

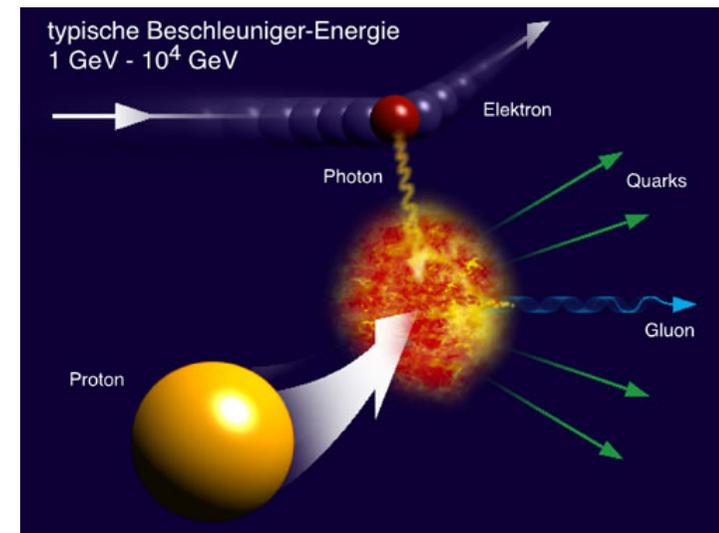
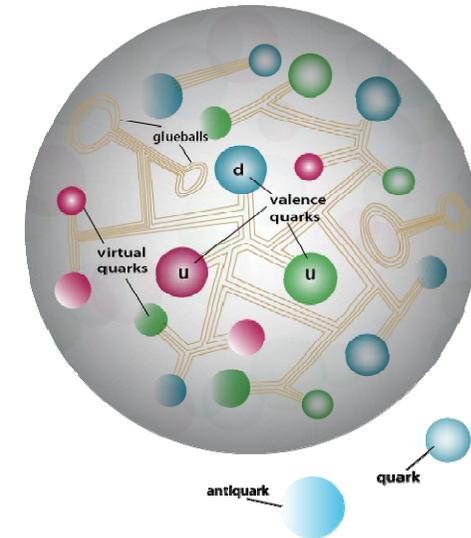
Kerne und Teilchen

Moderne Physik III

Vorlesung # 10

Nukleonen

- Streuung an Partonen
- Strukturfunktionen im Partonenmodell
- Callan-Gross Relation
- Partonverteilungen (pdf)
- Impulsverteilung des Nukleons
- Gluonen & Masse des Nukleons



Erinnerung: Kinematik bei inelastischen Reaktionen

- bei der elastischen Streuung eines Elektrons am Nukleon verbleibt nur 1 freier Parameter:

$$W^2 = M^2 + \underbrace{2M \cdot \nu - Q^2}_{= 0}$$



$$2M \cdot \nu - Q^2 = 0$$

$W = M$ (keine innere Anregung)

- bei der inelastischen Streuung eines Elektrons am Nukleon wird das Nukleon angeregt, zur Beschreibung der Dynamik der Reaktion sind 2 unabhängige Parameter erforderlich: (E', θ) oder (Q^2, ν)

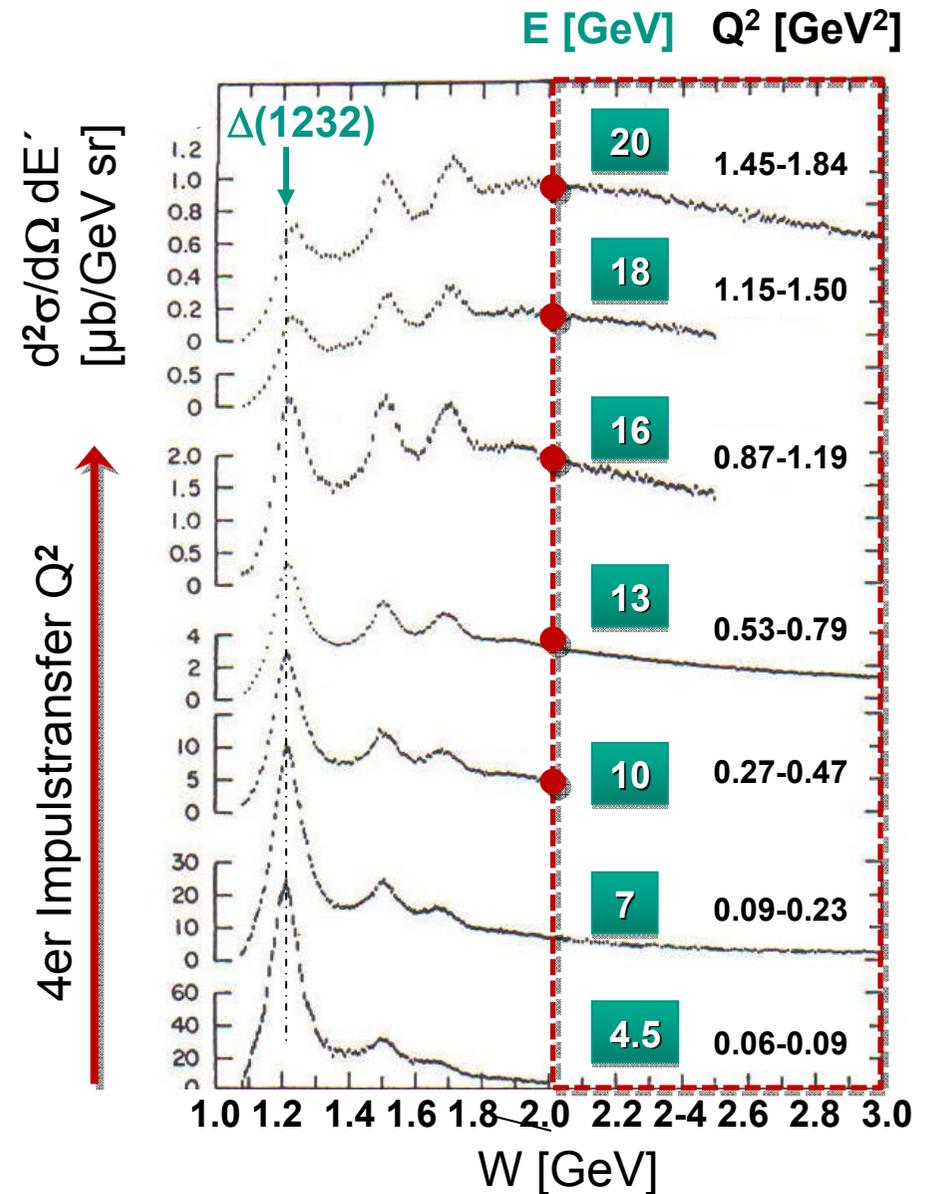


$$2M \cdot \nu - Q^2 > 0$$

$W > M$ (innere Anregung)

Inelastische Elektronenstreuung: Daten

- Bei der experimentellen Untersuchung der inelastischen Streuung von Elektronen an Protonen (durchgeführt 1975 von Kendall, Friedmann, Taylor am SLAC bei festem Nachweiswinkel $\theta = 4^\circ$) tritt als Funktion der Einschuss-Energie E folgender Sachverhalt auf:
 - mit wachsendem Q^2 nimmt der Wq. der **Nukleonresonanzen** ab
 - für invariante Massen **$W > 2 \text{ GeV}$** ergibt sich nur eine **schwache Abhängigkeit von Q^2**

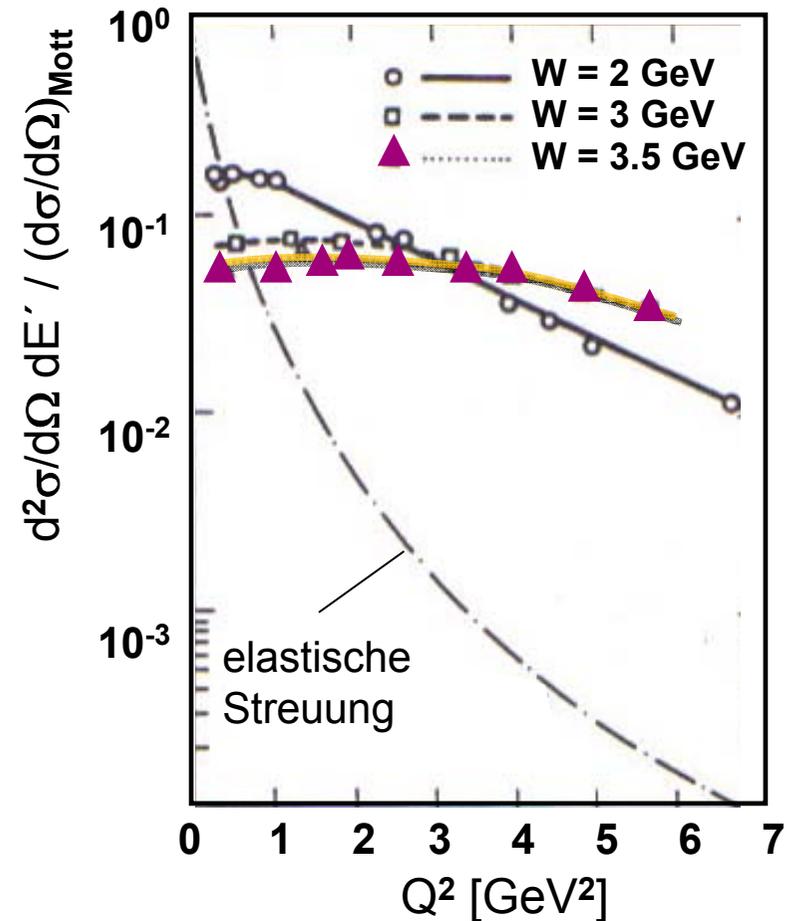


Strukturfunktionen

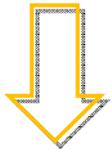
Wirkungsquerschnitt

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

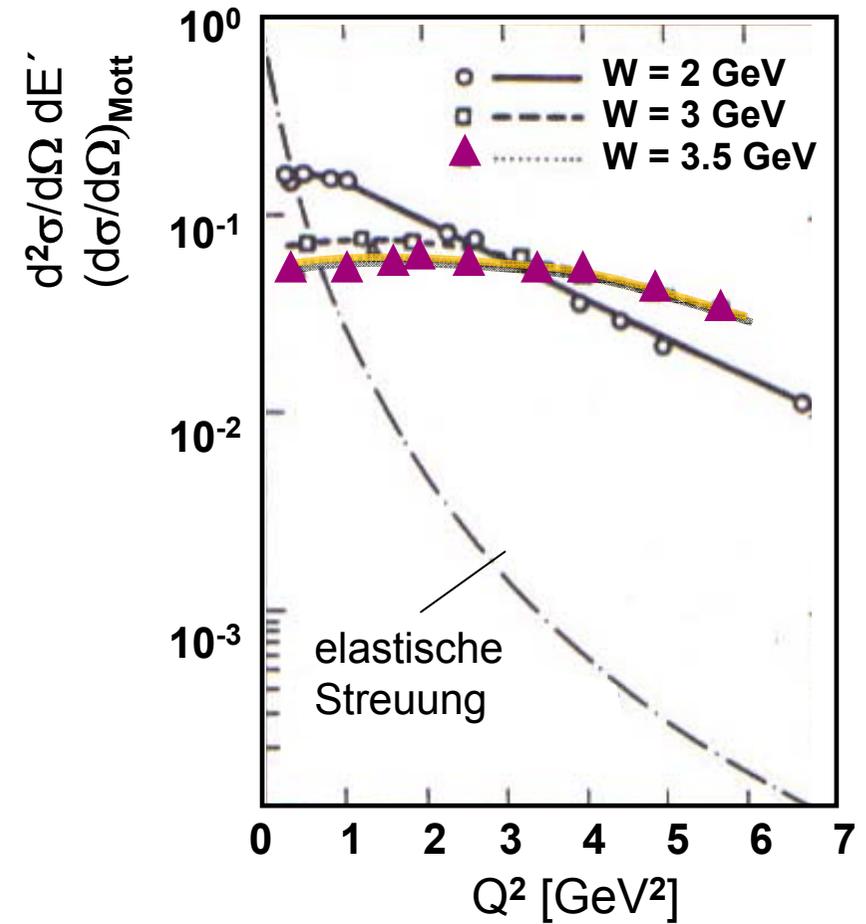
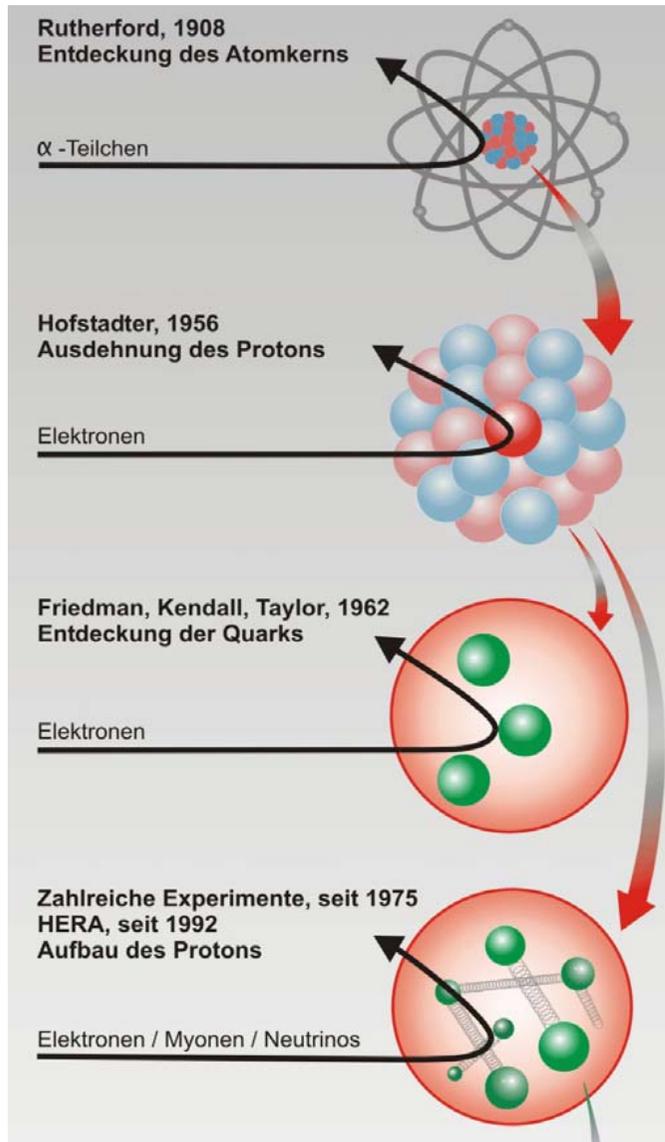
- Die Dynamik der Reaktionen wird durch 2 Strukturfunktionen beschrieben (a la Rosenbluth):
 - 'magnetische' $W_1(Q^2, \nu)$
 - 'elektrische' $W_2(Q^2, \nu)$
- Je größer die invariante Masse W , desto langsamer der Abfall des Wq. als Funktion von Q^2
 - $W = 3.5 \text{ GeV}$: fast konstant
 - experimentelle Zählraten wesentlich größer als Erwartung $\sim Q^{-8}$ aus Dipol-Formfaktor



konstanter
Formfaktor:
punktförmiger
Atomkern



konstanter
Formfaktor:
punktförmige
Partonen



Skalenvariable x & Strukturfunktionen

- im Grenzfall elastischer Streuung ergibt sich:

$$W = M \text{ und } Q^2 = 2 M \nu \Rightarrow \mathbf{x = 1}$$

für inelastische Streuung ergibt sich:

$$W > M \text{ und } Q^2 < 2 M \nu \Rightarrow \mathbf{0 < x < 1}$$

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

- mit der Bjorken Variablen x lassen sich zwei **dimensionslose Strukturfunktionen F_1 und F_2** definieren:

magnetische
Wechselwirkung

$$F_1(x, Q^2) = M c^2 \cdot W_1(Q^2, \nu) \Rightarrow F_1(x)$$

elektrische
Wechselwirkung

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

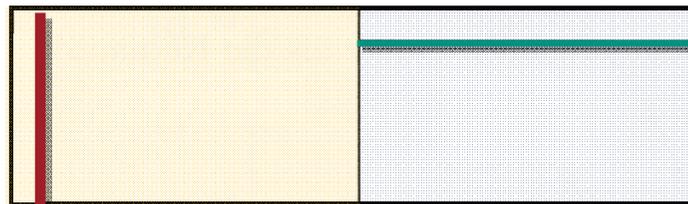
- aus dem exp. Wq. lassen sich für festes x die Strukturfunktionen F_1 und F_2 bestimmen: **F_1 und F_2 sind \sim unabhängig von Q^2** („Skaleninvarianz“)
(Masse des Nukleons spielt keine Rolle bei hohen Energien $Q^2 \gg M$,
d.h. dann existiert **keine charakteristische Massen- bzw. Längenskala λ**)

Proton-Strukturfunktion $F_2(x)$

- Strukturfunktion ist die Fouriertransformierte der Ladungsverteilung $\rho(r)$ im Nukleon
 $F_2(Q^2) = \text{const.}$:
Ladungsverteilung = δ -Funktion

punktförmig
 $\rho(r) = \delta(r)/4\pi$

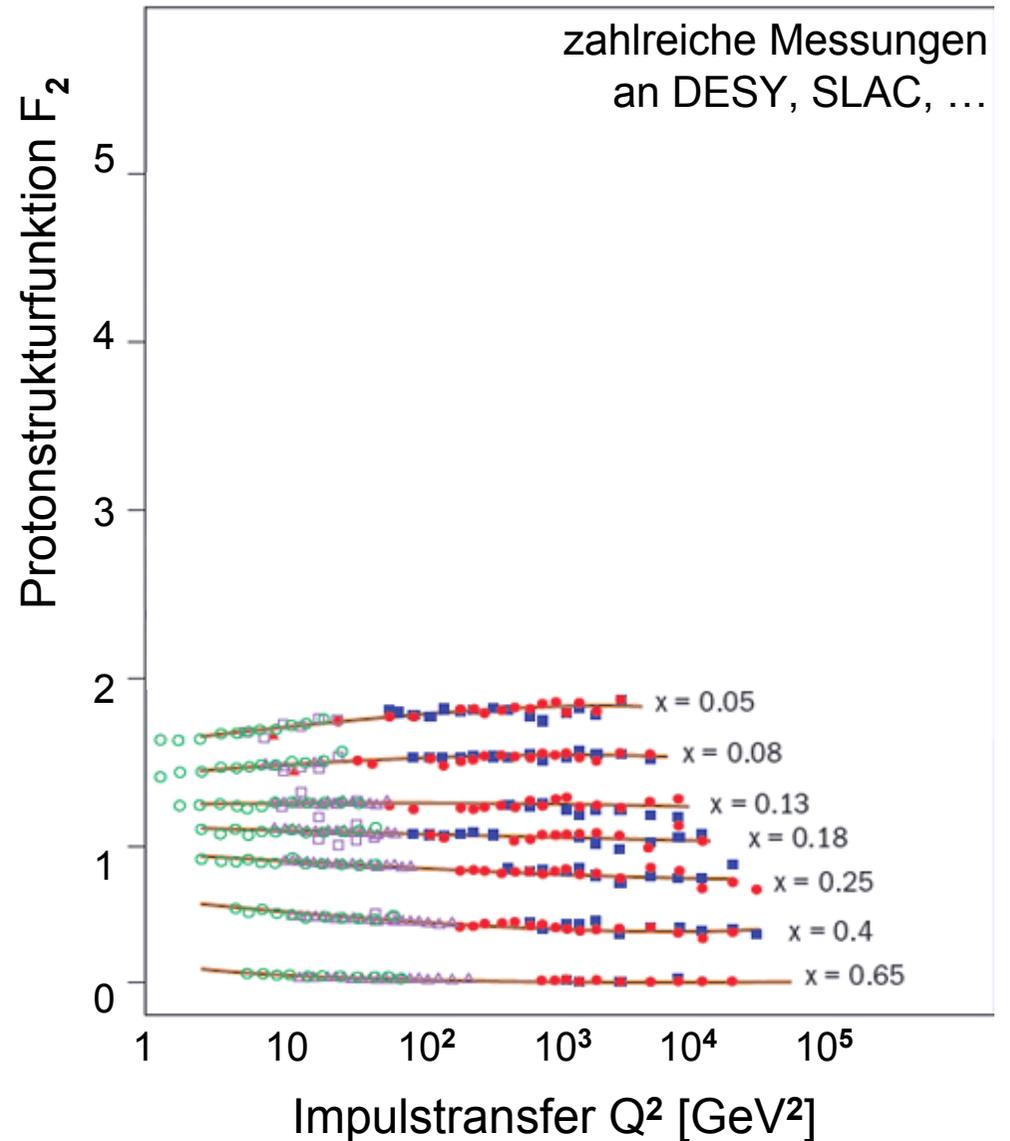
konstant
 $F(q^2) = 1$



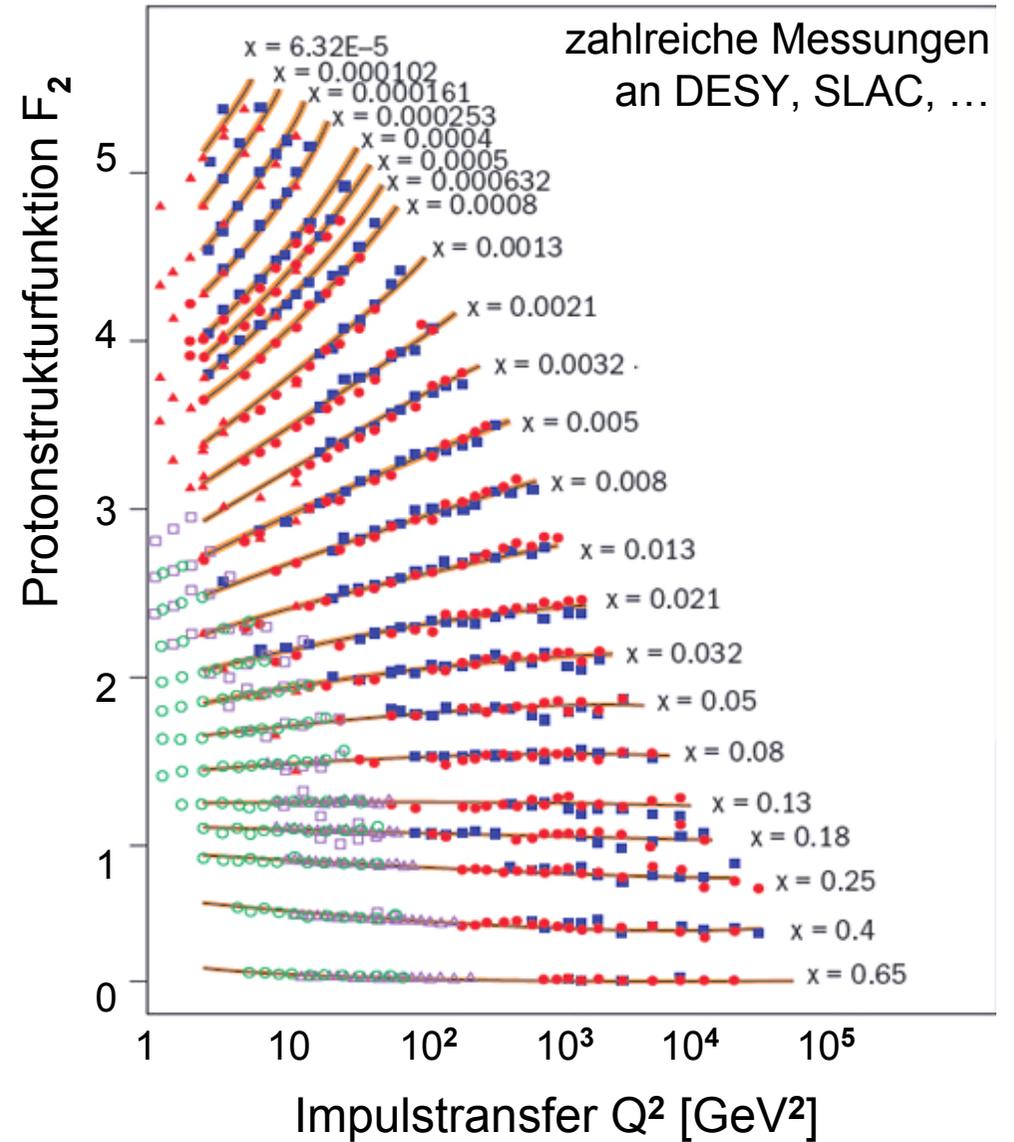
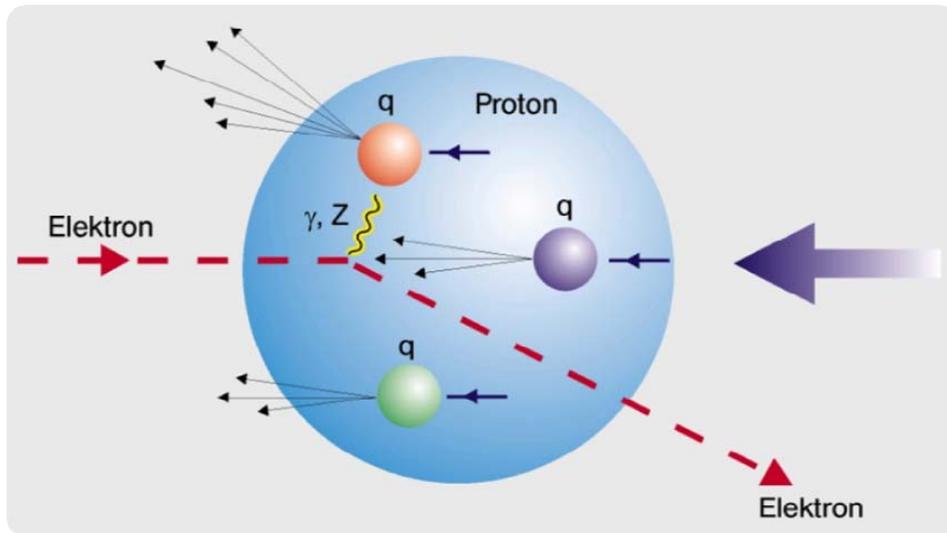
Radius $r \rightarrow$

Impuls $|q| \rightarrow$

(genaue Messungen heute zeigen Verletzungen der Skaleninvarianz, da Quarks Gluonen emittieren)



Interpretation:
 Streuung an punktförmigen
 Konstituenten: **Partonen**



Partonen

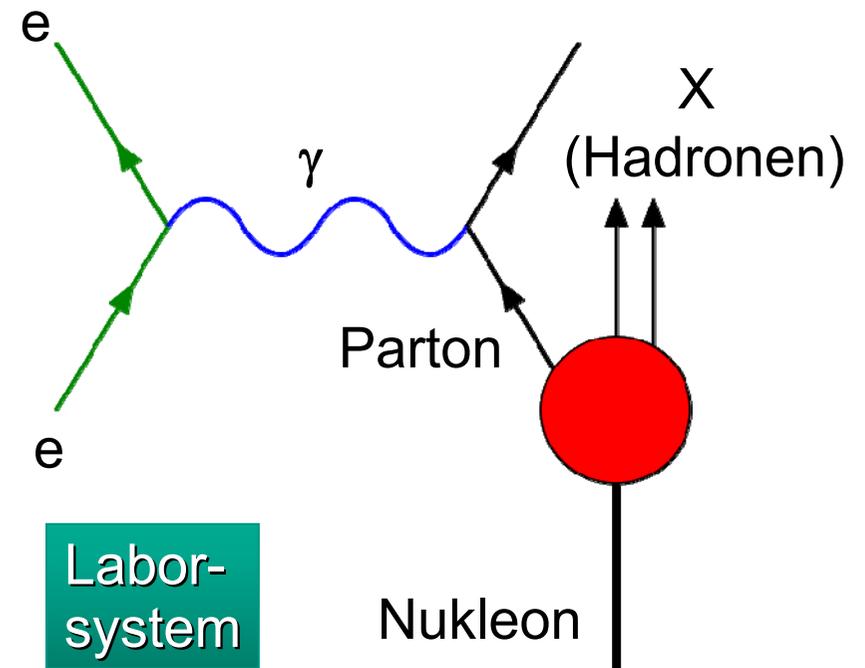
■ Parton-Modell des Nukleons R. Feynman (1969):

- die inelastische ep-Streuung lässt sich darstellen als eine inkohärente Überlagerung von **elastischen Elektron-Parton-Wechselwirkungen**
- kurze „Belichtungszeit“: Partonen sind in ihrem Zustand quasi „eingefroren“
später bricht das Nukleon auf

■ Bjorken-Variable x:

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

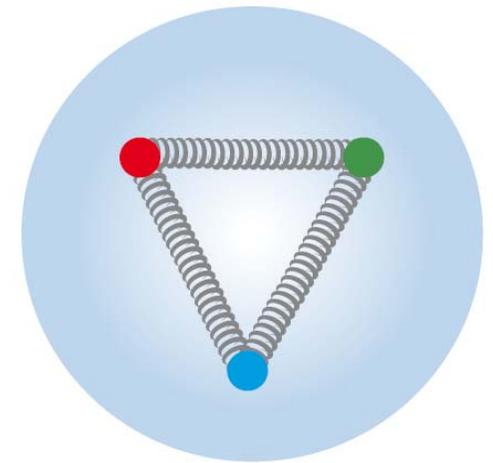
x = Bruchteil des Viererimpulses des Nukleons, der vom Parton beim Stoßprozess getragen wird



Das Parton-Modell

- Nukleonen sind aus verschiedenen Quarktypen f mit der elektrischen Ladung $z_f \cdot e$ aufgebaut, Wq. für elektromagnet. Streuung $\sim (z_f)^2$

Proton	uud	} Quantenzahlen durch 'Valenzquarks' gegeben
Neutron	udd	

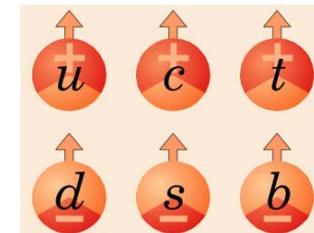


Nukleonen sind qqg Bindungszustände mit Spin $s = 1/2$

Ladung der Quarks $Q(\text{up}) = +2/3$, $Q(\text{down}) = -1/3$,

da Baryonen Δ^{++} (uuu) mit $Q = +2$, Δ^- (ddd) mit $Q = -1$

$$\begin{array}{l} (+2/3)e: \\ (-1/3)e: \end{array} \begin{array}{l} \left(\begin{array}{c} u_{(up)} \\ d_{(down)} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} C_{(charm)} \\ S_{(strange)} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{c} t_{(top)} \\ b_{(bottom)} \end{array} \right) \end{array}$$



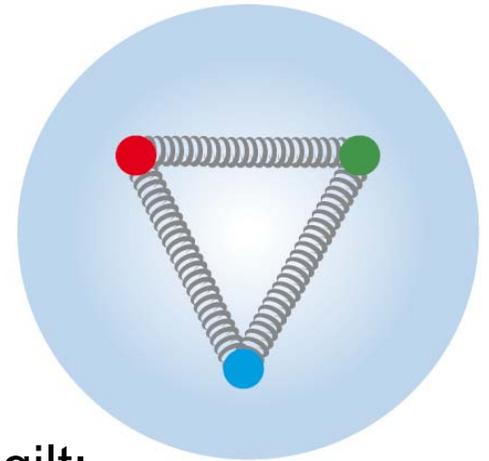
- Die Quarks c, t, b sind so schwer, dass sie bei den erreichbaren Werten für Q^2 nur eine untergeordnete Rolle spielen & deshalb auch im Folgenden nicht weiter betrachtet werden müssen

- Nukleonen sind aus verschiedenen Quarktypen f mit der elektrischen Ladung $z_f \cdot e$ aufgebaut, Wq. für elektromagnet. Streuung $\sim (z_f)^2$

- Die einzelne **Valenz-Quarks** tragen jeweils einen Impulsanteil x

Impuls-Verteilungsfunktion $f(x)$:

Zahl der Quarks mit Flavour f im Impulsintervall $[x, x+dx]$



- Für eine Verteilungsfunktion $f(x)$ eines geladenen Partons gilt:

$$\int_0^1 f(x) dx = 1$$

Normierungsbedingung

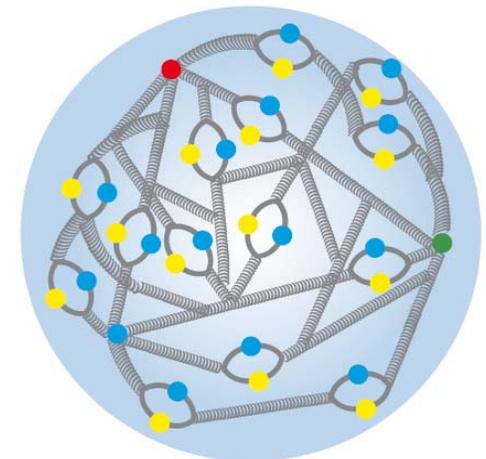
$$\int_0^1 x \cdot f(x) dx = \frac{a}{N}$$

bei N Partonen tragen diese einen Anteil a des Gesamt-Impulses des Nukleons

Geladene Partonen tragen nur ca. 50% des Nukleonen-Impulses !

Das erweiterte Parton-Modell

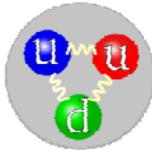
- Das erweiterte Partonenmodell berücksichtigt das Vorhandensein von
 - neutralen Teilchen, die nicht an Photonen koppeln: Gluonen
 - eines Sees aus virtuellen Quark-Antiquark Paarenbeide Komponenten können zur Streuung beitragen
einzelne Quarkflavours werden mit unterschiedlichen Verteilungen vorkommen
- **Valenz-Quarks** tragen jeweils einen Impulsanteil x
Impuls-Verteilungsfunktion $q_f(x)$:
Zahl der Quarks mit Flavour f im Impulsintervall $[x, x+dx]$
- **See-Quarks** (virtuelle Quark-Antiquark Paare):
Impuls-Verteilungsfunktion $\bar{q}_f(x)$:
Zahl der Anti-Quarks mit f im Impulsintervall $[x, x+dx]$
- **Gluonen** (neutraler Anteil am Proton-Impuls)
Impuls-Verteilungsfunktion $g(x)$



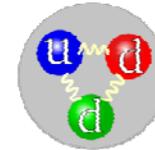
- **Isospinsymmetrie:** Proton und Neutron können durch Vertauschen von u- und d-Quark ineinander übergeführt werden, \Leftrightarrow Normierungsrelationen:

$$q_{up}^n = q_{down}^p \quad q_{up}^p = q_{down}^n \quad q_{strange}^p = q_{strange}^n$$

Proton (uud)



Neutron (udd)



$$\int (q_{up} - \bar{q}_{up}) dx = 2$$

$$\int (q_{down} - \bar{q}_{down}) dx = 1$$

$$\int (q_{strange} - \bar{q}_{strange}) dx = 0$$

2 up Quarks, 1 down Quark

$$\int (q_{up} - \bar{q}_{up}) dx = 1$$

$$\int (q_{down} - \bar{q}_{down}) dx = 2$$

$$\int (q_{strange} - \bar{q}_{strange}) dx = 0$$

1 up Quark, 2 down Quarks

- Verteilungen der Valenzquarks q_v (q_{up} , q_{down}) und Verteilungen der Seequarks q_s :
 - Verteilungen der Antiquarks entsprechen denen der Seequarks

- Strukturfunktion $F_2(x)$: bei der e-p Streuung wechselwirken die Elektronen mit der Ladungsverteilung der Nukleonen (bzw. dem magnetischen Moment)

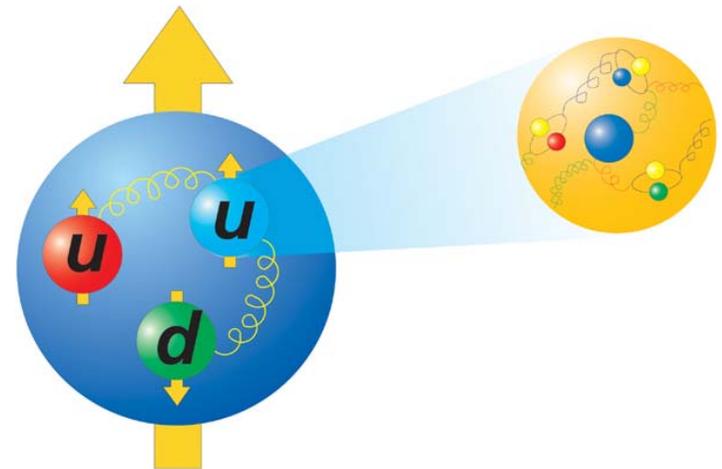
$$F_2(x) = x \cdot \sum_f z_f^2 \cdot [q_f(x) + \bar{q}_f(x)]$$

$q_f(x)$: Quark-Impulsverteilung

$\bar{q}_f(x)$: Antiquark-Impulsverteilung

f : Quarkflavours (u,d,s)

Berücksichtigung der Existenz von virtuellen Seequarks (Quark-Antiquark-Paare)
wichtig: **s-Quarks & alle Anti-Quarks kommen nur als See-Quarks im Nukleon vor**



Strukturfunktionen im Parton-Modell

- Strukturfunktionen von Proton und Neutron mit $u^n(x) = d^p(x)$:

$$F_2^{ep}(x) = x \cdot \frac{4}{9} [u^p(x) + \bar{u}^p(x)] + \frac{1}{9} [d^p(x) + \bar{d}^p(x) + s(x) + \bar{s}(x)]$$

$$F_2^{en}(x) = x \cdot \frac{4}{9} [u^n(x) + \bar{u}^n(x)] + \frac{1}{9} [d^n(x) + \bar{d}^n(x) + s(x) + \bar{s}(x)]$$

- Für die **gemittelte $F_2(x)$ Strukturfunktion des Nukleons** erhält man:

$$F_2^{eN}(x) = \frac{1}{2} \cdot [F_2^{ep}(x) + F_2^{en}(x)]$$

Valenz- & Seequarks

$$= x \cdot \left\{ \frac{5}{18} [u(x) + \bar{u}(x) + d(x) + \bar{d}(x)] + \frac{1}{9} [s(x) + \bar{s}(x)] \right\}$$

nur Seequarks

mittlere quadrat. Ladung der up- und down-Quarks: **5/18**
 ↳ **drittelzahlige Quark-Ladungen**

Strukturfunktionen im Parton-Modell

- Vergleich der Nukleon-Strukturfunktionen in eN und ν N Streuung:

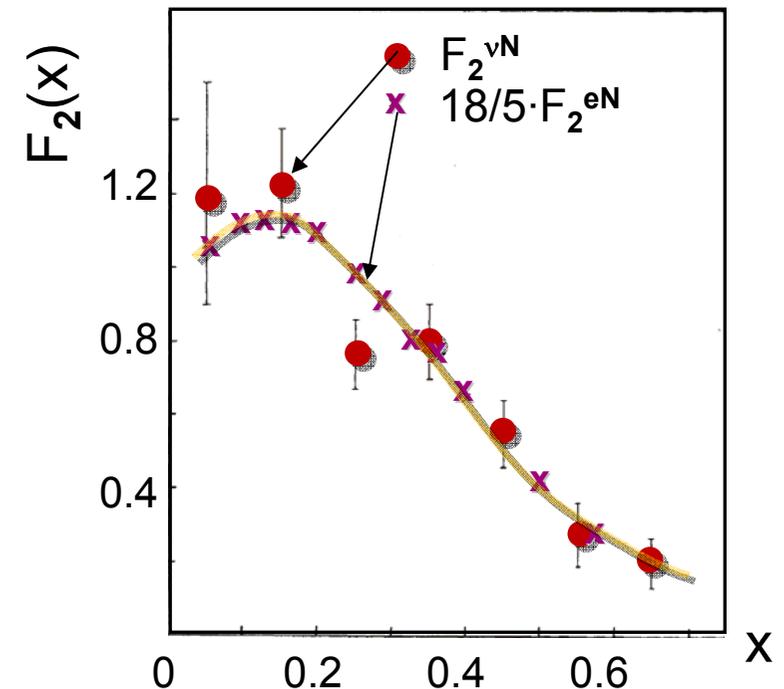
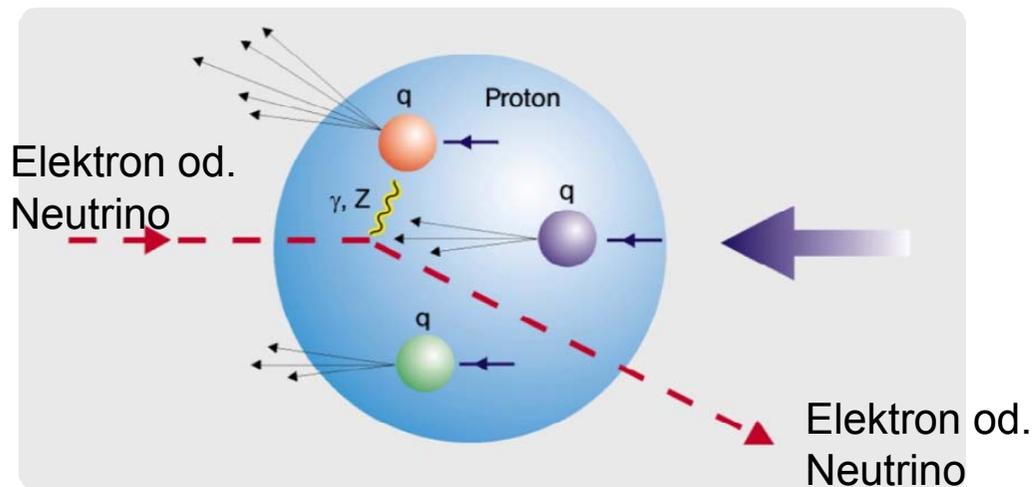
$$F_2^{\nu, N}(x) = x \cdot \sum_f [q_f(x) + \bar{q}_f(x)]$$

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

Neutrinos (ν 's) 'sehen' nicht die elektrische Ladung q_f

Trotzdem: Strukturfunktionen praktisch Identisch!

Quark-Ladungen für up: +2/3, down -1/3



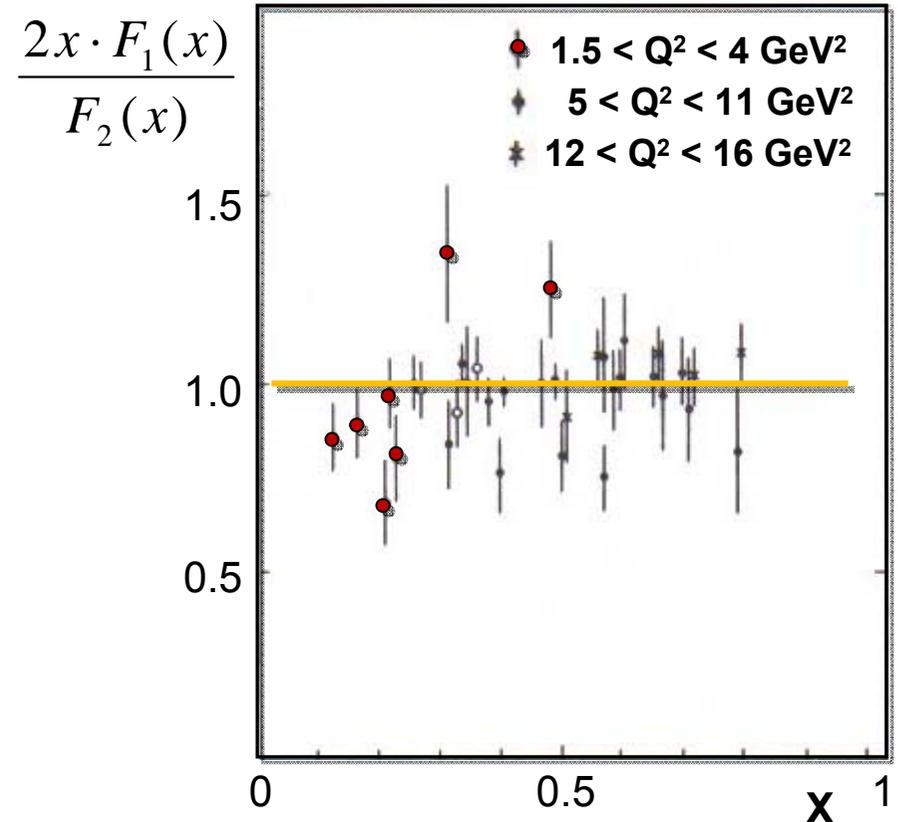
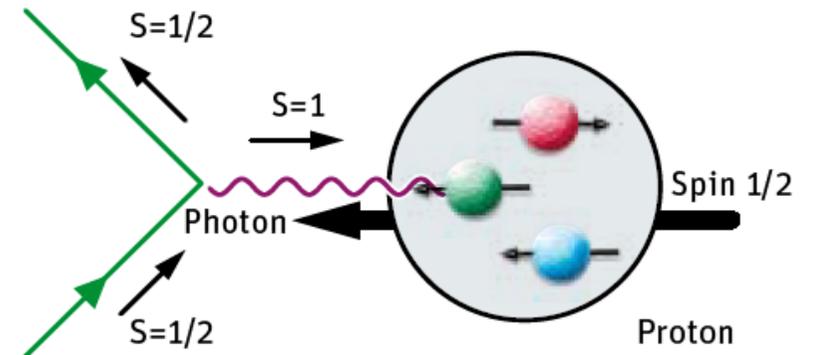
Callan-Gross Relation

- Die Streuung des Elektrons erfolgt an punktförmigen **Spin $\frac{1}{2}$ Teilchen**, durch Vergleich des Wq. mit $F_1(x)$ & $F_2(x)$ mit dem spinabhängigen Mott-Wq. erhält man folgende Relation:

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

Callan-Gross Relation

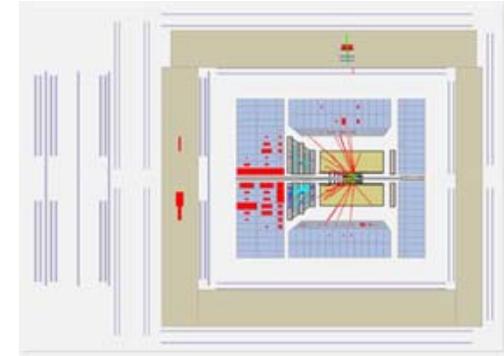
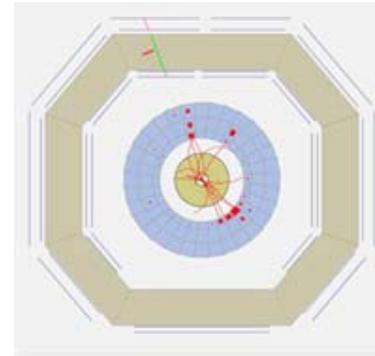
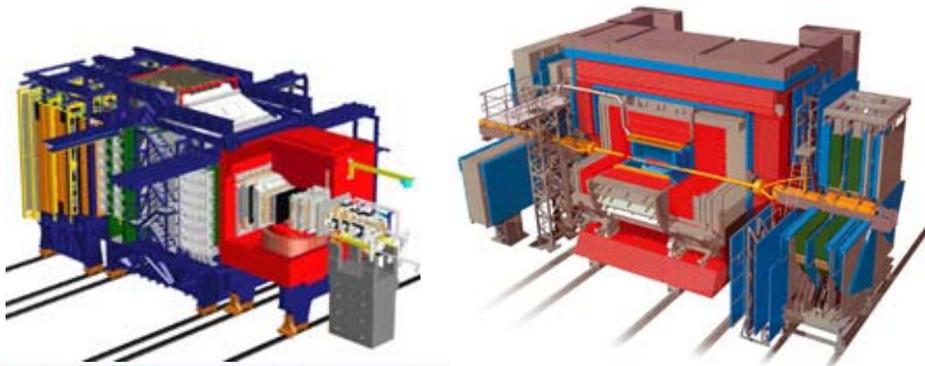
- die Strukturfunktion F_1 entsteht durch magnetische Wechselwirkung, für Spin-0 Teilchen wäre $F_1(x) = 0$
- die Callan-Gross Relation ist für das Nukleon gut erfüllt
- ⇒ **elastische Streuung an punktförmigen Konstituenten mit Spin $s = \frac{1}{2}$**



Messung der Strukturfunktionen

- - Strukturfunktionen von Proton und Neutron wurden an zahlreichen Orten gemessen (z.B. am DESY mit $E_{\text{proton}} = 800 \text{ GeV}$, $E_{\text{elektron}} = 30 \text{ GeV}$)
- da keine freien Neutronentargets existieren, benutzt man für Neutronen leichte Kerne (z.B. Deuterium) als Targets

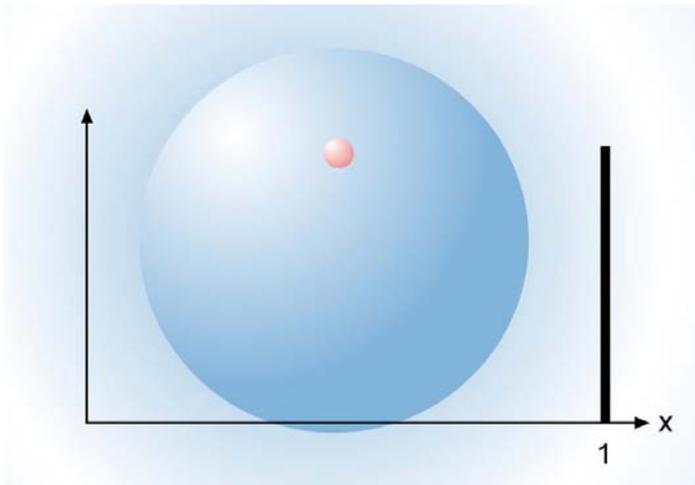
Signaturen in Detektoren



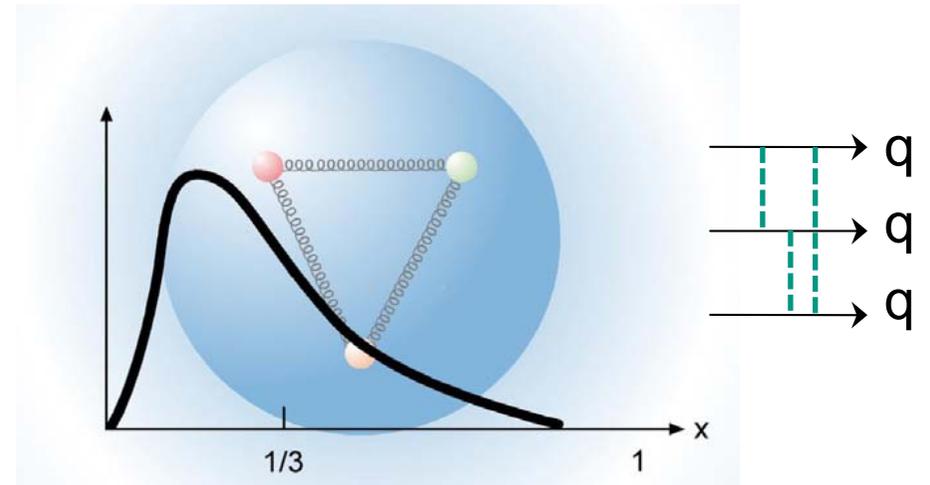
HERA-Beschleuniger



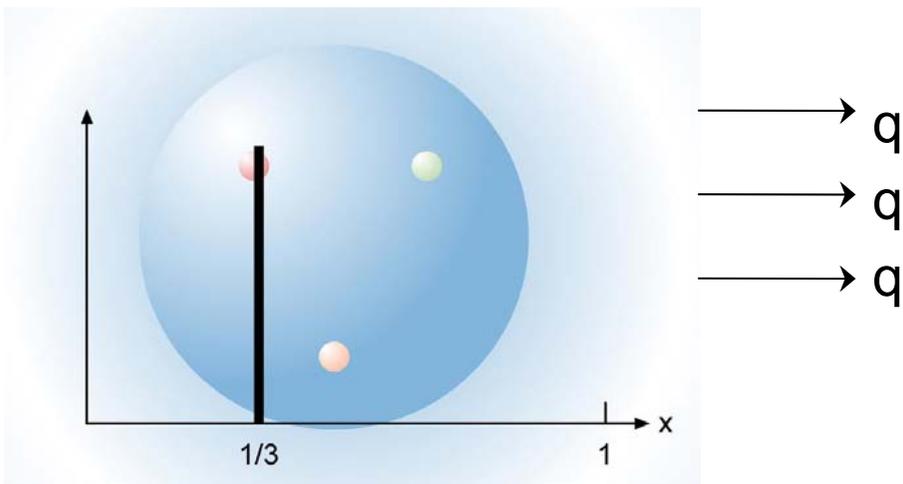
Partonverteilungen (PDFs)



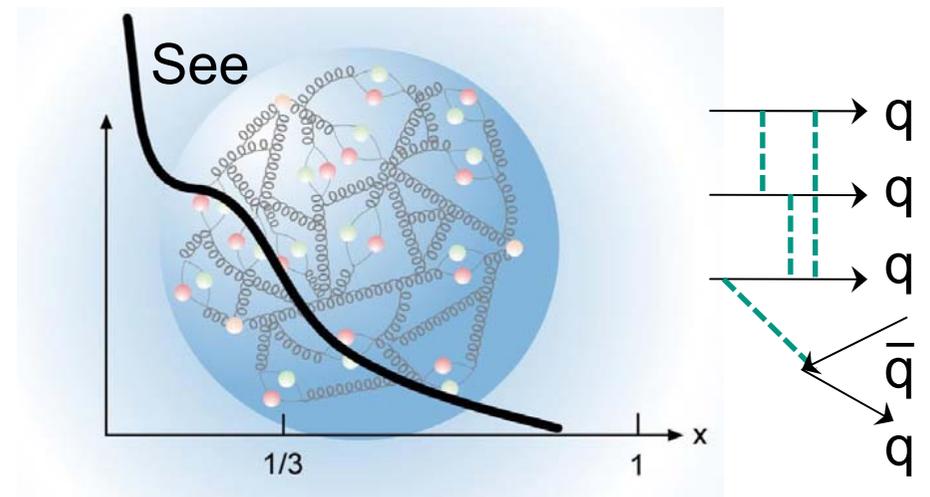
$x = 1$ für nur 1 Konstituentenquark



x mit Gluonen ($\Sigma \sim \frac{1}{2}$ des Impulses)



$x = \frac{1}{3}$ für 3 unabhängige Quarks



kleine x : Gluonen, Quarks & Antiquarks

Partonverteilungen - Nukleonimpuls

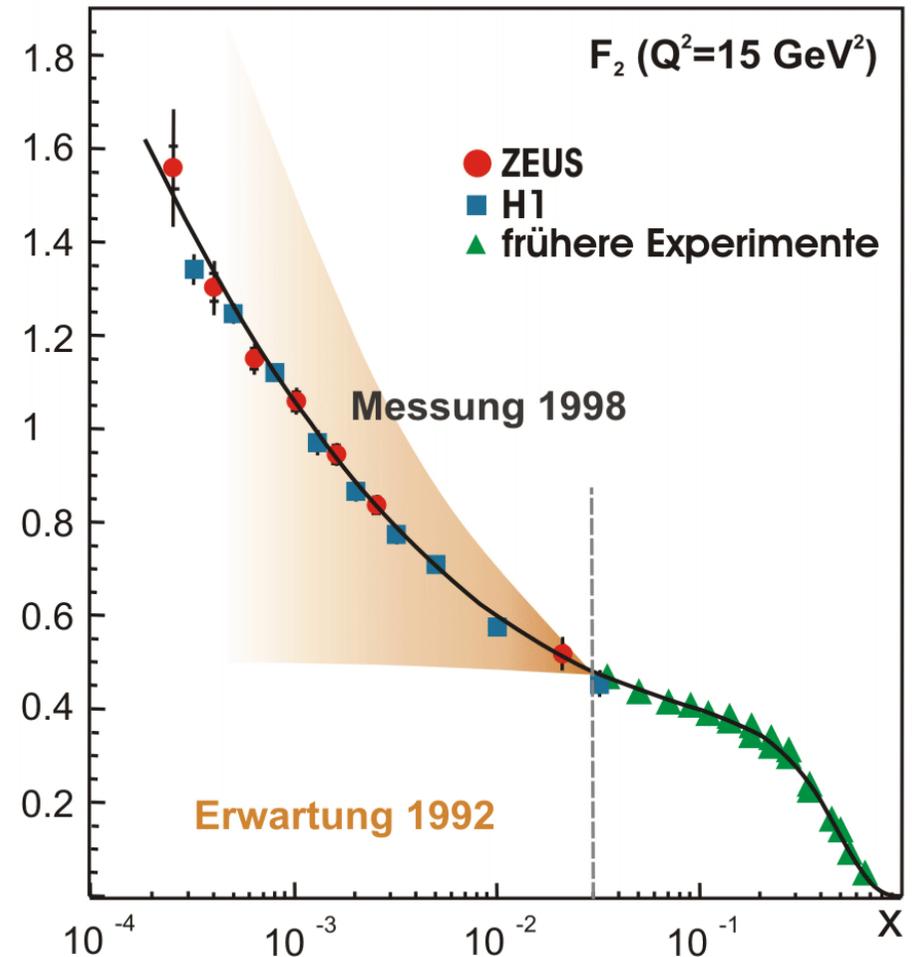
bei der Integration über alle mit den Verteilungsfunktionen gewichteten Quarkimpulsen sollte gelten:

$$\int_0^1 F_2^{\nu, N}(x) \cdot dx \equiv 1$$

experimentelle Beobachtung:

$$\int_0^1 F_2^{\nu, N}(x) dx \approx \frac{18}{5} \int_0^1 F_2^{e, N}(x) dx \approx 0,5$$

Quarks tragen nur ~ die Hälfte des Impulses, die andere Hälfte des Impulses kommt von den **Gluonen** (d.h. Teilchen die keine elektromagnet. bzw. schwache Ww. ausüben)



Partonverteilungen - Nukleonaufbau

- Strukturfunktionen zeigen bei hohem Q^2 einen deutlichen Effekt der See-Quarks: zahlreiche Quarks mit extrem kleinem Impulsanteil x

Große x :

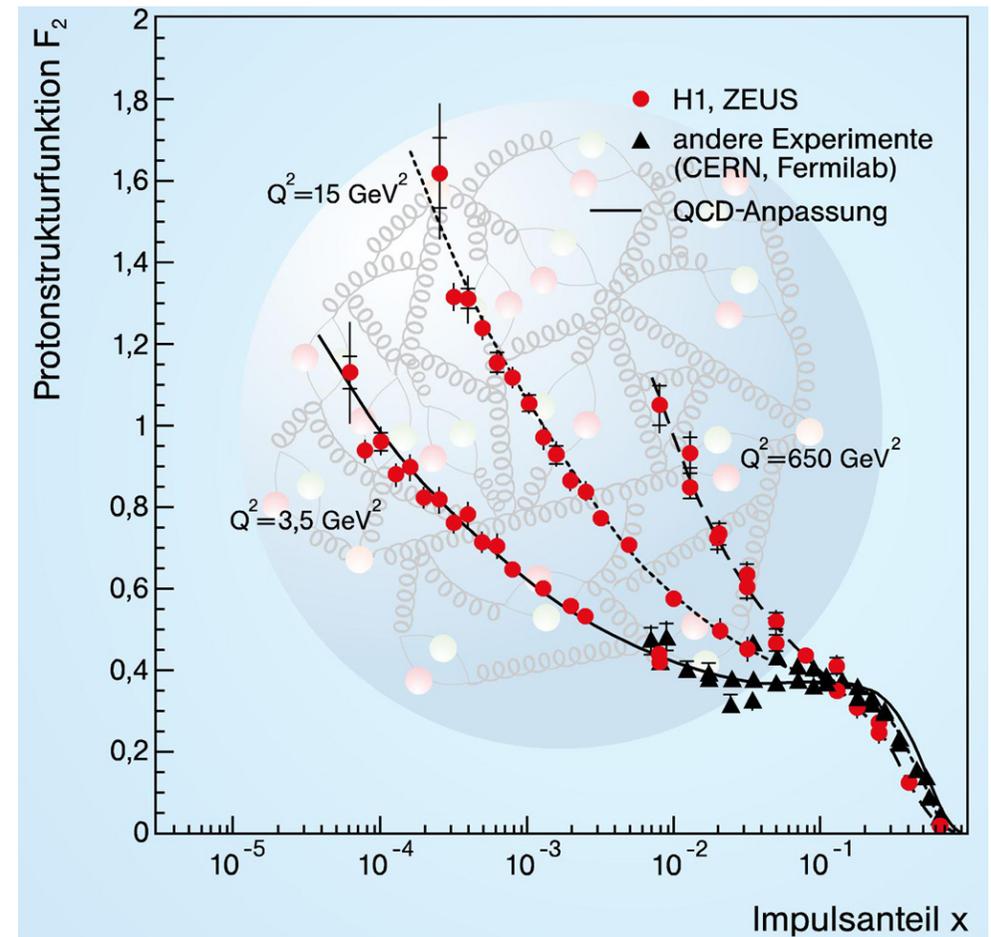
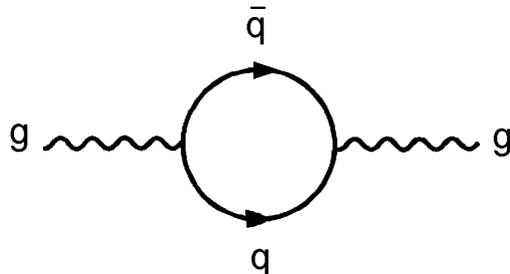
Hauptbeitrag durch Valenzquarks

Kleine x :

Hauptbeitrag durch Gluonen und durch die von ihnen erzeugten Seequarks (Abstrahlung)

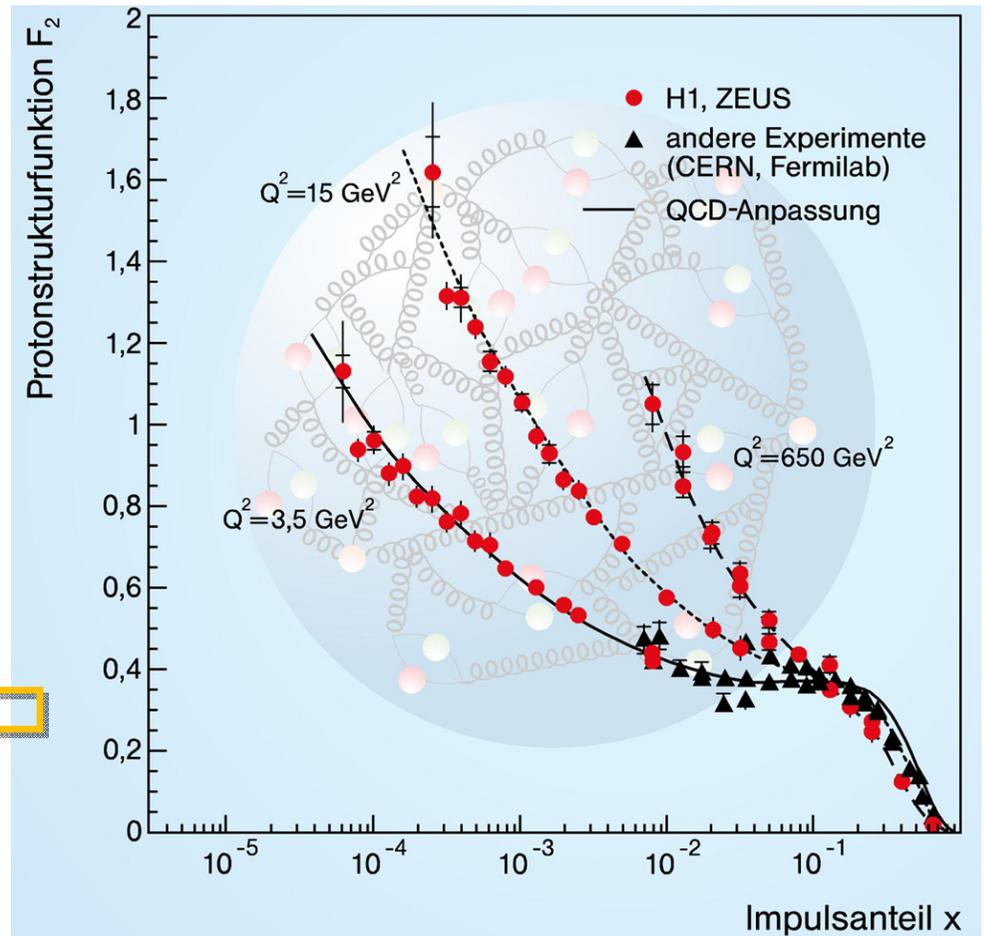
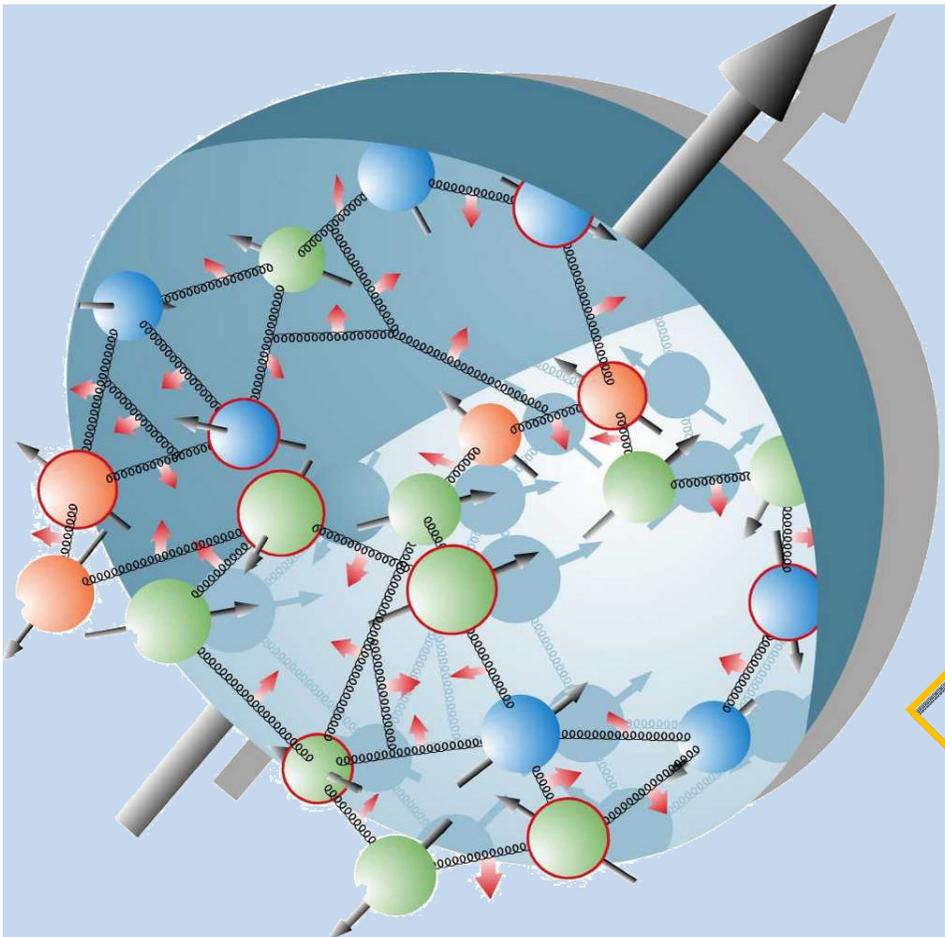
Führt zu einem steilen Anstieg der PDF bei kleinem x

- Seequarks durch Gluonen:

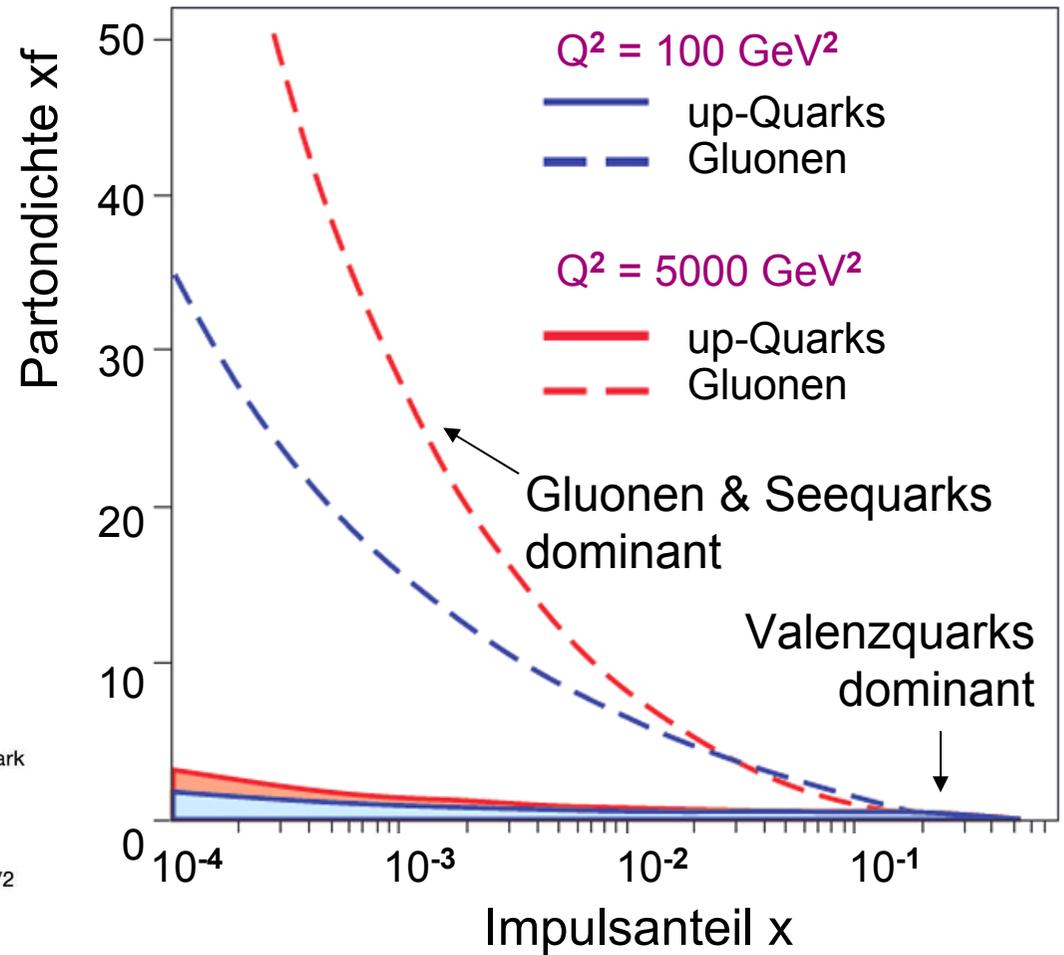
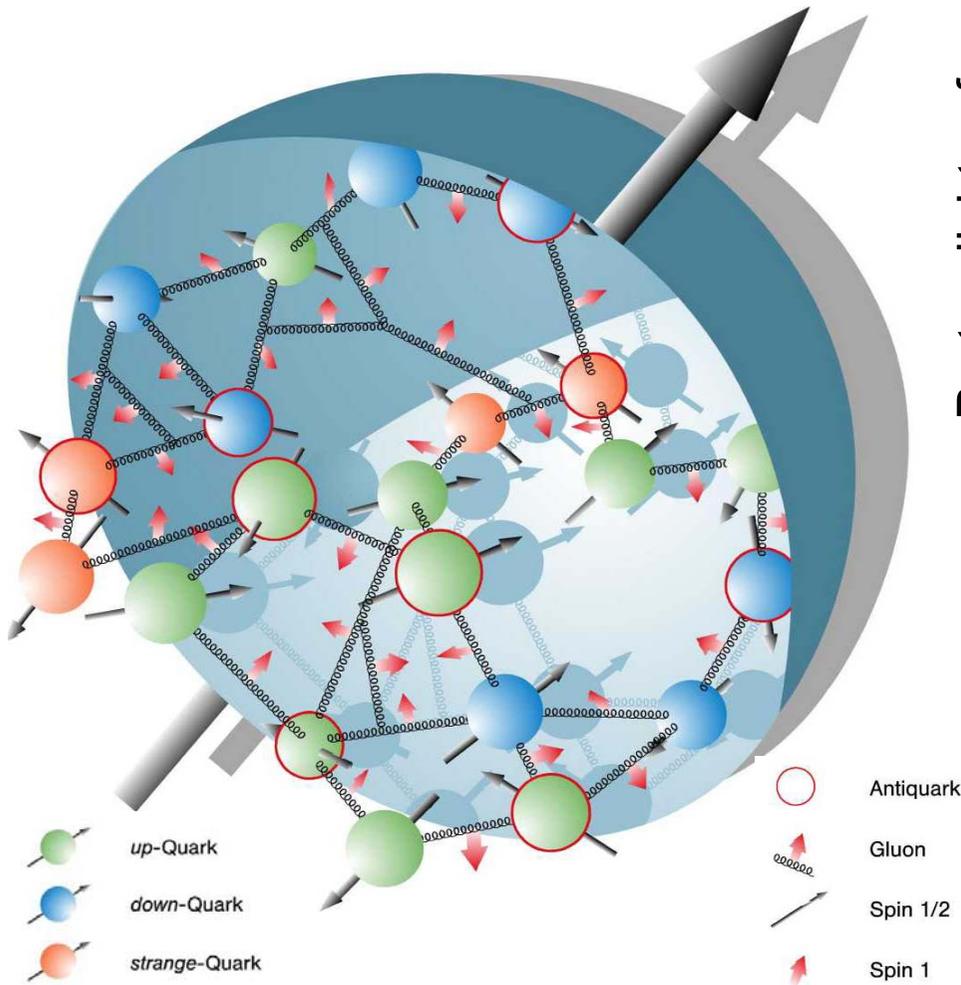


Partonverteilungen - Nukleonaufbau

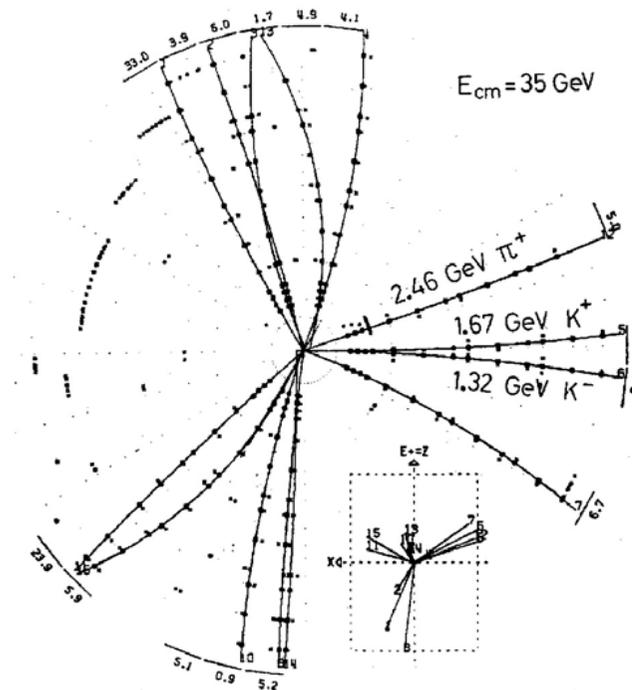
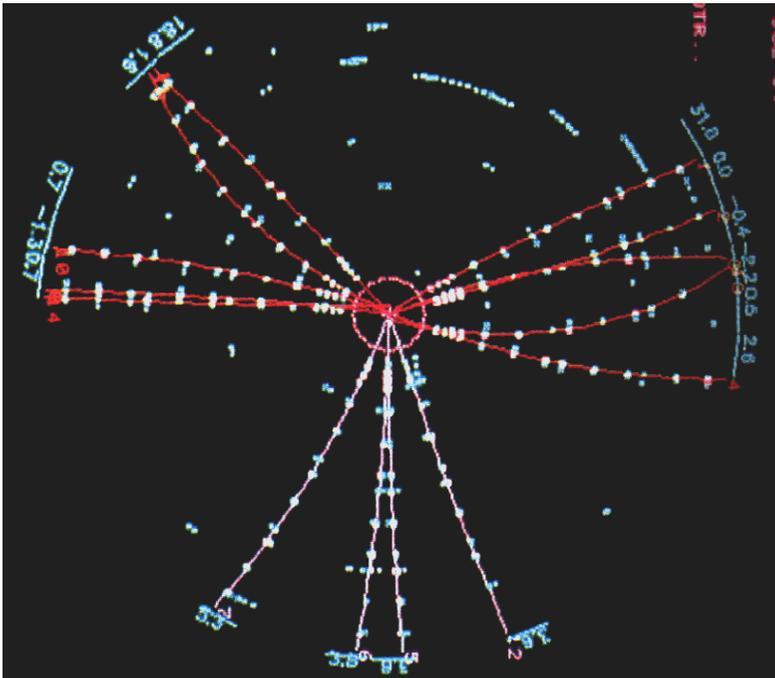
- Strukturfunktionen zeigen bei hohem Q^2 einen deutlichen Effekt der See-Quarks: zahlreiche Quarks mit extrem kleinem Impulsanteil x



Partondichte-Verteilungen (pdf – parton density function)



Glukonen spielen eine wichtige Rolle im Aufbau des Nukleons, sie tragen $\sim 50\%$ des Impulses



Glukonen wurden zuerst am DESY nachgewiesen (1979):
3-Jet events bei PETRA

