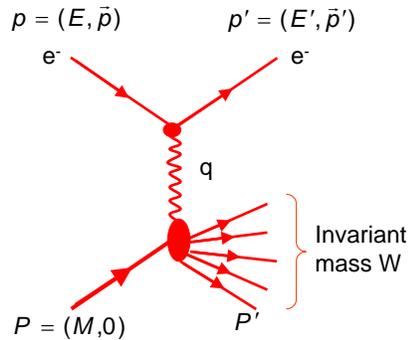


### 3.2 Kinematik der tiefinelastischen Streuung



Reaktion beschrieben durch Variablen:

$$\nu, q^2, W$$

Man findet:

$$W^2 = M^2 + 2Pq + q^2$$

$$2Pq = 2M\nu$$

---


$$q^2 = W^2 - M^2 - 2M\nu = -Q^2$$

a) Elastische Streuung:  $W=M$

$$\frac{Q^2}{2M\nu} = 1$$

Kinematik durch eine Variable bestimmt

b) Inelastische Streuung:  $W > M$

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

Kinematik erfordert 2 Variablen zur eindeutigen Festlegung des Prozesses:

$$(\theta, E'), (Q^2, \nu), \dots$$

### 3.3 Wirkungsquerschnitt für tiefinelastische ep Streuung

Elastische Streuung zweier punktförmiger Spin  $\frac{1}{2}$  Teilchen

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Dirac} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} \cdot \left(1 + 2\tau \tan^2 \frac{\theta}{2}\right) \quad \tau = \frac{Q^2}{4M^2}$$

Erweiterung auf tiefinelastische Streuung an ausgedehntem Proton

$$\left(\frac{d^2\sigma}{dQ^2 d\nu}\right)_{ep} = \left(\frac{d\sigma}{dQ^2}\right)_{Mott} \cdot (W_2(\nu, Q^2) + 2W_1(\nu, Q^2) \tan^2 \frac{\theta}{2})$$

$W_1(\nu, Q^2), W_2(\nu, Q^2)$  Inelastische Formfaktoren bzw. Strukturfunktionen

Man erwartet dass  $W_1$  und  $W_2$  explizit abhängig von 2 Variablen sind.

## a) Erste Messung der Strukturfunktion $W_2$

VOLUME 23, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

20 OCTOBER 1969

OBSERVED BEHAVIOR OF HIGHLY INELASTIC ELECTRON-PROTON SCATTERING

M. Breidenbach, J. I. Friedman, and H. W. Kendall

Department of Physics and Laboratory for Nuclear Science,\*  
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139

and

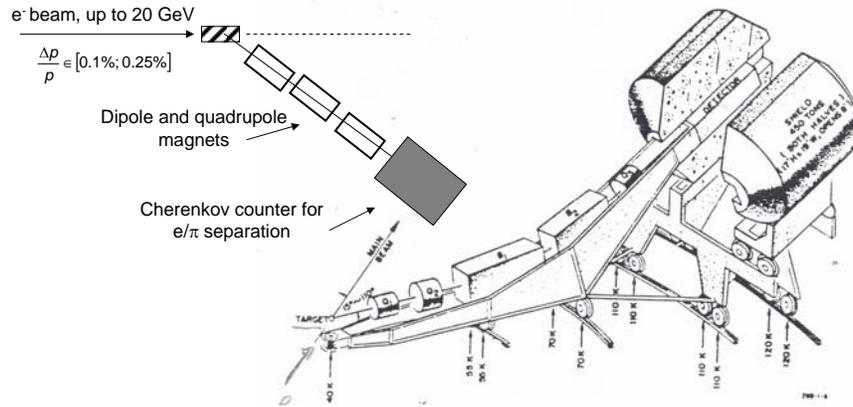
E. D. Bloom, D. H. Coward, H. DeStaebler, J. Drees, L. W. Mo, and R. E. Taylor  
Stanford Linear Accelerator Center,† Stanford, California 94305

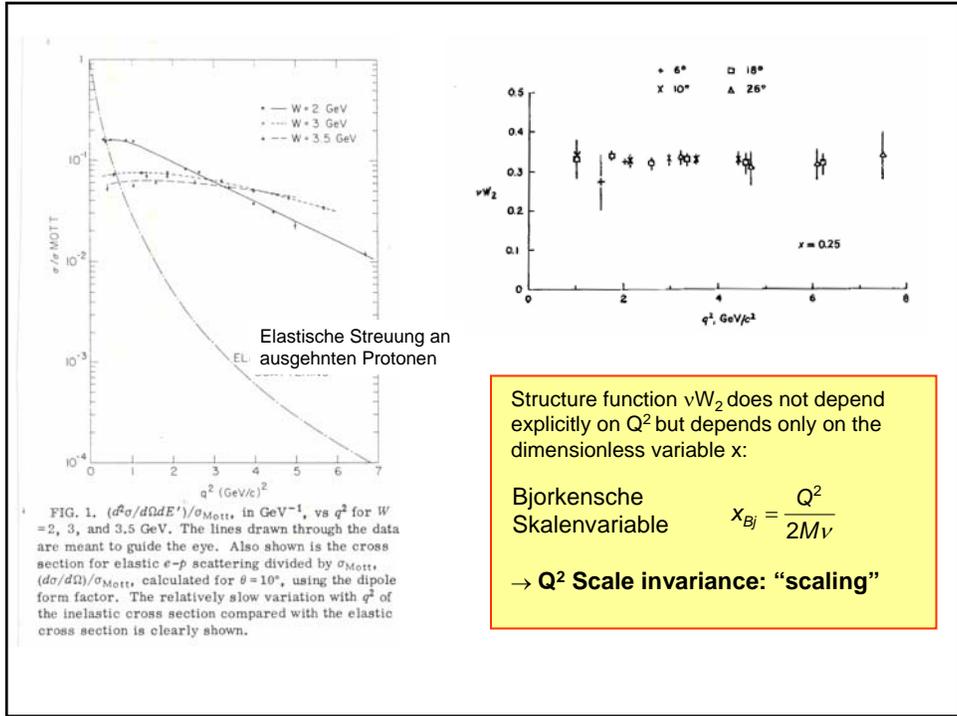
(Received 22 August 1969)

SLAC & MIT  
Experiment 1969

Spectrometer at given  $\theta$

$$\frac{\Delta p}{p} \sim 0.1\% \quad \Delta\theta \sim 0.7\text{mrad}$$





**b) Interpretation**

Scaling wurde von Bjorken für den Fall vorausgesagt, dass Nukleonen aus quasifreien punktförmigen Partonen (Quarks) bestehen an denen das Elektron elastisch streut.

**→ Sensation:**

Statisches Quarkmodell bei dem man die Hadroneigenschaften (Isospin und Strangeness) mittels drei verschiedener Quarks erklärt, war sehr erfolgreich. Es gab allerdings keinerlei Hinweise für eine Substruktur der Hadronen.



### The Nobel Prize in Physics 1990



<b>Jerome I. Friedman</b>	<b>Henry W. Kendall</b>	<b>Richard E. Taylor</b>
---------------------------	-------------------------	--------------------------

"for their pioneering investigations concerning deep inelastic scattering of electrons on protons and bound neutrons, which have been of essential importance for the development of the quark model in particle physics"

### c) Strukturfunktionen

Statt  $W_1$  and  $W_2$  werden heute die dimensionslosen Strukturfunktionen  $F_1$  and  $F_2$  benutzt:

$$\nu W_2(\nu, Q^2) \rightarrow F_2(x) = \nu W_2(x = \frac{Q^2}{2M\nu})$$

$$MW_1(\nu, Q^2) \rightarrow F_1(x) = MW_1(x = \frac{Q^2}{2M\nu})$$

Seit den 70er Jahren fand eine Vielzahl von Experimenten zur Untersuchung der Protonstruktur mit Leptonen statt:

- $\mu$  Nukleon Streuung: EMC, NMC
- $\nu$  Nukleon Streuung: CDHS, CCFRR
- e Nukleon Streuung: H1, ZEUS (HERA)  später

## Strukturfunktion $F_2(x)$

Annähernde Skalen-  
unabhängigkeit für  
mittlere  $x$ .

Für große und kleine  $x$ :  
 $Q^2$  Abhängigkeit von  $F_2(x)$   
(s. Abschnitt 3.6 und Kap VII)

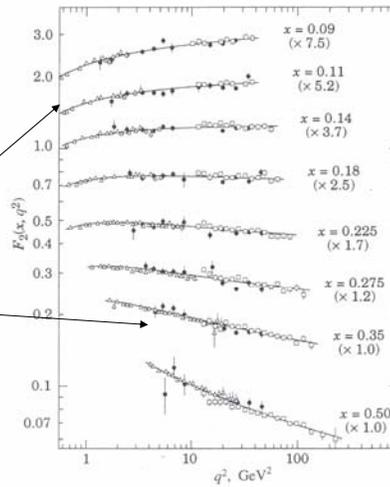


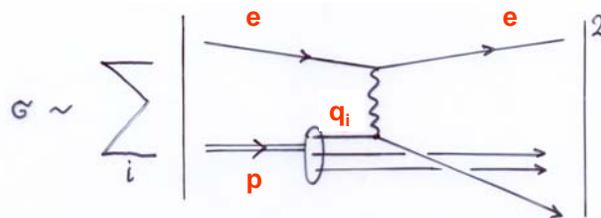
Fig. 6.14. The nucleon structure function  $F_2(x, q^2)$  measured in deep inelastic muon and electron scattering off a deuterium target. The curves show the dependence expected from QCD, with  $\Lambda = 0.2$  GeV. For clarity, the different curves have been multiplied by the factors shown in brackets. •, NMC;  $\Delta$ , SLAC;  $\square$ , BCDMS. (After Montanet *et al.* 1994.)

## 3.4 Interpretation im Parton-Modell

### a) ep Streuung im Partonmodell

1. Nucleon besteht aus quasi-freien punktförmigen Bausteinen (Partonen, Quarks)
2. Lepton streut elastisch an freien Spin  $\frac{1}{2}$  Partonen
3. Gestreutes Parton wechselwirkt stark mit den anderen Partonen (Zuschauer) um beobachtbare Hadronen zu formen.

$\sigma =$  Inkohärente Summe aller möglichen Parton (Quark) Beiträge



**b) "Infinite Momentum Frame" (IMF) / Breit-Frame**

Bezugssystem in dem Proton unendlich großen Impuls P entlang der z-Achse hat:

$$P = (E, 0, 0, \vec{P}) \quad \text{fuer } |\vec{P}| \gg M : E = |\vec{P}|$$

Proton = Strom quasi-freier parallel fliegender Partonen:

- keine WW zwischen Partonen
- kein Transversalimpuls der Partonen

**Parton-Kinematik im IMF**

$$\left. \begin{aligned} p_p &= x_p P \\ \vec{p}_p &= x_p \vec{P} \\ E_p &= x_p E \end{aligned} \right\} \begin{aligned} m_p^2 &= x_p^2 (E^2 - \vec{P}^2) \\ &= x_p^2 M^2 \end{aligned}$$

$$m_p = x_p M$$

**Kinematik im p Ruhesystem**

$$\begin{aligned} P &= (M, 0) \\ q &= (\nu, \vec{q}) \\ Pq &= M\nu \end{aligned}$$

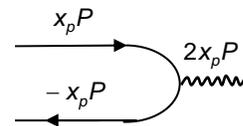
**Elastische Parton-Streuung**

4er Impulserhaltung

$$\left. \begin{aligned} p_p + q &= p'_p \\ x_p P + q &= p'_p \end{aligned} \right\} \begin{aligned} p_p^2 + 2x_p Pq + q^2 &= p_p'^2 \\ \underbrace{m_p^2} & \quad \underbrace{m_p^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow 2x_p Pq &= -q^2 \\ 2x_p M\nu &= Q^2 \end{aligned}$$

$$1 = \frac{Q^2}{2x_p M\nu} = \frac{Q^2}{2m_p \nu}$$



Nun gilt aber auch: Bjorken SkalenvARIABLE

$$x_{Bj} = \frac{Q^2}{2M\nu} = x_p \equiv x$$

D.h. ep Streuung mit einem Bjorken  $x = \frac{Q^2}{2M\nu}$  kann als elastische Streuung an einem Parton, das den 4er Impulsanteil x des Protons trägt interpretiert werden.

$\rightarrow$  Unter der Annahme dass die e<sup>-</sup> elastisch mit den Partonen streuen, kann man von außen die Impulsverteilung der Partonen messen.

### c) WQ im Parton-Modell

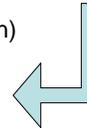
$$\left\{ \dots \right\}_{e\mu \rightarrow e\mu}^{\text{elastic}} = \left( \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{Q^2}{2M^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

WQ für Parton i:

Ladung  $z_i$ , Masse  $m_i$ , Partondichte  $f_i(x)$

(=Wahrscheinlichkeit Parton i im Impulsintervall  $[x, x+dx]$  zu finden)

$$\frac{d\sigma}{dQ^2} = \left( \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \right) \frac{E'}{E} \cdot z_i^2 \cdot f_i(x) \left( \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{Q^2}{2m_i^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) dx$$



Inelastischer ep WQ:

$$\frac{d^2\sigma}{dQ^2 dx} = \left( \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \right) \frac{E'}{E} \cdot \sum_i z_i^2 \cdot f_i(x) \left( \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{Q^2}{2x^2 M^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\frac{d^2\sigma}{dQ^2 dx} = \left( \frac{4\pi\alpha^2}{Q^4} \right) \frac{E'}{E} \cdot \frac{F_2(x)}{x} \left( \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{2xF_1(Q^2)}{F_2(x)} \frac{Q^2}{2x^2 M^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right)$$

Inelastischer WQ mit Strukturfunktionen: