftrightarrow$ Ladungsverteilung = δ -Funktion

\Rightarrow **Man streut an punktförmigen Konstituenten im Proton!**

Strukturfunktion F_2 des Protons

- $F_2(x)$ für Q^2 zwischen 2 und 18 $(\text{GeV}/c)^2$



\approx unabhängig von Q^2 !

[Quelle: Povh, Teilchen und Kerne]

Tiefinelastische Streuung und die Entdeckung der Quarks



Die drei Spektrometer der MIT-SLAC-Experimente: vorne das 8GeV-Spektrometer, dahinter das 20 GeV-Spektrometer, ganz links am Rand ist gerade noch das 1.6 GeV-Spektrometer zu sehen.

Callan – Gross – Relation

■ Erinnerung $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\substack{\text{Dirac} \\ \text{Punkt} \\ \text{Spin } \frac{1}{2}}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} \cdot \left[1 + 2 \frac{Q^2}{4m^2 c^2} \tan^2 \frac{\theta}{2}\right]$ für elastische Streuung an Diracteilchen mit Masse m

■ vgl. mit: $\left(\frac{d\sigma^2}{d\Omega dE'}\right) = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}}^* \cdot \left[W_2(Q^2, \nu) + 2 W_1(Q^2, \nu) \tan^2 \frac{\theta}{2} \right]$

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

■ bilde $\frac{2W_1}{W_2}$: $\Rightarrow \frac{2W_1}{W_2} = \frac{2F_1/(Mc^2)}{F_2/\nu} = \frac{2F_1}{F_2} \frac{\nu}{(Mc^2)}$...

■ vgl. mit Dirac-Fall: ... $= \frac{2Q^2}{4m^2 c^2}$ mit $Q^2 = 2m\nu \Rightarrow m = \frac{Q^2}{2\nu} = x \cdot M$

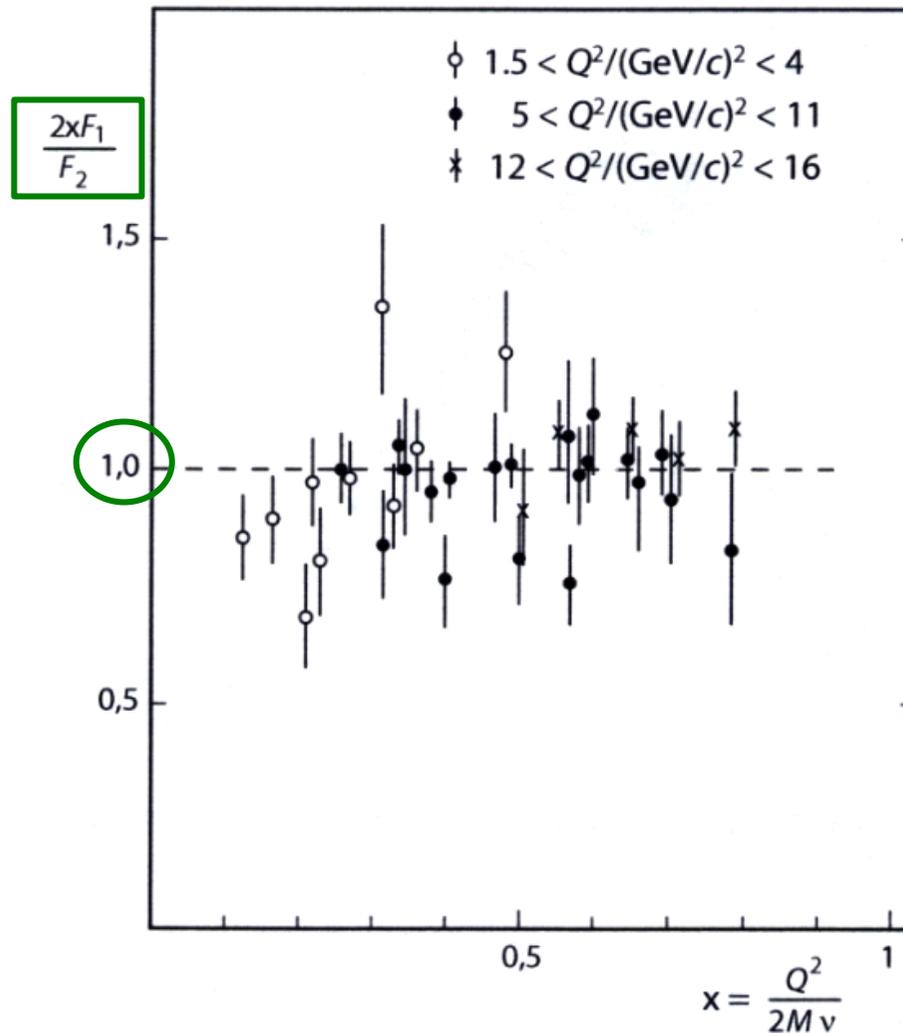
$$\Rightarrow F_2 = \frac{4m^2 c^2}{Q^2} \frac{\nu}{Mc^2} \cdot F_1 = \frac{4Q^2 c^2 \nu}{Q^2 4\nu^2 Mc^2} \cdot F_1 = \frac{Q^2}{M\nu^2} F_1 = 2x F_1$$

Falls man elastisch an punktförmigen Spin $\frac{1}{2}$ – Teilchen streut, sollte:

$$F_2(x) = 2x F_1(x)$$

Callan – Gross – Beziehung

Exp. Überprüfung der Callan – Gross – Relation



$F_2(x) = 2 \times F_1(x)$
für Spin $\frac{1}{2}$ -
Konstituenten



≈ erfüllt !

Die punktförmigen
Konstituenten der
Nukleonen haben
Spin $\frac{1}{2}$.

[Quelle: Povh, Teilchen und Kerne]

7.3 Parton – Modell

⇒ einfache Interpretation der tief inelastischen ep – Streuung

- wähle geeignetes Bezugssystem
- vernachlässige transversale Impulse und Ruhemassen der Konstituenten

⇒ **longitudinale Impulse** ⇔ **Struktur des Nukleons** (=Partonen)

- **"Partonen"** ≈ frei im Nukleon heute : geladene Partonen = Quarks
neutrale Partonen = Gluonen
- ep – Streuung = inkohärente Überlagerung von elastischen
 Elektron – Parton – Wechselwirkungen
 [Stoßnäherung, WW-Zeiten sind kurz, Teilchen im Endzustand
 keine Interaktion]
- Interpretation im **"Breit – System"**: x = Anteil des Vierer (und Dreier-)
 Impulses des Partons am
 Gesamtimpuls des Protons
- Auflösungsvermögen:

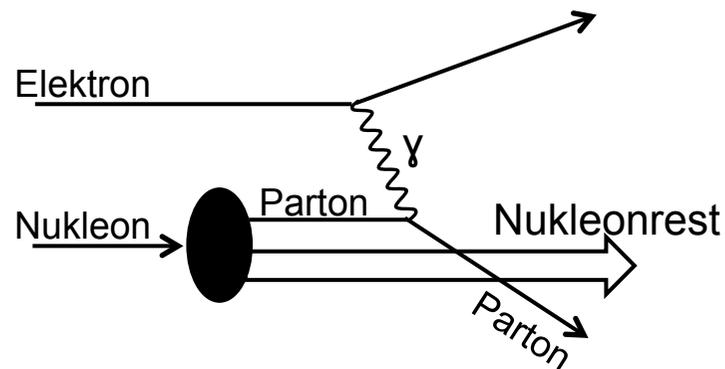
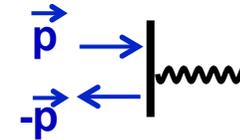
$$\lambda = \hbar / |\vec{q}|$$

im Laborsystem: $\tilde{\lambda}_L = \hbar / \sqrt{\frac{v^2}{c^2} + Q^2} \approx \hbar c / v = 2Mx\hbar c / Q^2$

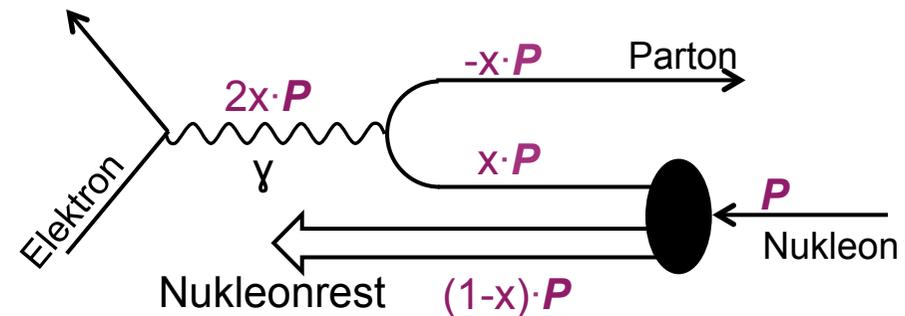
im Breit-System: $\tilde{\lambda}_B = \hbar / \sqrt{Q^2}$

Breit - System

- Breit – System = "brick wall frame"
 - Energieübertrag des virtuellen Photons = 0
 - Parton wird zurückgestreut wie an fester Wand



Labor – System



Breit – System:

virtuelles γ , überträgt nur Impuls, keine Energie

$$\tilde{q} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vec{q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2x\vec{P} \end{pmatrix}$$

anschaulich: $x = \frac{Q^2}{2M\nu} \Rightarrow x = \text{Bruchteil des Viererimpulses des Nukleons, der vom Proton getragen wird}$

Strukturfunktionen im Partonmodell

- Nukleon sei aus Quarktypen f aufgebaut. elektr. Ladung $z_f \cdot e$,
WQ für e.m.-Streuung $\propto z_f^2$
- Proton : uud , Neutron : udd ; Quantenzahlen durch "Valenzquarks" geg.
- Quarks haben Impulsanteile x
Verteilungsfunktion: $q_f(x) = \mathbf{E}$ (Zahl der Quarks mit Flavour f im
Impulsintervall $[x, x+dx]$)
- Neben Valenzquarks sind auch "Seequarks" (virtuelle $q\bar{q}$ -Paare) im Nukleon
vorhanden: $\bar{q}_f(x) =$ Verteilungsfunktion von f -Antiquarks
- Neutrale Konstituenten : Gluonen: $g(x)$

⇒ $F_2(x) = \Sigma$ der mit x und z_f^2 gewichteten Impulsverteilungen (pro Nukleon)

⇒
$$F_2(x) = x \cdot \sum_f z_f^2 \cdot (q_f(x) + \bar{q}_f(x))$$
 [$F_2 \leftarrow W_2 \leftarrow$ elektrischer Anteil der WW]

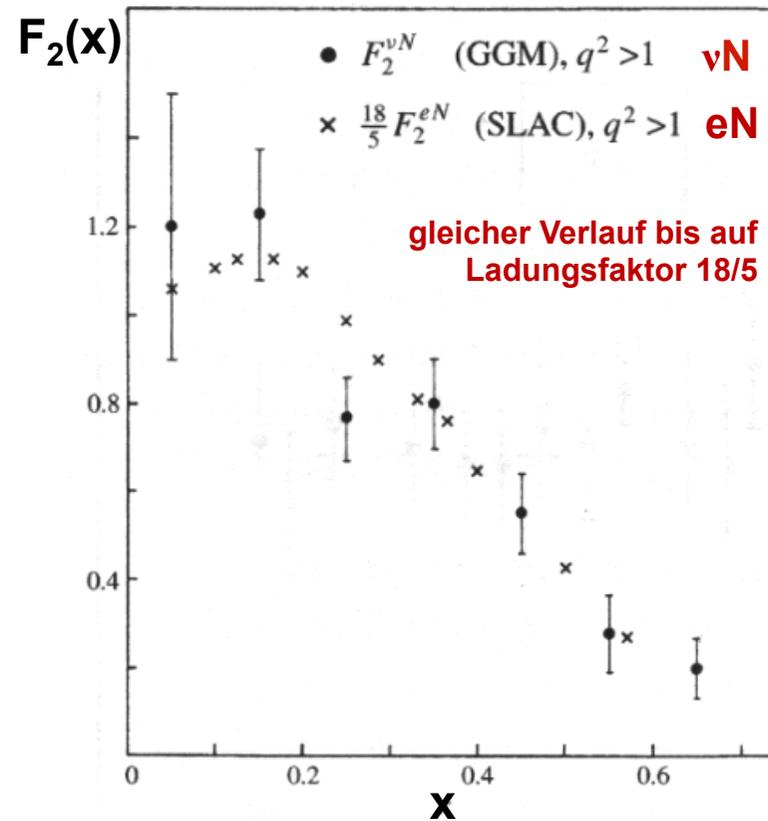
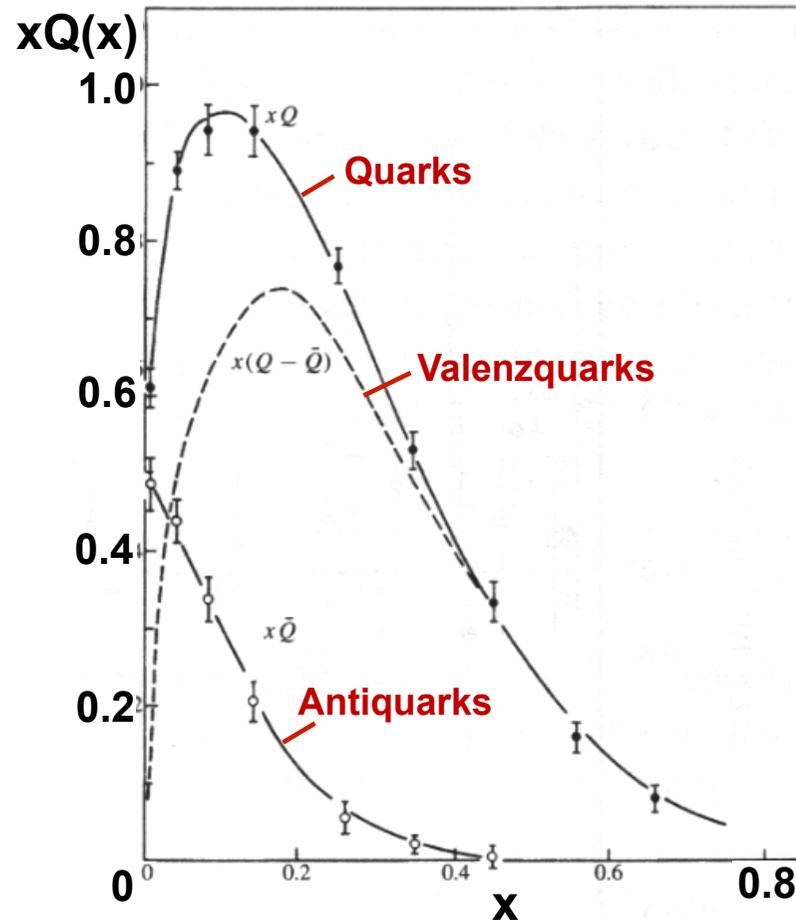
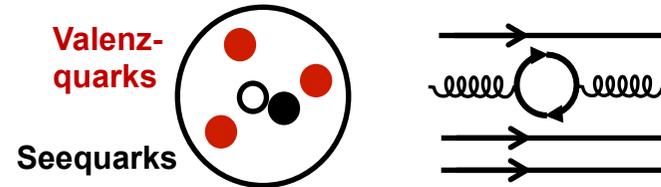
$F_2^p(x) \leftarrow$

$\rightarrow F_2^D(x) = (F_2^p(x) + F_2^n(x)) / 2 = F_2^N(x)$

Exp. Bestimmung aus Streuexp. an H-, D-Kernen ⇒ Auswirkungen des Kernverbands
 mit e, μ oder ν (koppelt an schwache Ladung) EMC-Effekt (unverstanden)

Resultate zu Strukturfunktionen

- aus eN- und ν N- Streuung



[Quelle: Perkins, Introduction to High Energy Physics]

Partonen-Impulsverteilung im Nukleon

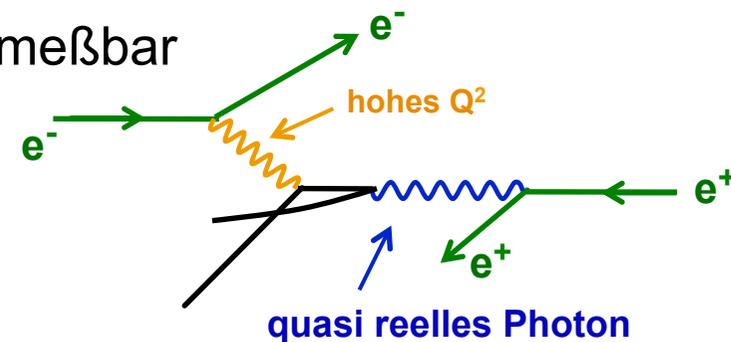
$$\int_0^1 F_2^{vN}(x) dx \approx \frac{18}{5} \int_0^1 F_2^{eN}(x) dx \approx 0.5$$

⇒ ca. 50% des Nukleon-Impulses wird von Teilchen getragen, die weder schwach noch elektromagnetisch wechselwirken.

