

Experimentelle Vermessung der Strukturfunktionen am MIT + SLAC, 1969

=> Nobelpreis 1996: Friedmann, Kendall, Taylor (Ergebnisse siehe Folien)

- Man beobachtet nur eine sehr schwache Abhängigkeit von Q^2 im Gegensatz zu dem starken ($\sim Q^{-8}$) Abfall, den man bei elastischer Streuung erwartet.

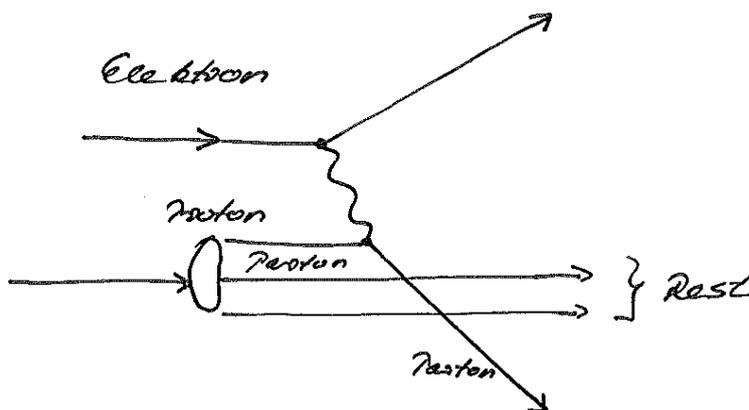
$$\left(\begin{array}{l} \text{Dipolformfaktor } G(Q^2) = \left(1 + \frac{Q^2}{0.71^2(\text{GeV}/c^2)} \right)^{-2} \Rightarrow \mathcal{O}(Q^{-4}) \\ G^2(Q^2) \Rightarrow \mathcal{O}(Q^{-8}) \end{array} \right)$$

- Wenn die Strukturfunktion nicht von Q^2 abhängt, dann sollte man aufgrund obiger Diskussion des Formfaktors annehmen, dass man an punktförmigen Teilchen streut. Da das Proton ein ausgedehntes Objekt ist, heißt das, dass es eine Substruktur aus punktförmigen Teilchen (\rightarrow sogenannte Partonen) besitzt.

Heute identifiziert man die Partonen mit Quarks und Gluonen.

Interpretation der Ergebnisse im Parton Modell

- Parton Modell:
- Nukleonen bestehen aus punktförmigen quasifreien Konstituenten (mit Spin 1/2)
 - Elektronen streuen elastisch an den Konstituenten
 - Gestreute Protonen verlassen das Proton und bilden Hadronen, die beobachtbar sind.



Infinite Momentum Frame (IMF)

\equiv Bezugssystem, in dem Proton unendlich großen Impuls \vec{P} entlang der z-Achse hat. $P = (E, 0, 0, \vec{P})$

Proton kann als Strom freier parallel fliegender Partonen beschrieben werden (keine Parton-Parton WW, kein transversaler Impuls)

Parton Kinematik im IMF

$$P_p = x_p \cdot P \quad x_p = \text{Partonimpulsanteil}$$

$$= x_p \begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix}$$

mit invarianter Partonmasse: $m_p = x_p \cdot M$
(M = Protonmasse)

Elastische Streuung im IMF

$$(P_p + q)^2 = P_p'^2 = m_p^2 c^2 \approx 0 \quad (\text{Protonmasse vernachlässigbar für große } q^2)$$

$$(P_p + q)^2 = (x_p P + q)^2$$

$$= x_p^2 P^2 + 2x_p Pq + q^2 \approx 0$$

$$P^2 = M^2 c^2 \text{ (Protonmasse)}$$

$$Pq = \begin{pmatrix} M \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \vec{p} - \vec{p}' \end{pmatrix} = Mv$$

$$\Rightarrow 0 \approx \underbrace{x_p^2 M^2 c^2}_{\ll |q^2|} + 2x_p Mv + q^2$$

$$\Rightarrow x_p = -\frac{q^2}{2Mv} = \frac{Q^2}{2Mv} \stackrel{!}{=} x_B$$

Interpretation

Inelastische Streuung am Proton mit einem Bjorken $x_B = \frac{Q^2}{2Mv} =: x$ kann als elastische Streuung an einen Parton, das den Impuls $x_p = x$ trägt, beschrieben werden.

Unter der Annahme, dass e^- elastisch mit dem Parton streut, kann man von „außen“ den Impulsanteil x und damit die Impulsverteilung $f(x)$ der Partonen i messen:

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dx} \sim f_i(x) \quad \text{Partonimpulsverteilung}$$

WQ für elastische e^- -Parton Streuung mit Impulsanteil x :

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Parton}} = z_i^2 \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} \left(1 + \frac{Q^2}{2m_p^2 c^2} \tan^2 \Theta/2\right)$$

↑
Ladung des Partons i

$$= z_i^2 \left(\frac{d\sigma}{d\Omega^2}\right)_{\text{Mott}} \left(1 + \frac{Q^2}{2x_p^2 M_p^2 c^2} \tan^2 \Theta/2\right)$$

WQ für tiefinelastische Streuung = Summe über alle Partonen

$$\left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega dx}\right)_{exp} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} \sum_i z_i^2 f_i(x) \left(1 + \frac{Q^2}{2x^2 M_p^2 c^2} \tan^2 \Theta/2\right)$$

mit $f_i(x) dx$ = Wahrscheinlichkeit Parton i mit $x \in [x, x + dx]$ zu finden.

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

$$\nu = E - E'$$

$$d\nu = -dE'$$

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

$$\frac{d}{d\nu} = \frac{d}{dx} \frac{dx}{d\nu} = \frac{d}{dx} \left(-\frac{Q^2}{2M\nu^2}\right) = -\frac{x}{\nu} \frac{d}{dx}$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dx} = \frac{\nu}{x} \frac{d}{dE'}$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega dx}\right) &= \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} \left(\frac{F_2(x)}{x} + \frac{2 F_1(x)\nu}{x Mc^2} \tan^2 \Theta/2\right) \\ &= \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} \left(\frac{F_2(x)}{x} + \frac{2 F_1(x)Q^2}{2x^2 M^2 c^2} \tan^2 \Theta/2\right) \end{aligned}$$

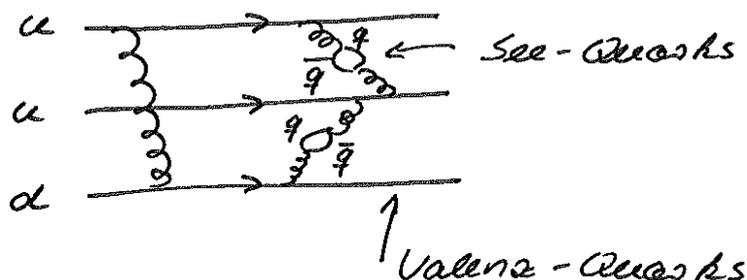
$$\frac{F_2(x)}{x} = \sum_i z_i^2 f_i(x) \Rightarrow F_2(x) = x \sum_i z_i^2 f_i(x)$$

$$2F_1(x) = \frac{F_2(x)}{x} = \sum_i z_i^2 f_i(x)$$

$$\Rightarrow \boxed{2 \times F_1(x) = F_2(x)} \quad \text{Callen-Cross-Beziehung}$$

=> Spin der Partonen = 1/2 !

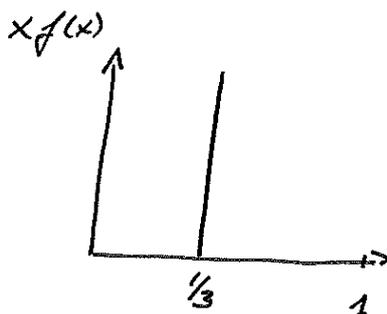
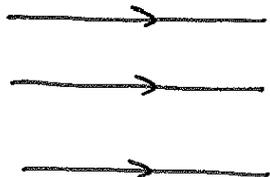
Bisher Proton als aus 3 Quarks aufgebaut angenommen. Jedoch aufgrund von Vakuumfluktuationen gibt es Quark-Antiquark Paare, sogenannte See-Quarks.



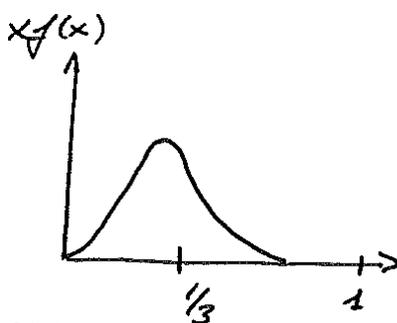
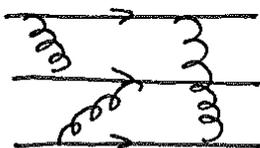
$$\Rightarrow F_2(x) = x \sum_i z_i^2 (f_i^q(x) + f_i^{\bar{q}}(x))$$

$x \cdot f(x)$ für verschiedene einfache Parton-Modelle

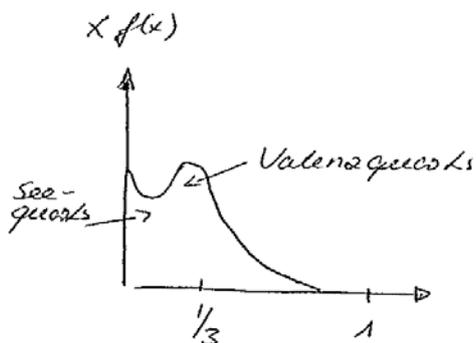
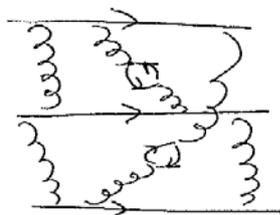
3 Quarks ohne WW



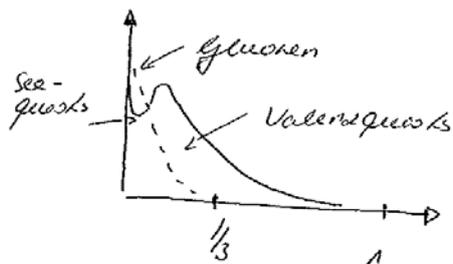
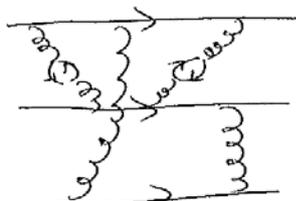
3 Quarks mit WW



3 Quarks mit WW und Seequarks



3 Quarks mit WW, Seequarks und Gluonen



50% des Protonimpulses wird von Gluonen getragen

Die Partonverteilung des Protons und Neutrons wurden durch eine Vielzahl von Streuexperimenten bestimmt: $e p$, μp , νp Streuung, woraus sich die Valenzquark wie auch die Seequark Verteilung extrahieren lässt. (siehe Folie)

Zusammenfassung:

- See-Quarks tragen in der Regel sehr kleines x
- Maximum der Valenzquarkverteilung bei $x = 0.15, \dots, 0, 2$
- $\int x f(x) dx =$ Impulsanteil des Protons der von Quarks getragen wird
 $\equiv 50\%$ des Protonimpulses

\Rightarrow die übrigen 50% des Protonimpulses werden von Gluonen getragen