

## • Tief-inelastische Streuung

**Kinematik:**  $W^2 = M^2 - Q^2 + 2M\nu$

**elast. Streuung:**  $W^2 = M^2 \Rightarrow x = \frac{Q^2}{2M\nu} = 1$

**inelastische / tief-inelastische Streuung:**  $W^2 > M^2 \Rightarrow 1 > x > 0, x = \frac{Q^2}{2M\nu}$

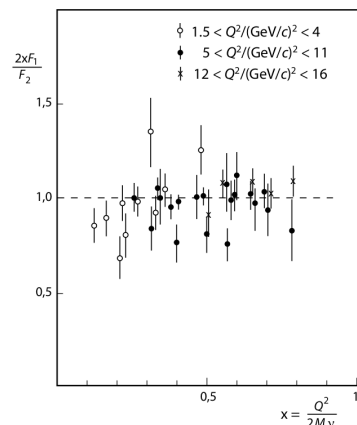
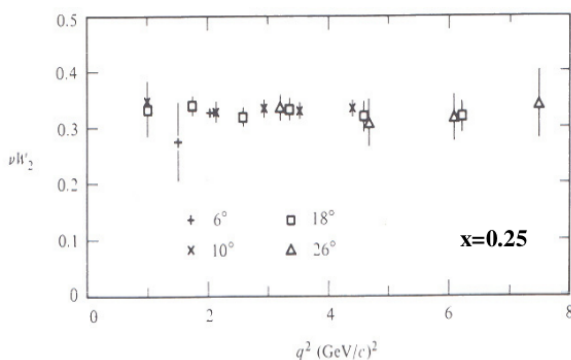
$$\left( \frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'} \right) = \left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{Mott}^* \cdot [W_2(Q^2, \nu) + 2W_1(Q^2, \nu) \tan^2(\theta/2)]$$

- Abhängigkeit von zwei Variablen (inelastische Streuung)
- Strukturfunktionen  $W_2(Q^2, \nu)$ ,  $W_1(Q^2, \nu)$ , bzw.  $F_2(x, Q^2)$ ,  $F_1(x, Q^2)$  (dimensionslos)

### Beobachtung: Praktisch keine $Q^2$ -Abhängigkeit der Strukturfunktionen

⇒ Punktförmige Konstituenten (Partonen) im Nukleon

⇒ Spin-1/2-Teilchen (Callan-Gross-Relation)



255

## Tief-inelastische Streuung - Partonen -

**tiefinelastische Streuung am Parton = inkohärente Summe der WW des virtuellen Photons mit individuellen Partonen (elastische Streuung an Konstituenten des Protons); Partonmodell (Feynman 1969)**

**Solange die Konstituenten (im Rahmen der Auflösung) punktförmig sind, besitzen sie keine Substruktur und können daher nicht angeregt werden  
→ nur elastische Streuung möglich, bei der die Identität der Streupartner nicht geändert wird**

**Wirkungsquerschnitt abhängig von einer Zahl x  
(dimensionslos; keine Massen-, Längen- oder Energieskalen involviert!)**

**Skaleninvarianz!**

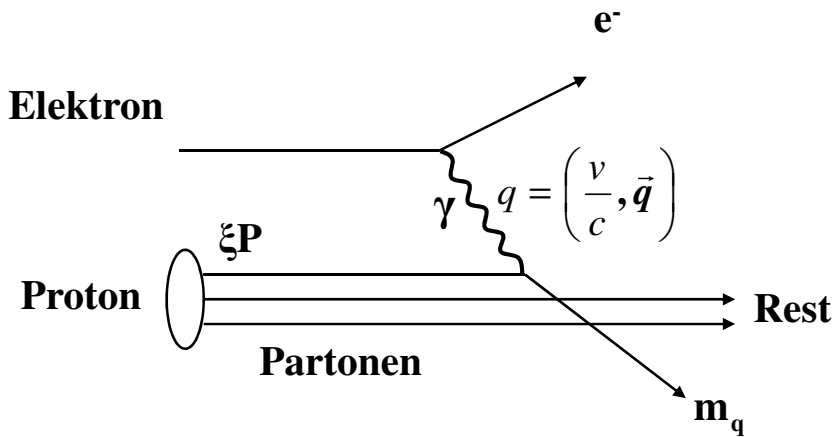
**Partonen werden heute mit den Quarks identifiziert**

**Erste Evidenz für Quarks: Aus der Beobachtung von Mesonen und Baryonen (Bindungszustände der starken WW) ... etwas später in der VL ....**

256

## Tief-inelastische Streuung - Partonmodell -

### Interpretation im Partonmodell: Was ist die Bedeutung von x ?



Betrachtung im „infinite momentum frame“ d.h. schnell bewegtes Nukleon, Transversalbewegung der Partonen vernachlässigbar

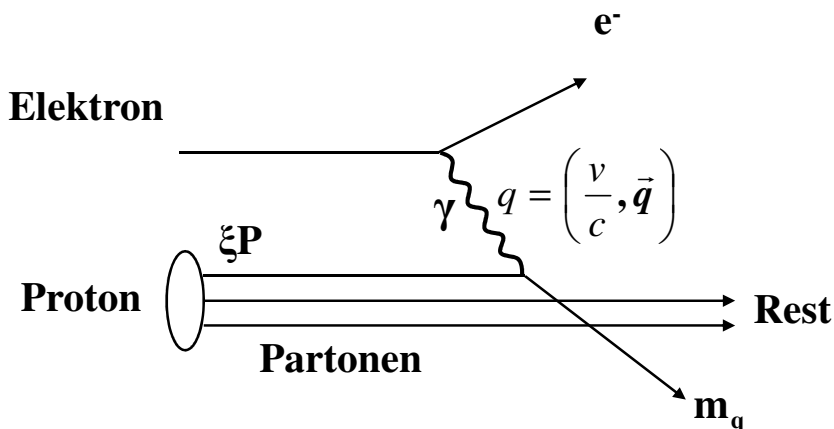
Parton hat den Anteil  $\xi P$  des 4-Impulses des Protons

Wechselwirkung des Elektrons mit dem Proton = inkohärente Summe der Wechselwirkung mit den Partonen (elastische Streuung)  
(Stoßnäherung)

257

## Tief-inelastische Streuung - Partonmodell -

### Interpretation im Partonmodell: Was ist die Bedeutung von x ?



Betrachtung im „infinite momentum frame“ d.h. schnell bewegtes Nukleon, Transversalbewegung der Partonen vernachlässigbar

Parton hat den Anteil  $\xi P$  des 4-Impulses des Protons

$(\xi P + q)^2 = (m_q c)^2 = 4 \text{er-Impuls-Quadrat des herausgeschossenen Partons}$

$$\xi^2 P^2 + 2\xi P \cdot q + q^2 = m_q^2 c^2 \approx 0$$

Da tiefinelastischer Prozess:  $|\xi^2 P^2| \ll q^2 \rightarrow \xi = -\frac{q^2}{2P \cdot q} = \frac{Q^2}{2Mv} = x$

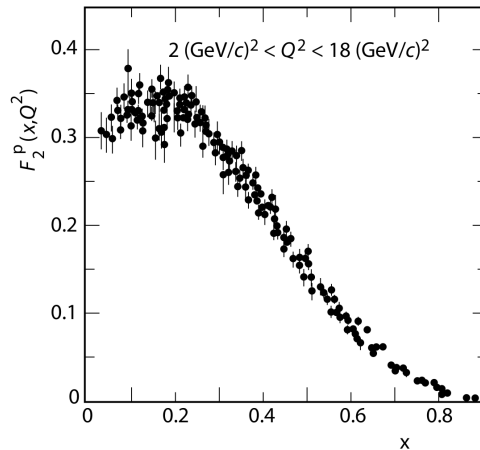
=> x: Bruchteil des Viererimpulses des Protons, der von einem Parton getragen wird (Stoßnäherung, kein Transversalimpuls,  $m_q \approx 0$ )

258

$x$ : Bruchteil des 4er-Impulses des Protons der vom Parton getragen wird

⇒ Messung von  $F_1(x)$ ,  $F_2(x)$

→ Bestimmung der Impulsverteilungen der Partonen im Nukleon



$$x = \frac{Q^2}{2M\nu}, \quad 0 \leq x \leq 1$$

1) Experimentell: Was beobachtet man?

2) Beobachtungen → Quarkverteilungen im Nukleon

259

## Hadronisierung bei inelastischer Streuung

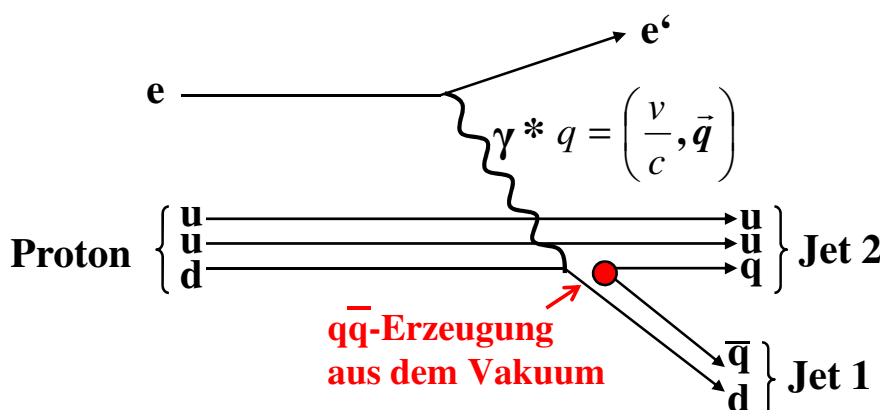
Nach Streuung an Parton kein freies Parton (Quark) im Endzustand beobachtet (confinement)

tief inelastische  $e^-p$  –Streuung = 2-Stufenprozeß

1.) elastische  $eq$  – Streuung

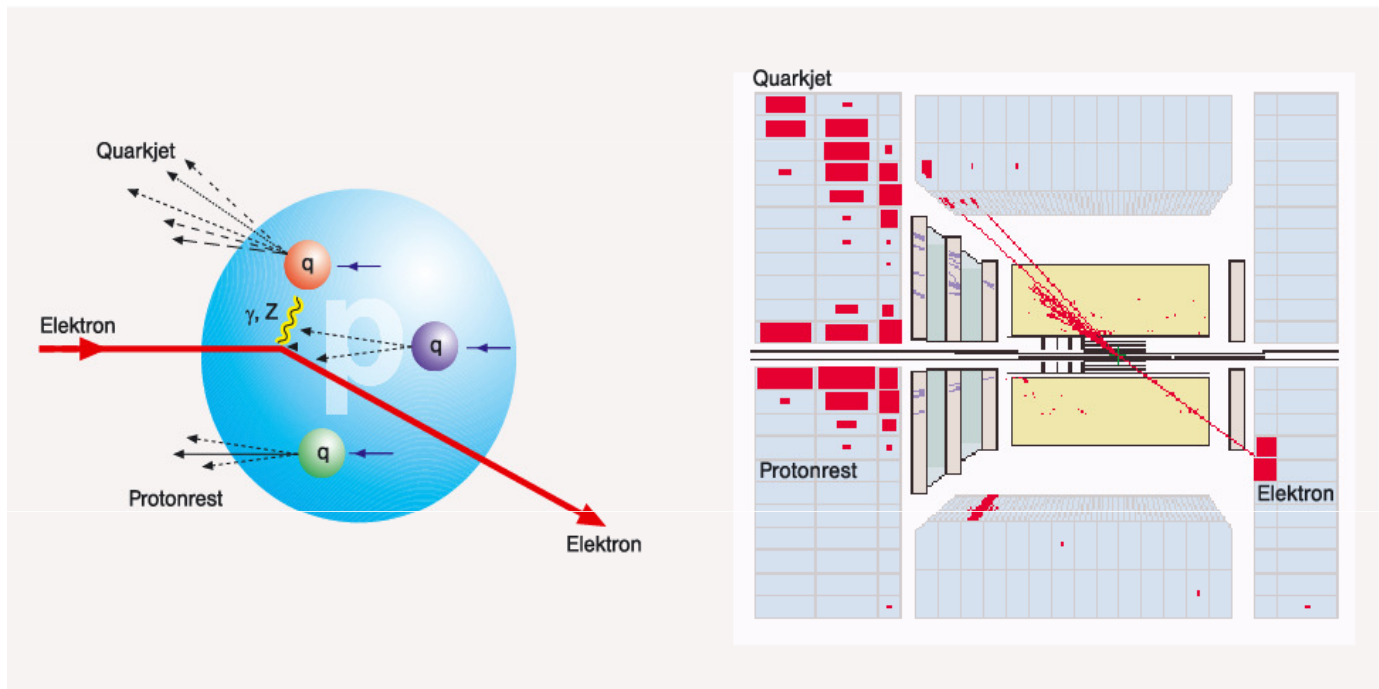
2.) Hadronisierung: getroffenes Parton → jet 1 } Wahrscheinlichkeit  
Zuschauer Partonen → jet 2 } für Hadronisierung  
= 1 →  $\sigma_{\text{Hadr}} \approx \sigma_{\text{el},q}$

d.h. Wirkungsquerschnitt bestimmt durch e-Parton Streuung



260

## Experimenteller Nachweis der Hadronisierung bei tiefinelastischer Elektronenstreuung am Proton



Im ZEUS-Detektor hinterlassen das gestreute Elektron sowie der Protonenrest und der von einem Quark ausgelöste hadronische Jet charakteristische Signaturen

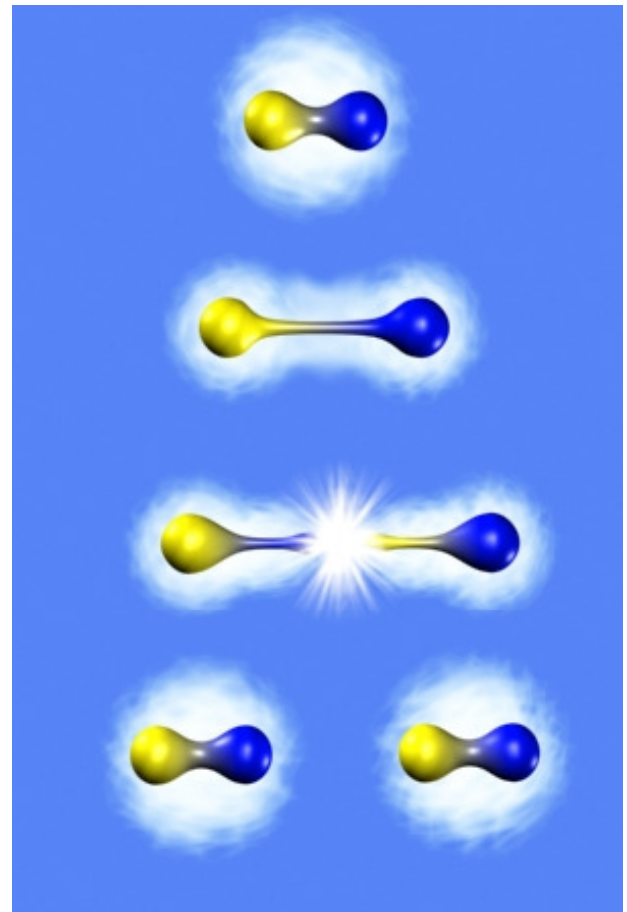
261

## Effekt des Confinements

Der Versuch, Quarks voneinander zu trennen, führt zur Bildung neuer Quark-Antiquark-Paare

### Confinement:

Quarks existieren nicht separat;  
Sie sind in Hadronen gebunden:  
Mesonen ( $q\bar{q}$ ) oder Baryonen ( $qqq$ )



262

# Partonenmodell und Strukturfunktionen

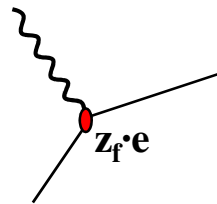
Spin der punktförmigen Partonen =  $\frac{1}{2}$

Ladung = ?

**Strukturfunktionen beschreiben die innere Zusammensetzung des Nukleons**

Annahme: Nukleon ist aus verschiedenen Quarktypen  $f$  ( $f = u, d, c, s, t, b$ ) gebaut, die die Ladung  $z_f \cdot e$  tragen (Partonen mit Quarks identifiziert)

Wirkungsquerschnitt für elektromagnetische Wechselwirkung des  $e^-$  mit Quark  $f \sim z_f^2$ ;



$$M_{if} \sim z_f e; \quad \sigma \sim |M_{if}|^2 \sim z_f^2 e^2$$

$$F_2(x) = x \sum_f z_f^2 q_f(x)$$

→ Tafel

Wahrscheinlichkeit ein Parton der Sorte  $f$  mit Impulsbruchteil  $x$  im Nukleon zu finden

$q_f(x)dx$  = Erwartungswert für die Zahl der Quarks vom Typ  $f$  im Hadron im Impulsbereich  $x \dots x+dx$

263

# Partonenmodell und Strukturfunktionen

z.B. Proton:  $F_2^{e,p}(x) = x \left\{ \left( \frac{2}{3} \right)^2 u(x) + \left( -\frac{1}{3} \right)^2 d(x) \right\}$  für e-p-Streuung (s,c,b,t-Quarks vernachlässigt)

(uud) mit  $Q_u = 2/3$  und  $Q_d = -1/3 \rightarrow$  drittelzahlige Ladungen angenommen

Neutron (udd): Vertauschen von  $u$  und  $d$  Quarks : Proton  $\rightarrow$  Neutron

Isospin-Invarianz :  $u$ -Quarks im Neutron haben die gleiche Impulsverteilung wie  $d$ -Quarks im Proton

$$u_n(x) = d_p(x) = d(x) \text{ und entsprechend } d_n(x) = u_p(x) = u(x)$$

für das Neutron:

$$\rightarrow F_2^{e,n}(x) = x \left\{ \left( \frac{2}{3} \right)^2 d(x) + \left( -\frac{1}{3} \right)^2 u(x) \right\}$$

für Nukleon:

$$F_2^{e,N}(x) = \frac{1}{2} \{ F_2^{e,n}(x) + F_2^{e,p}(x) \} = x \frac{1}{2} \left\{ \frac{5}{9} [u(x) + d(x)] \right\} = x \frac{5}{18} \{ u(x) + d(x) \}$$

264

Neutrinos koppeln durch schwache Wechselwirkung an schwache Ladung der Quarks, elektrische Ladung taucht nicht auf:  $F_2^{v,N} = x \{ u(x) + d(x) \}$

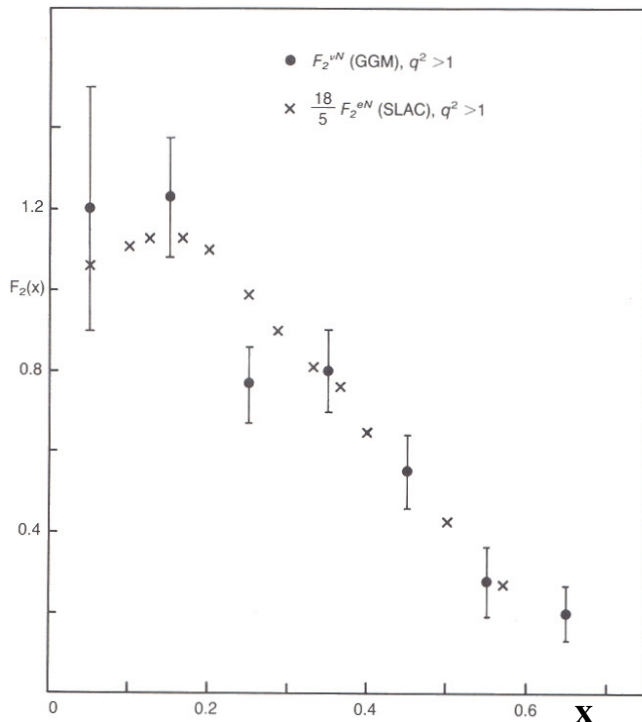
falls tatsächlich Quarks wie angenommen Drittel-Ladungen tragen, dann müsste gelten:

$$\frac{18}{5} F_2^{e,N}(x) = F_2^{v,N}(x) = x \{ u(x) + d(x) \}$$

Aussage durch Vergleich der Experimente am CERN und SLAC bestätigt

Vergleich der Elektronen- und Neutrino-Streuung am Nukleon

→ Partonen tragen Drittel-Ladungen



265

## Partonen im Nukleon

Partonen: ... mehr als nur Quarks ??

⇒ **Tafel**

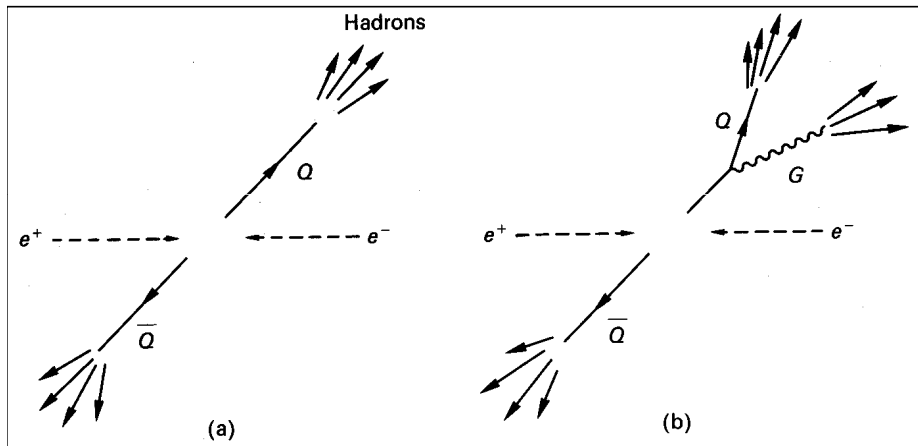
266



## Evidenz für Gluonen

→ es gibt Konstituenten des Nukleons, die ca. die Hälfte des Nukleonenimpulses ausmachen und keine Wechselwirkung mit Leptonen (weder schwach noch elektromagnetisch) machen

→ Evidenz für Gluonen, die nur der starken Wechselwirkung unterliegen  
Austauschteilchen der starken Wechselwirkung, die die Bindung zwischen den Quarks bewirken

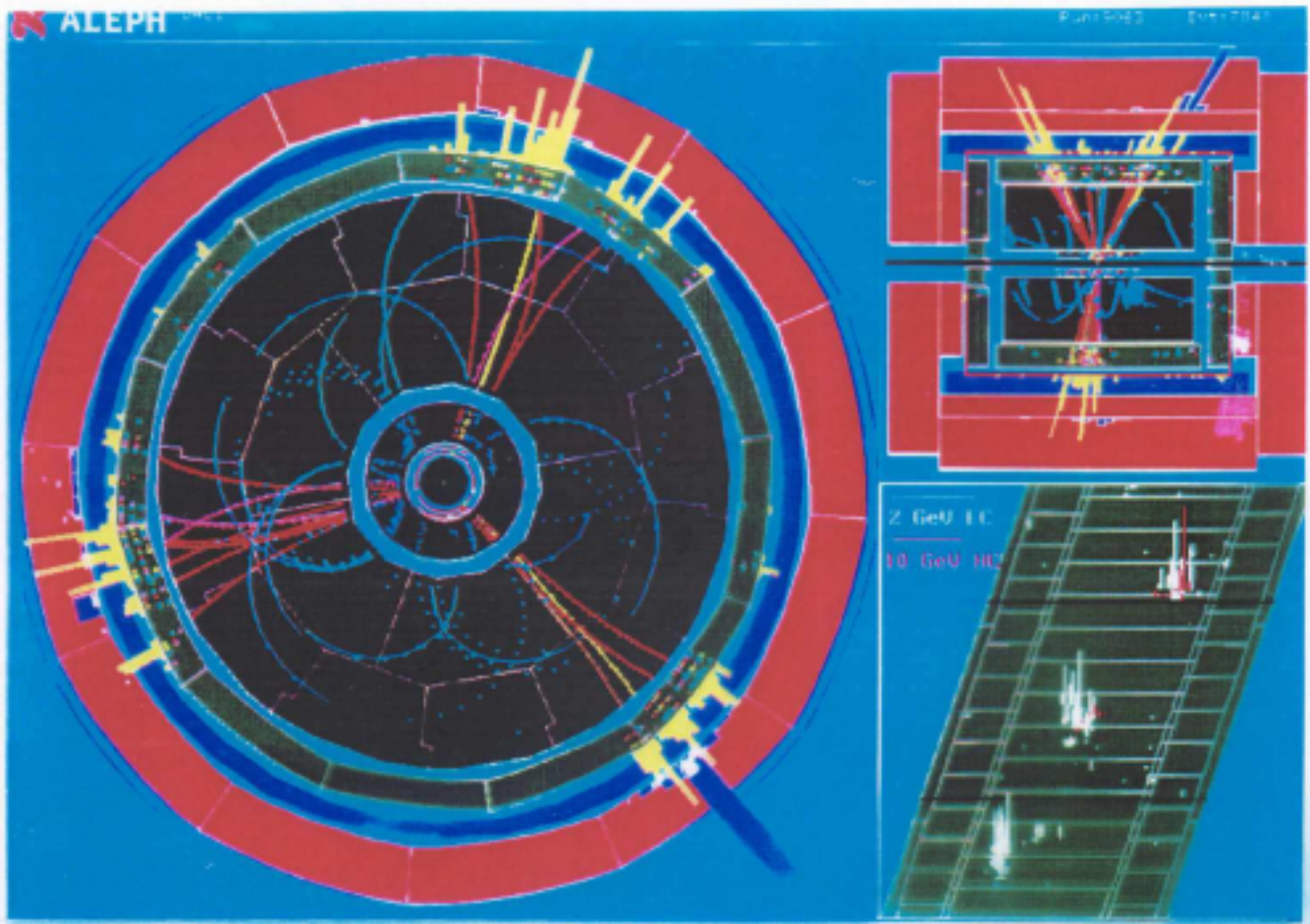


Direkte Evidenz für Gluonen aus späteren  $e^+e^-$  Collider-Experimenten

Beobachtung von 3 Hadronenjets durch Gluonenabstrahlung (Bremsstrahlung der starken Wechselwirkung)

267

## Evidenz für Gluonen



268

# Tief-inelastische Streuung

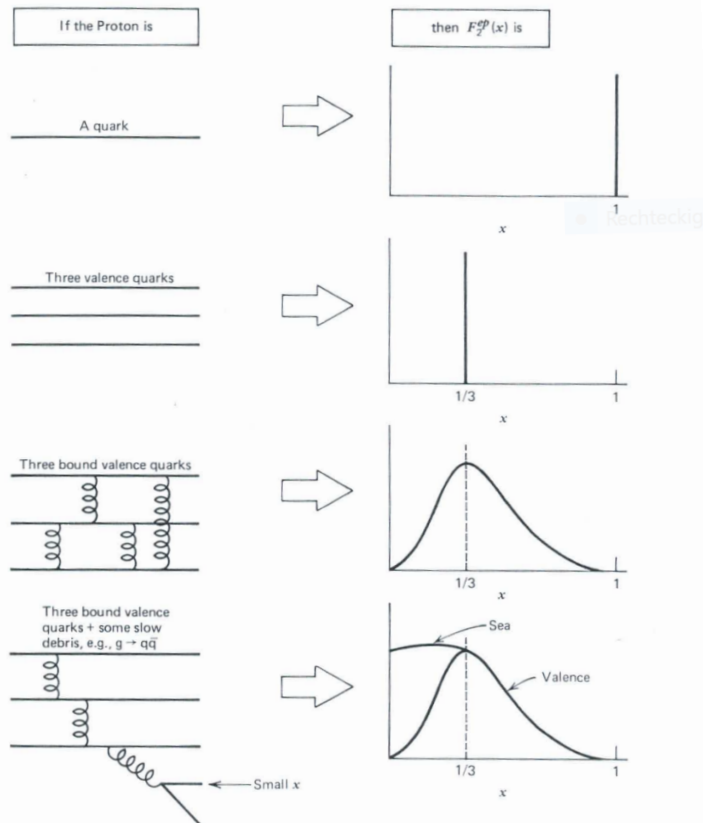


Fig. 9.7 The structure function pictured corresponding to different compositions assumed for the proton.

aus F. Halzen, A. Martin "Quarks & Leptons"

$q(x) = \delta\text{-Funktion bei } x=1$

Proton bestehend aus drei freien Quarks  $\delta\text{-Funktion bei } x=1/3$

Bindung  $\rightarrow$  Verschmierung

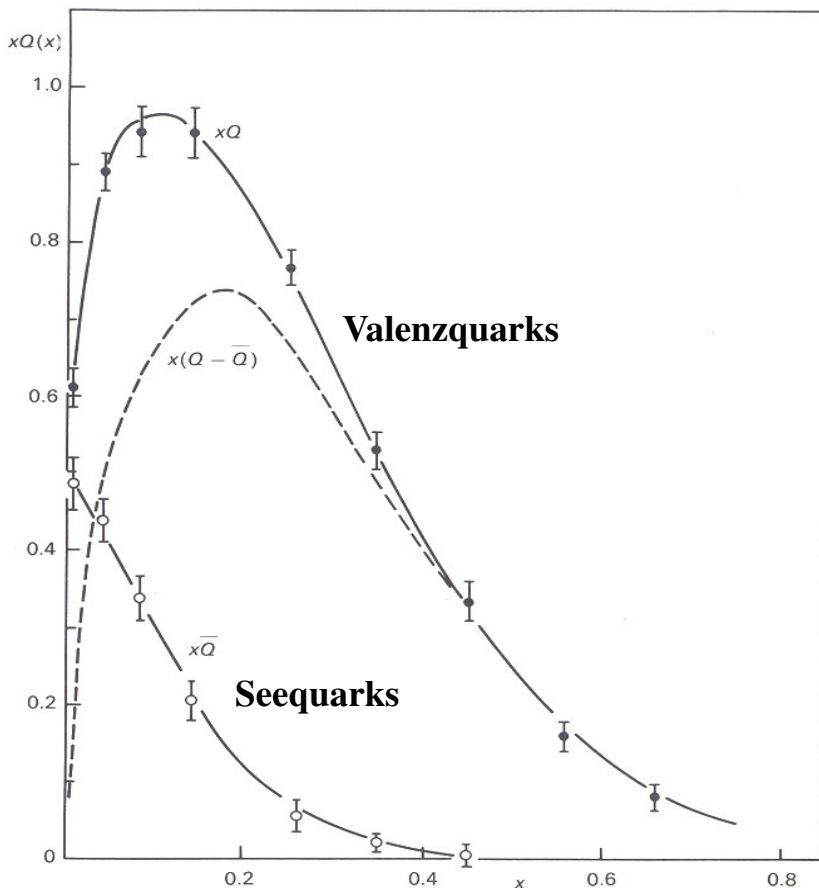
See-Quarks = Quark-Antiquark-Paare  $\rightarrow$  Anwachsen der Strukturfunktion bei kleinen  $x$

$\rightarrow$  Tafel

269

## Quark - Verteilungen

Aus Streuexperimenten (Elektronen, Neutrinos, Antineutrinos):

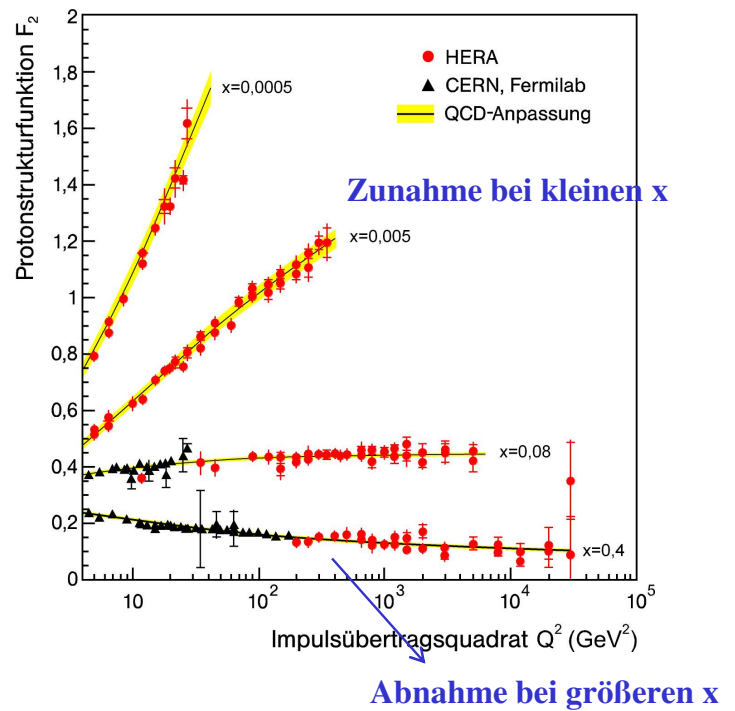
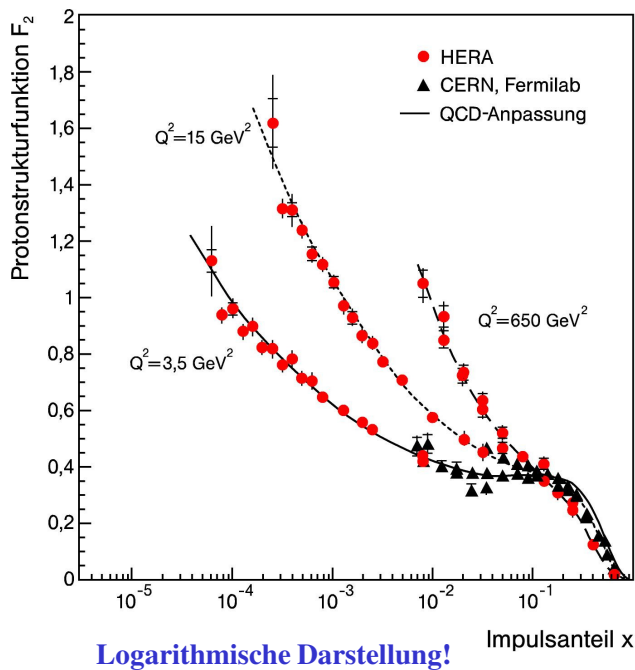


270



## ep-Streuung an HERA:

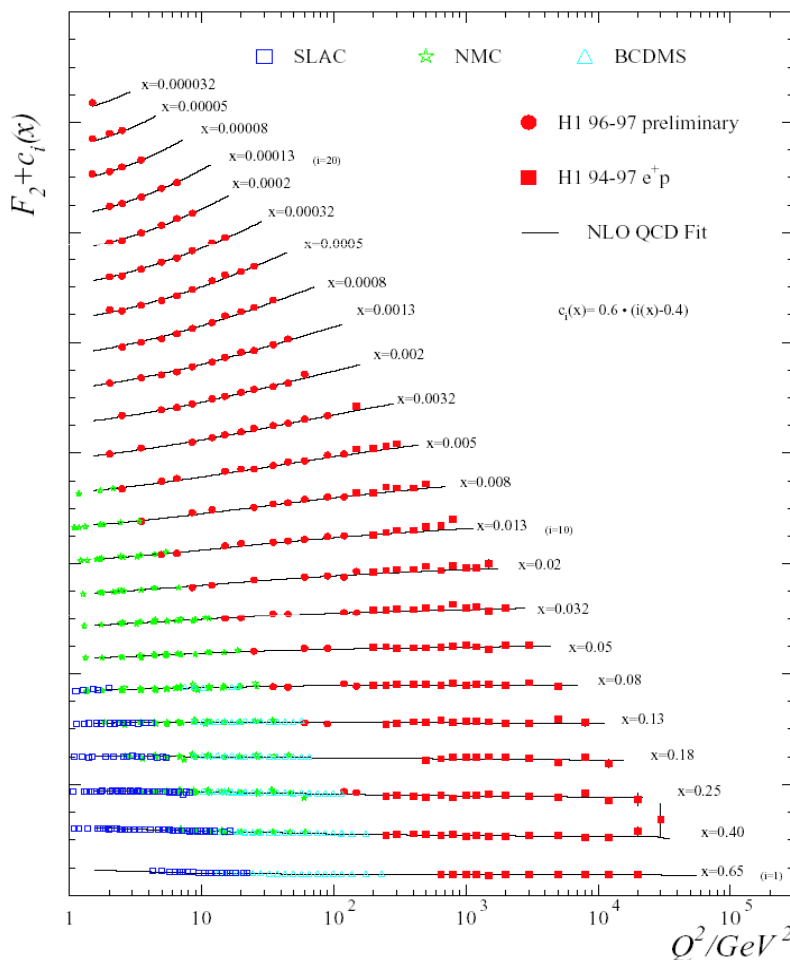
### Bestimmung der Strukturfunktionen im Bereich kleiner Impulsanteile $x$ :



Anschauliche Interpretation => Tafel

271

## Skalenbrechung der Strukturfunktion $F_2(x, Q^2)$



- Insbesondere bei kleinen  $x$  Abweichungen vom Bjorken-Scaling  $\Leftrightarrow$  Abweichung von

$$F_2(x, Q^2) \approx F_2(x)$$

- $\Leftrightarrow$  mit wachsendem  $Q^2$  gibt es immer mehr Quarks mit kleinem Impulsanteil  $x$  im Nukleon

d.h., betrachtet man das Nukleon mit sehr großer Auflösung, so sieht man eine Vielzahl virtueller Quark-Antiquark Paare (und Gluonen)

Vorhersage der  $Q^2$ -Abhängigkeit mittels QCD-Rechnungen möglich.

Partonenverteilungen selbst müssen experimentell bestimmt werden

272