⇒ Gluonen , $g(x)$

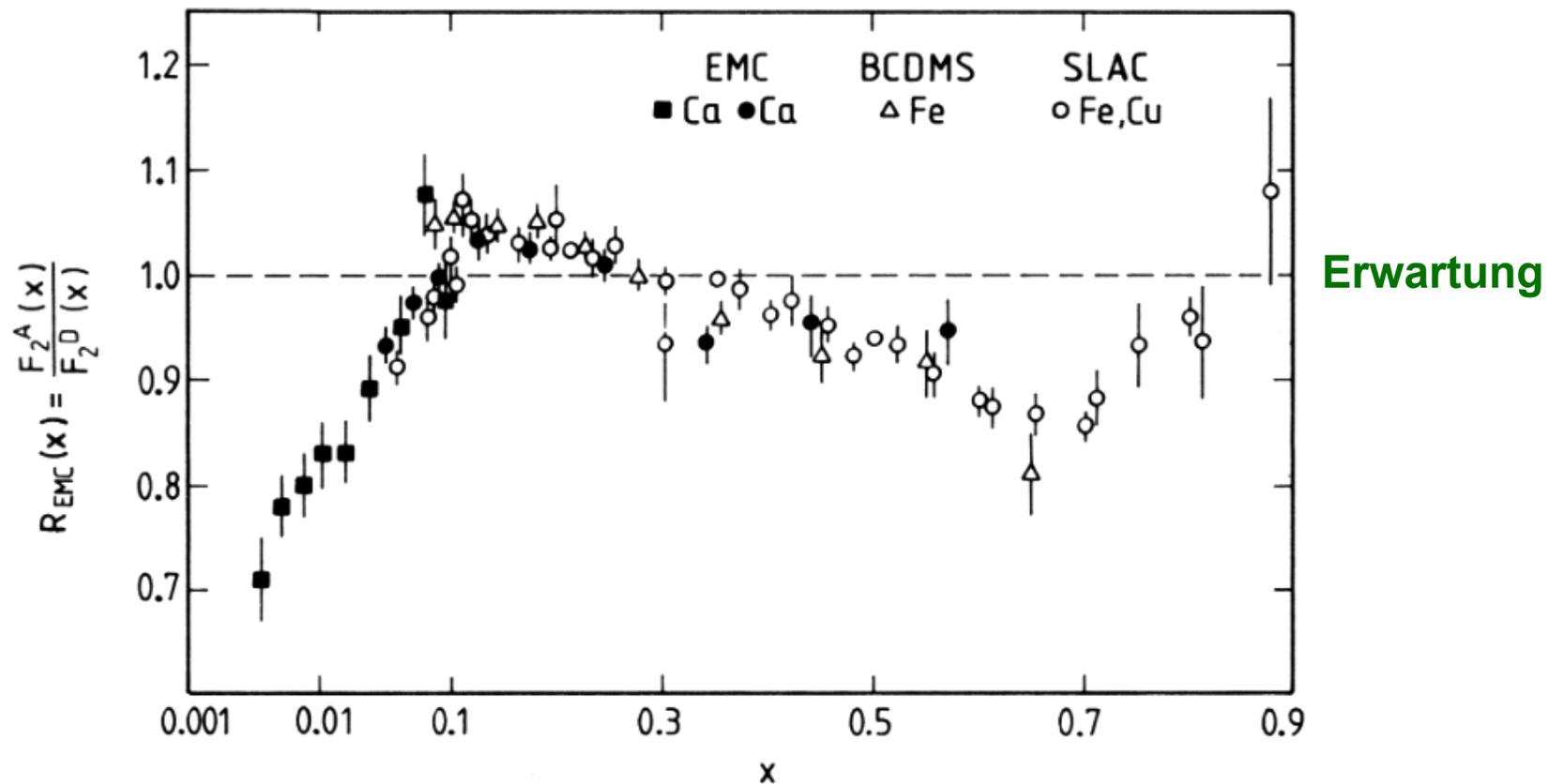
⇒ auch Spin – Strukturfunktionen
 Gluon – Strukturfunktionen

Strukturfunktion des Photons meßbar
 (nur Seequarks)



EMC - Effekt

- $F_2(\text{Ca}) / F_2(\text{D})$ ist nicht konstant
- Ursache und A-Abhängigkeit nicht verstanden



[Quelle: Bethge, Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen]