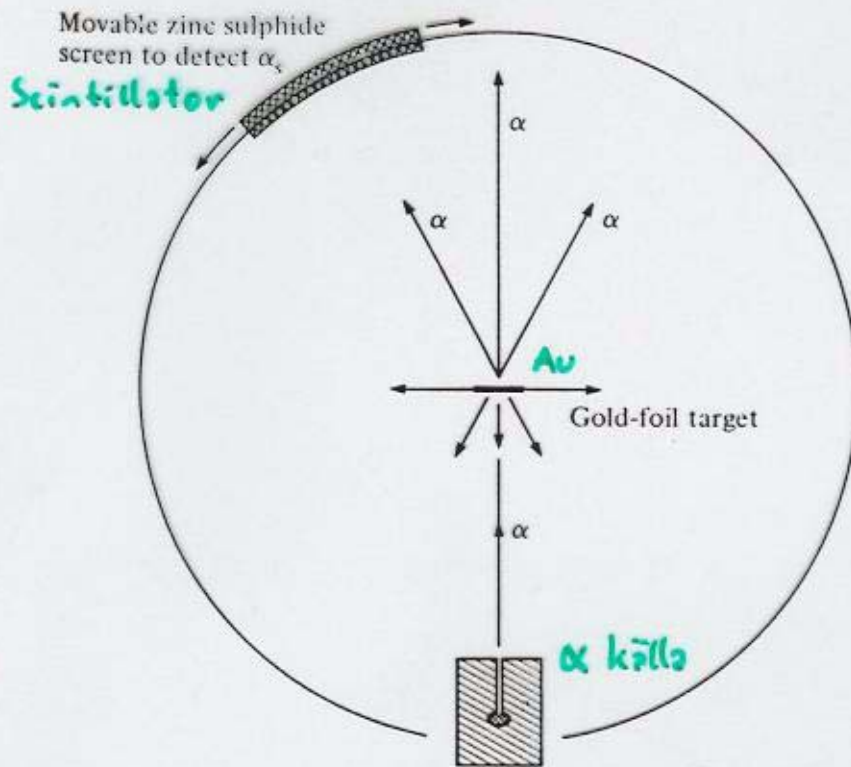


Upptäckten av kvarkar (1968)

- Laboratorium = SLAC (Stanford, Kalifornien)
- Accelerator = SLAC ($\sqrt{s}=4-66\text{ eV}$)
- Experiment = SLAC-MIT (e^-H_2 fixed target)
- Process = $e^- + p \rightarrow e^- + X$
- Nobelpristagare = Friedman, Kendall och Taylor

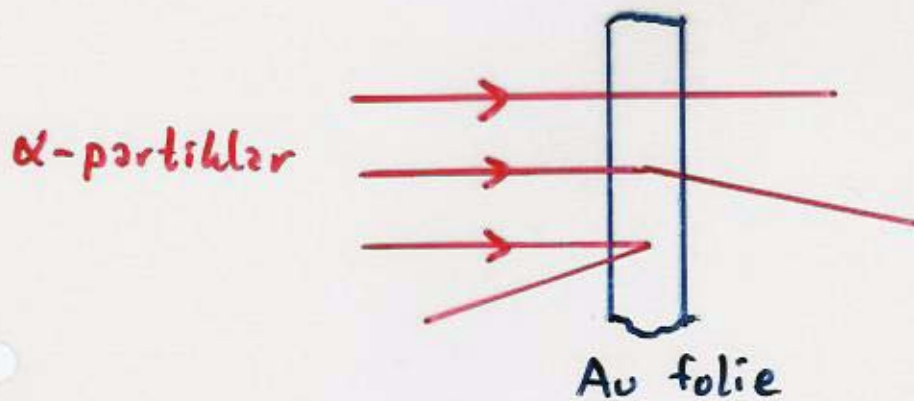
Rutherford's spridningsexperiment (1911)

Fig. 1.5. The Geiger and Marsden experiment. According to Rutherford's scattering formula, the number of α particles scattered through a given angle decreases as the angle increases away from the forward direction.

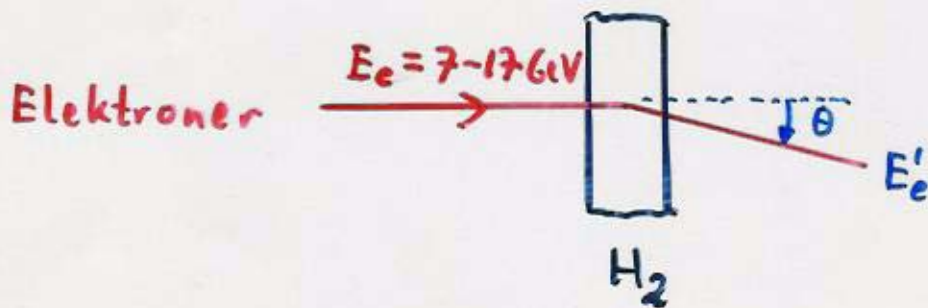


SLAC-MIT experimentet

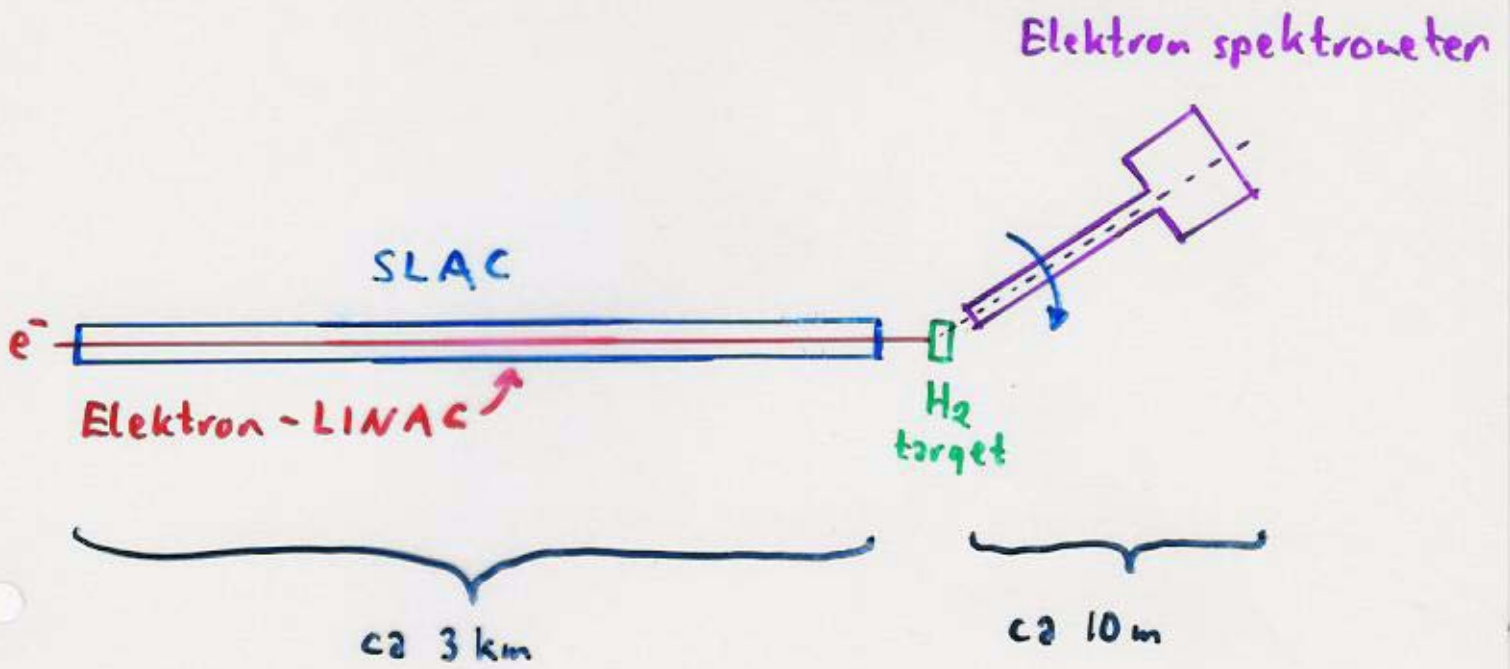
Rutherford's upptäckt av atomkärnor:



SLAC-MIT experimentets upptäckt av kvarkar:

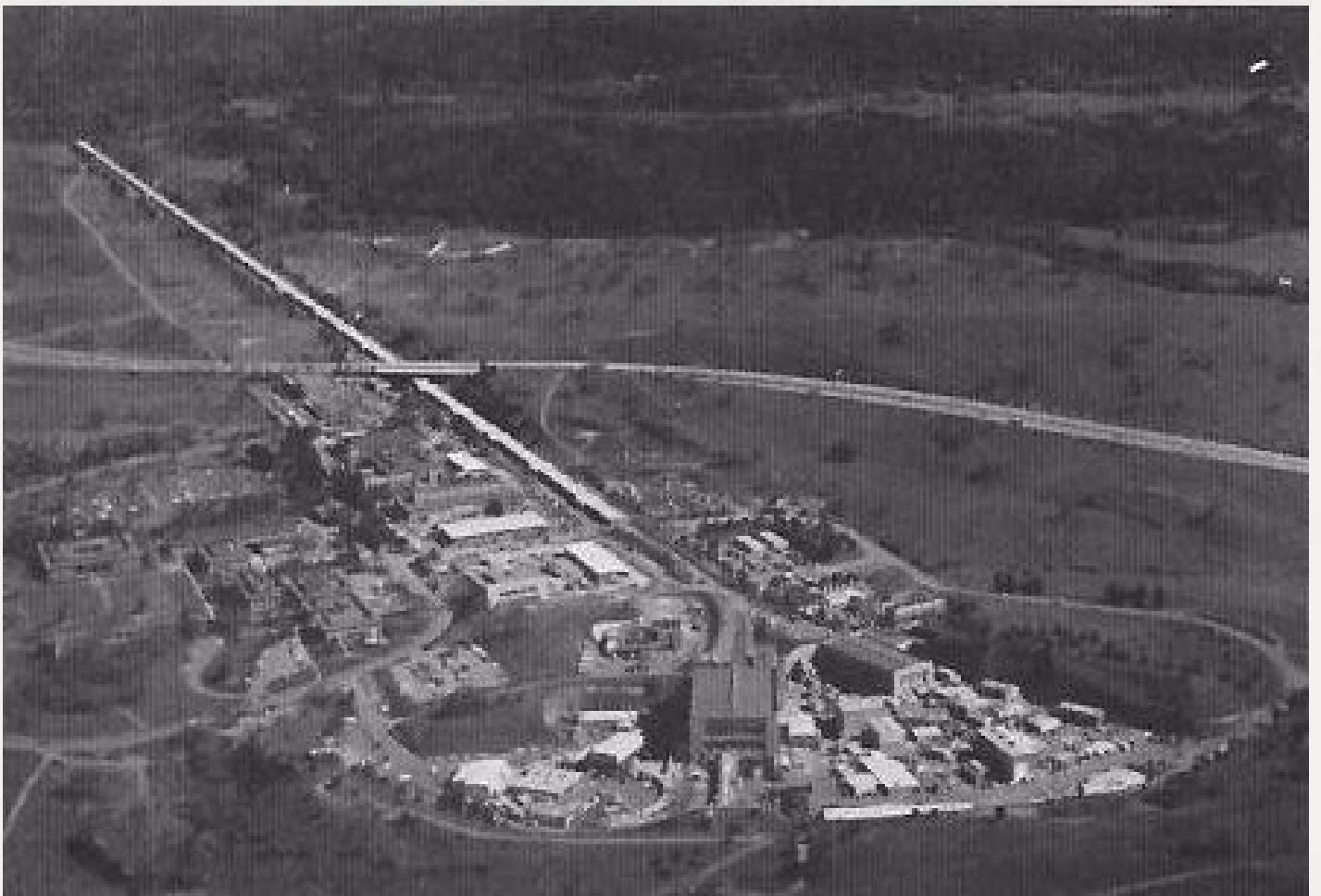


Från mätningen av den spridda elektronens energi E'_e och spridningsvinkel θ kunde man dra slutsatsen att protonen är uppbyggd av kvarkar.



SLAC

Stanford Linear Accelerator Center



SLAC-MIT experimentet

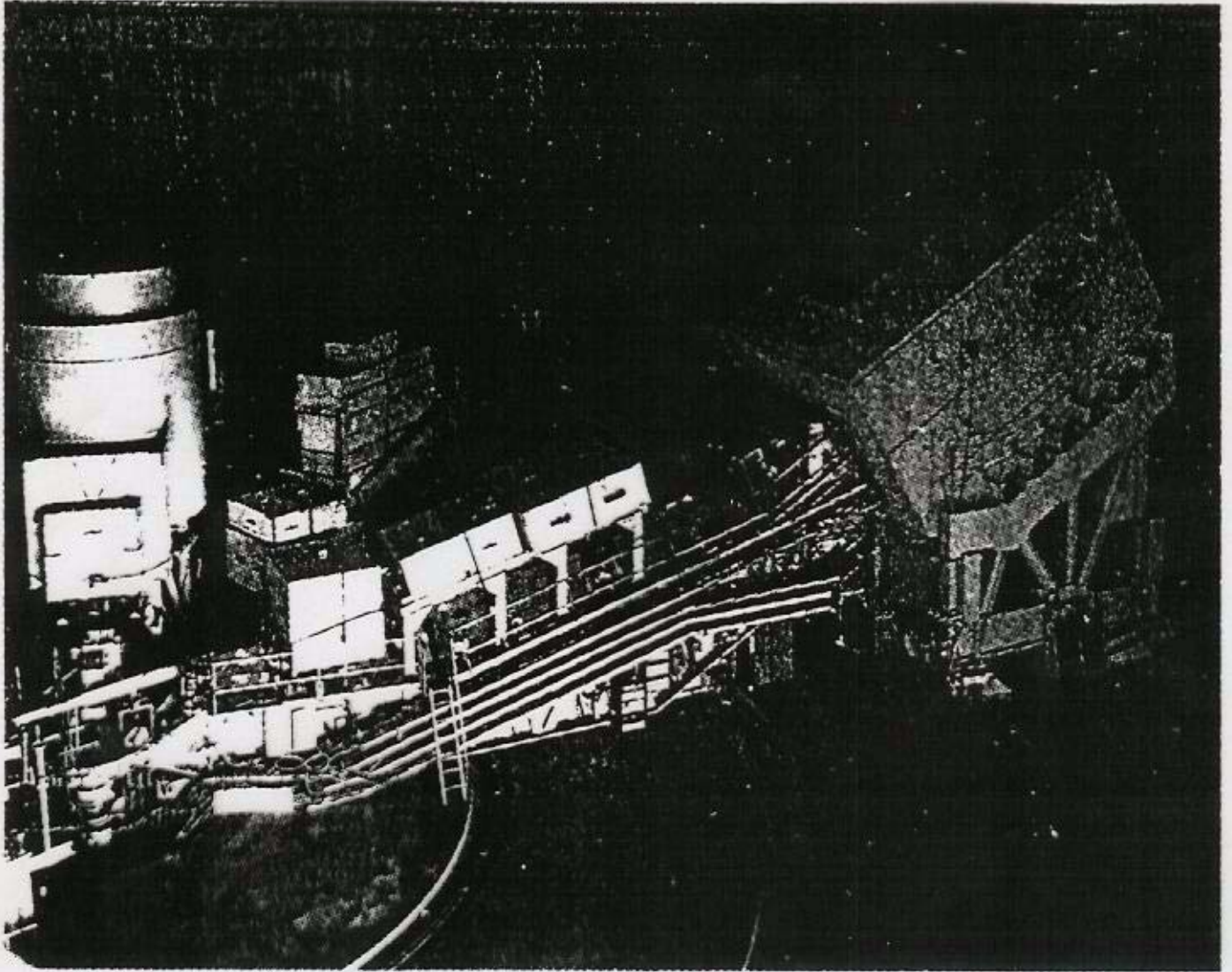
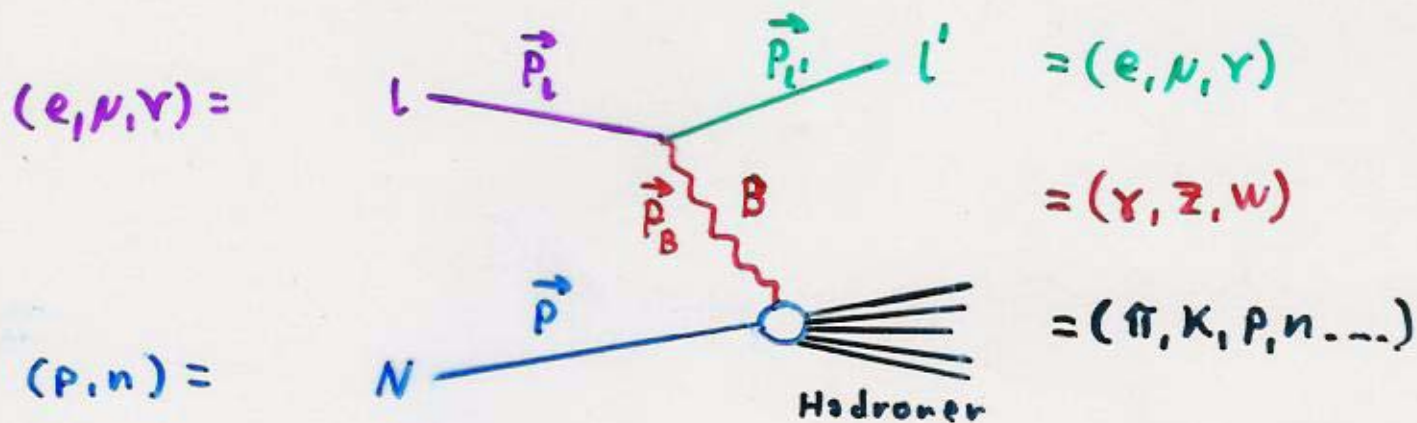


Fig. 2. Elektronerna från acceleratoren sprids i ett strålmål av flytande väte eller deuterium (på den cirkulära plattformen till vänster) och energin mäts i en av tre spektrometrar bestående av avlänkingsmagneter och detektorer. Dessa spektrometerarmar, varav den på bilden är drygt 20 m lång, kan vridas på rals kring strålmålet för att tacka olika vinkelområden.

Lepton-Hadron kollisioner

Kinematik



$$S \equiv (\vec{P}_L + \vec{P})^2$$

Massan av leptonen och hadronen i kvadrat.

$$W^2 \equiv (\vec{P} + \vec{P}_B)^2 \leq S$$

Massan av bosonen och hadronen i kvadrat.

$$Q^2 \equiv -\vec{P}_B \cdot \vec{P}_B \leq S$$

Massan av bosonen i kvadrat.

$$\gamma \equiv \frac{1}{m_p} \vec{P} \cdot \vec{P}_B \leq \frac{1}{2m_p} S$$

Den överförda energin i protonens vilosystem ($\gamma = E_L - E_{L'}$).

$$X_{Bj} \equiv -\frac{1}{2} \frac{\vec{P}_B \cdot \vec{P}_B}{\vec{P} \cdot \vec{P}_B} \leq 1$$

I parton modellen ger x andelen av protonens rörelsemängd som partonen har.

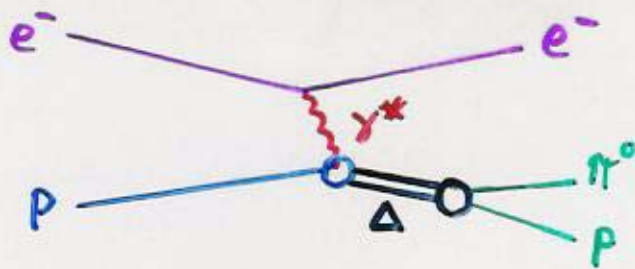
$$Y_{Bj} \equiv \frac{\vec{P} \cdot \vec{P}_B}{\vec{P} \cdot \vec{P}_L} \leq 1$$

Y är den relativa energiöverföringen i hadronens vilosystem

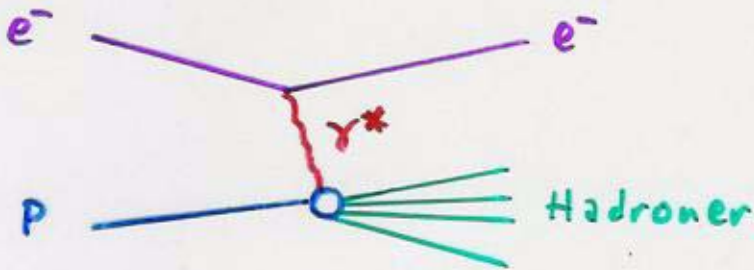
$$Y = \frac{E_L - E_{L'}}{E_L} = \frac{\gamma}{E_L}$$

Elektron-Proton Kollisionen

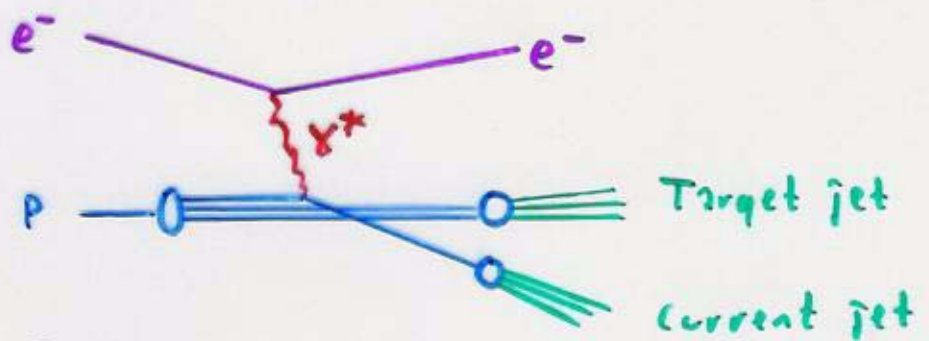
$W = m_{\Delta}$



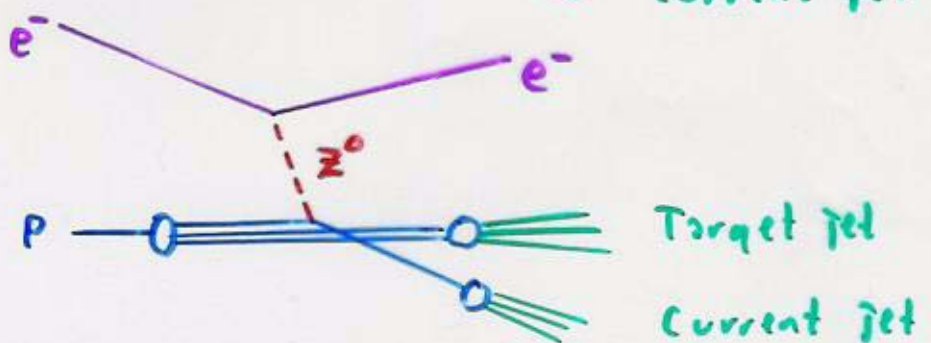
$W \lesssim 10 \text{ GeV}$



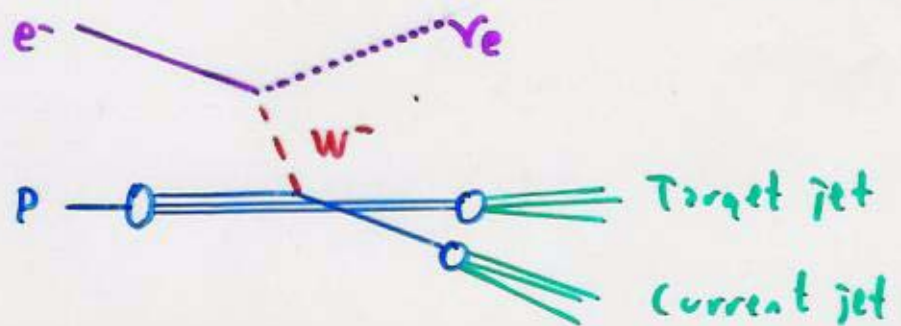
$W \gtrsim 10 \text{ GeV}$



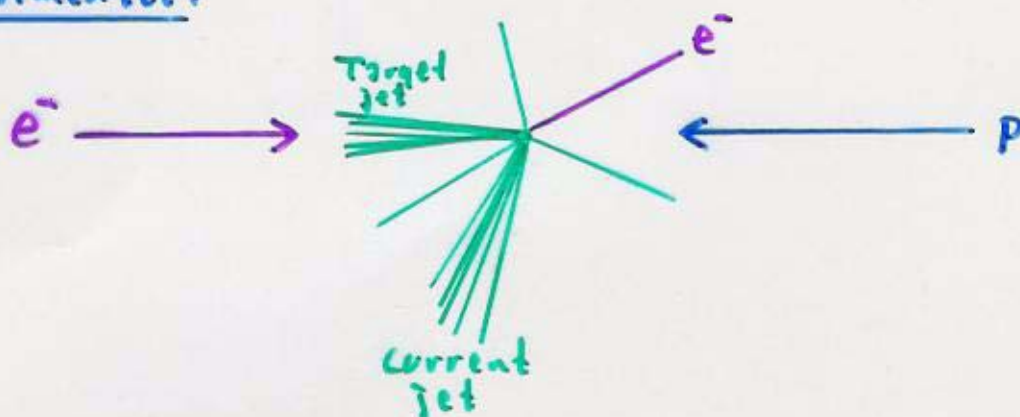
$Q \gtrsim m_z$



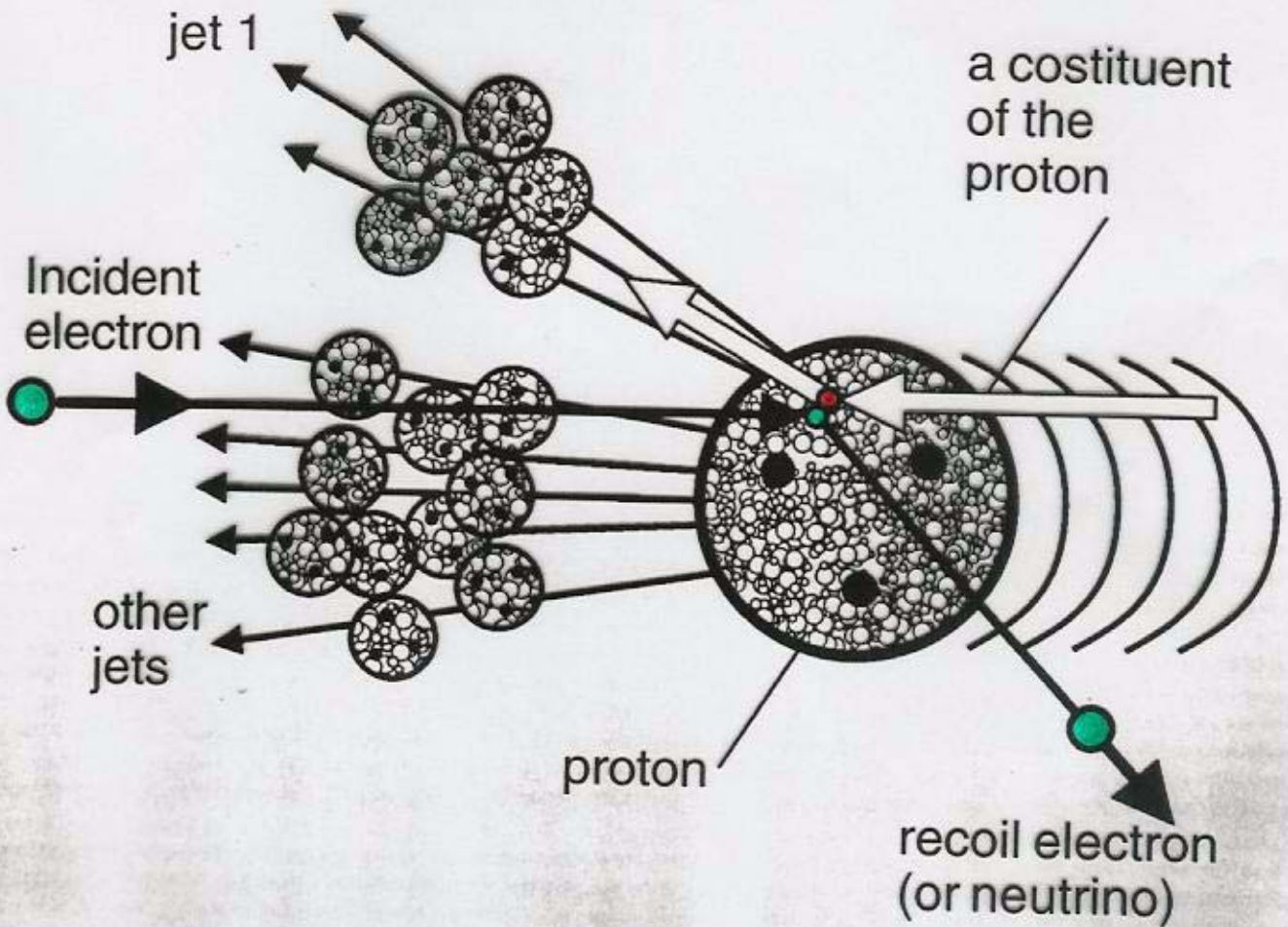
$Q \gtrsim m_w$



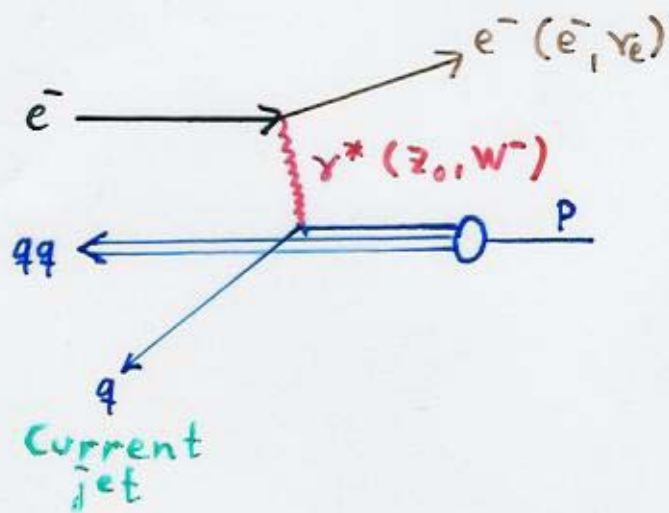
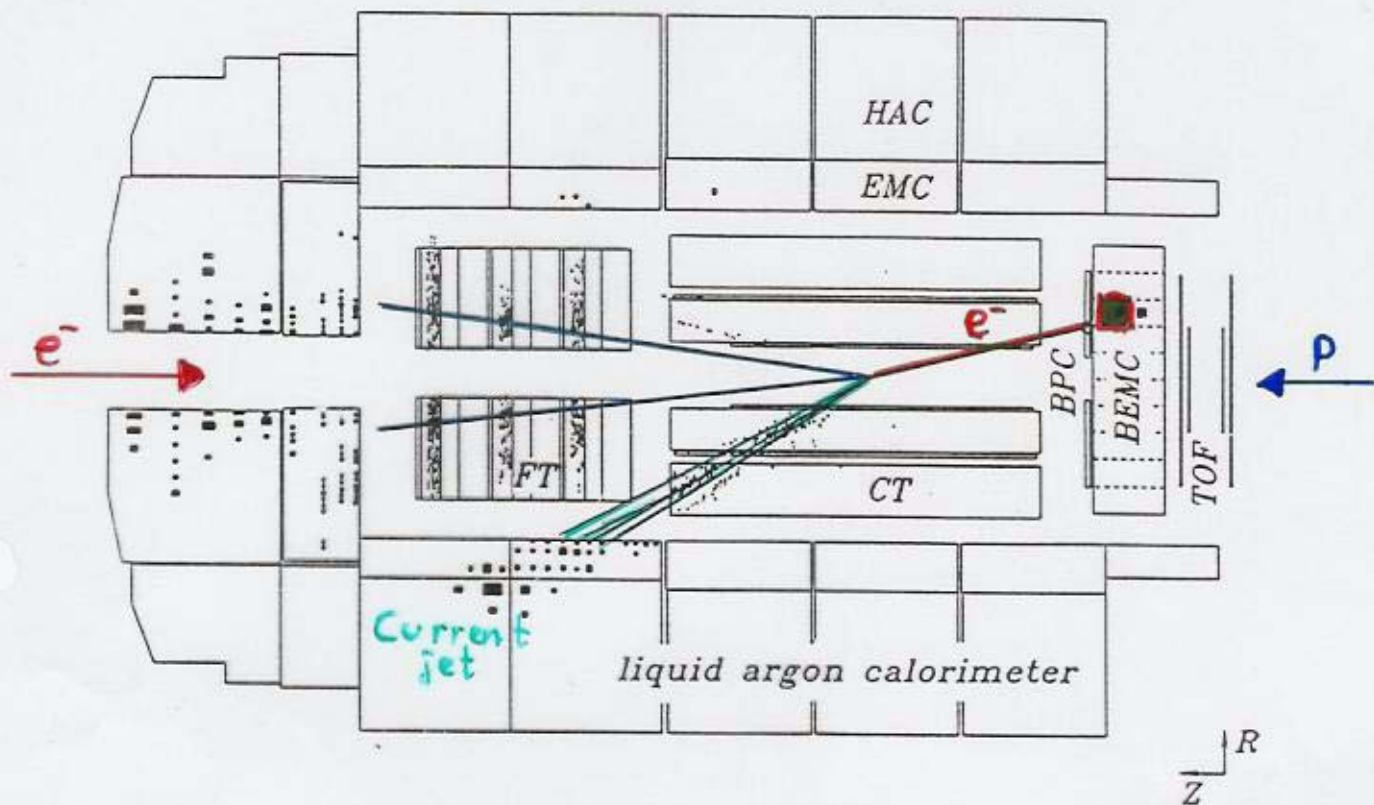
I experimentet:



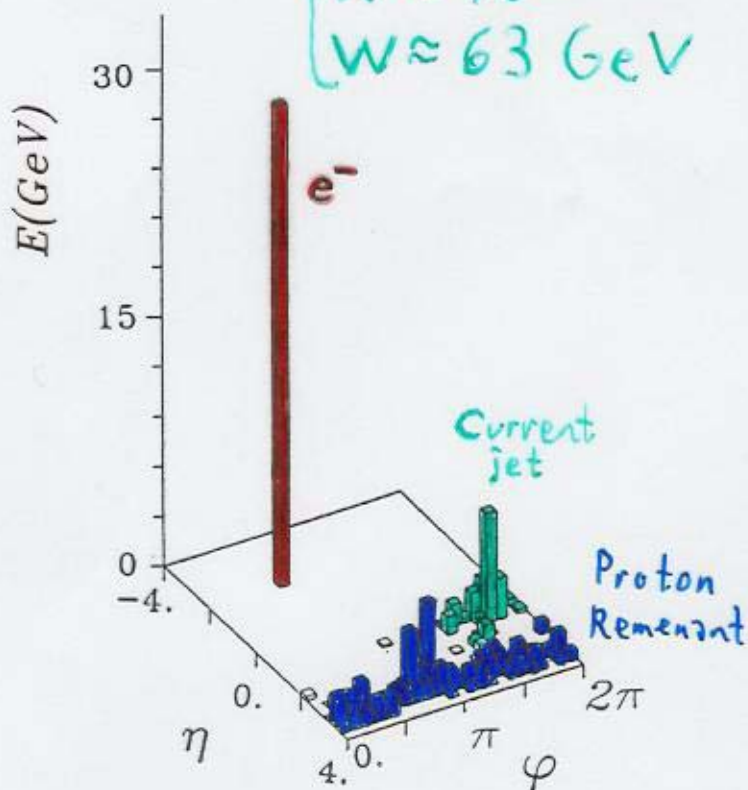
Elektron - Proton kollision



DIS Event



$$\begin{cases} Q^2 \approx 40 \text{ GeV}^2 \\ x \approx 10^{-2} \\ W \approx 63 \text{ GeV} \end{cases}$$



Elastisk spridning

Rutherfords spridningsformel för spridning av partiklar med spin $= 0$ mot en punktladdning är:

$$\sigma_R = \frac{\alpha^2}{4E^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

där $\begin{cases} \alpha: \text{finstrukturkonstanten} \\ E: \text{partikelns energi} \\ \theta: \text{spridningsvinkeln} \end{cases}$

Motts spridningsformel för spridning av partiklar med spin $= 1/2$ mot en punktladdning är:

$$\sigma_M = \cos^2 \frac{\theta}{2} \cdot \sigma_R$$

Inelastisk spridning

För inelastisk ep eller np spridning gäller

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \theta^2 \partial \nu} = \sigma_M \left[\frac{2}{m_p} \tan^2 \frac{\theta}{2} F_1(x, Q^2) + \frac{1}{\nu} F_2(x, Q^2) \right]$$

där $\begin{cases} m_p = \text{protonens massa} \\ Q^2 = \text{den virtuella fotonens massa} \\ \nu = E - E' \text{ dvs skillnaden i elektron energi,} \\ \text{före och efter spridningen.} \\ x = \frac{1}{2m_p} \cdot \frac{Q^2}{\nu} \\ \left. \begin{array}{l} F_1(x, Q^2) \\ F_2(x, Q^2) \end{array} \right\} \text{Dimensionslösa strukturfunktioner} \\ \text{som måste bestämmas experimentellt.} \end{cases}$

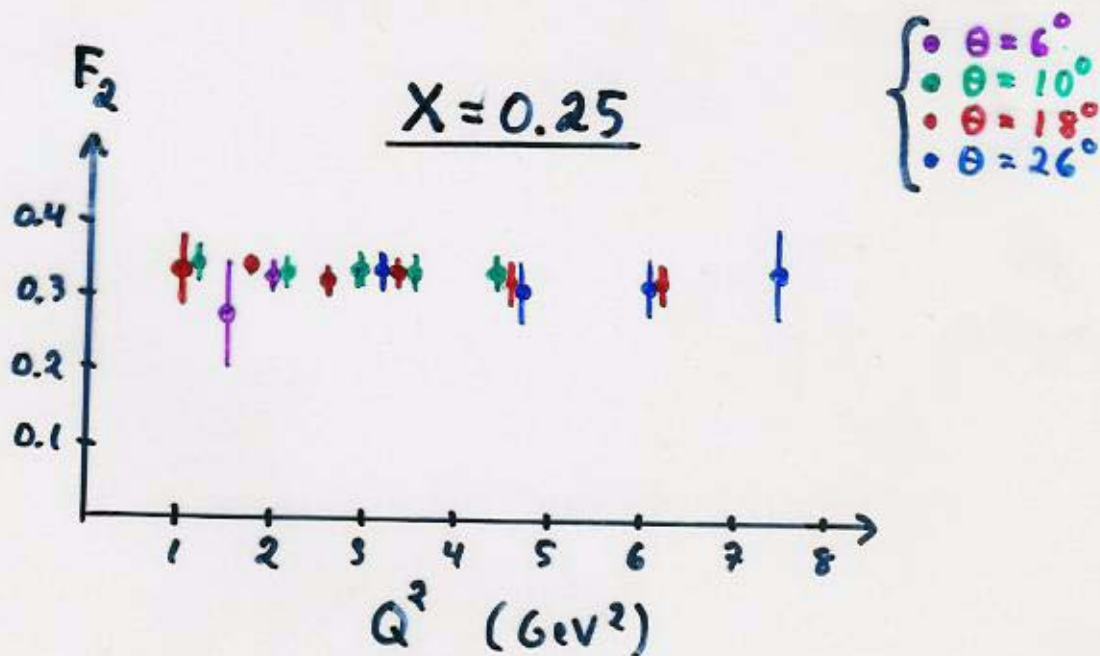
"Bjorken scaling" eller "scale invariance"

En teoretiker som heter Bjorken visade 1967 att om protonen var uppbyggd av mindre beståndsdelar (partoner) så ska F_1 och F_2 ej bero av Q^2 dvs

$$\begin{cases} F_1(x, Q^2) = F_1(x) \\ F_2(x, Q^2) = F_2(x) \end{cases}$$

"Bjorken scaling"

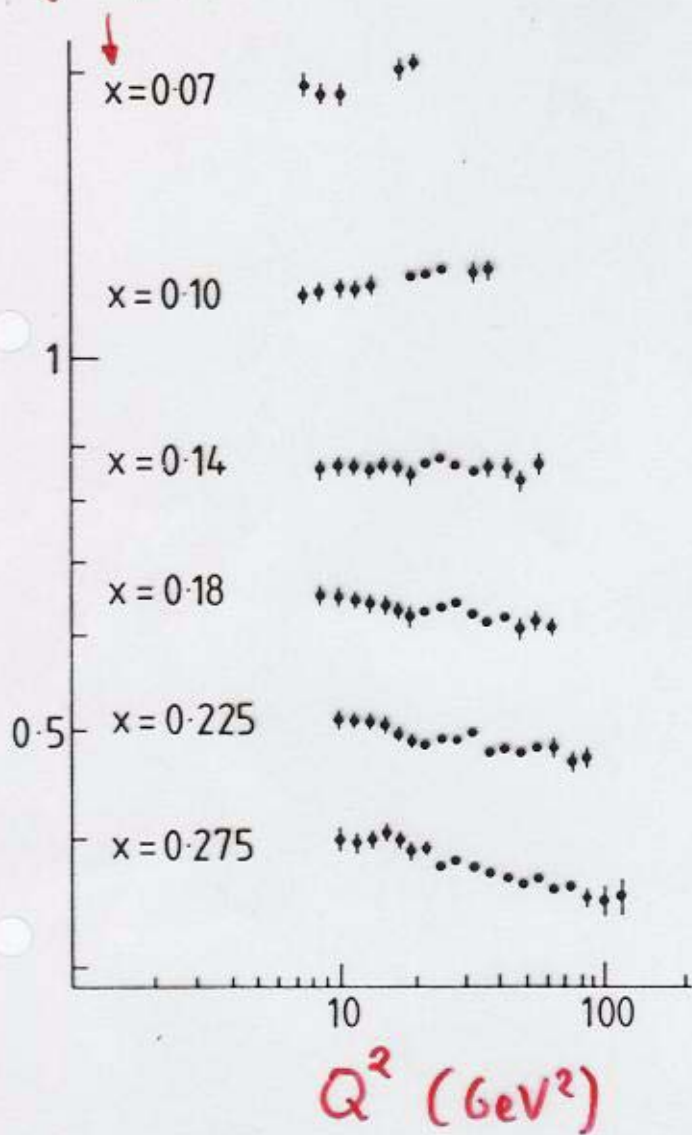
SLAC-MIT experimentet



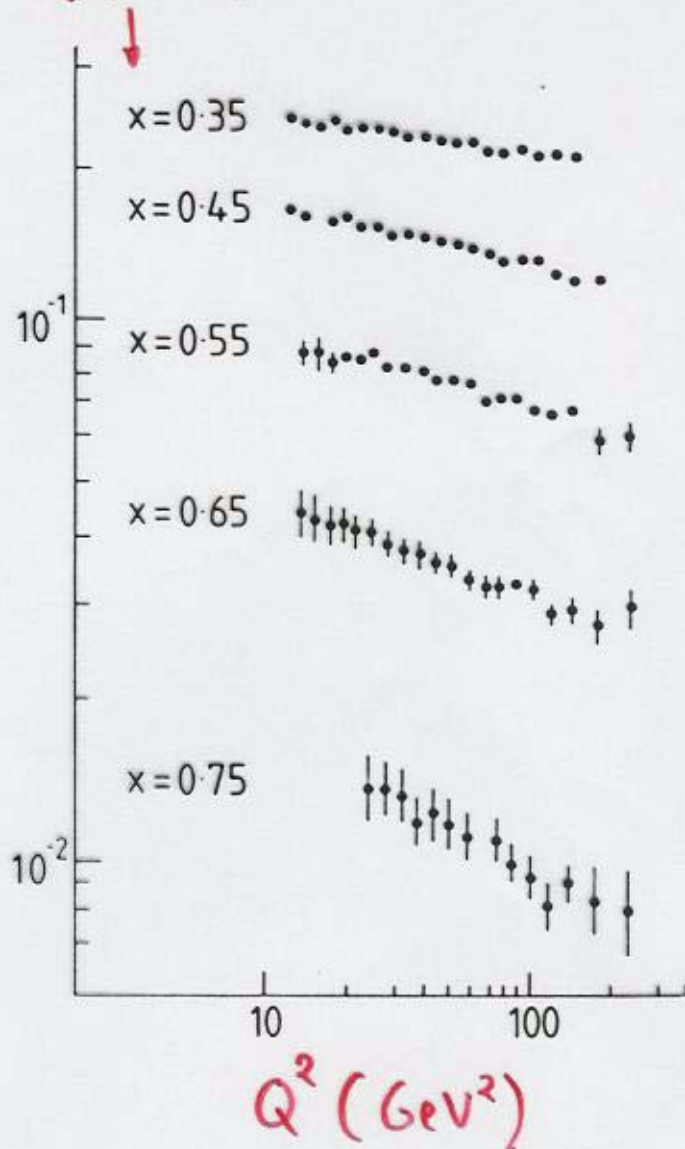
SLUTSATS: F_2 beror ej av Q^2 när $x = \text{konstant}$
 \Rightarrow Protonen innehåller partoner = kvarkar !

Strukturfunktionen $F_2(x, Q^2)$

$F_2(x, Q^2)$



$F_2(x, Q^2)$

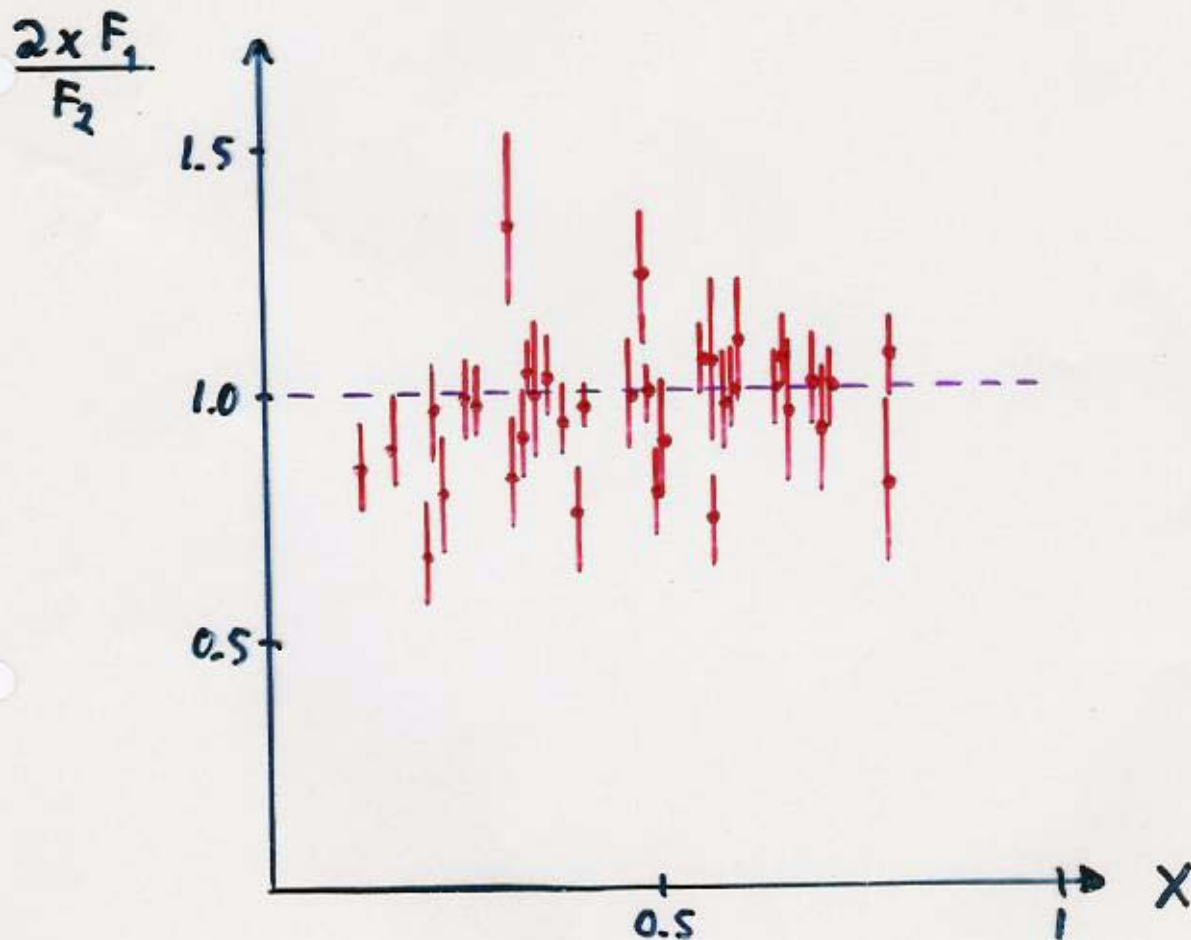


Partonernas spinn

Om protonen är uppbyggd av partoner så beror $F_1(x, Q^2)$ på partonens spinn:

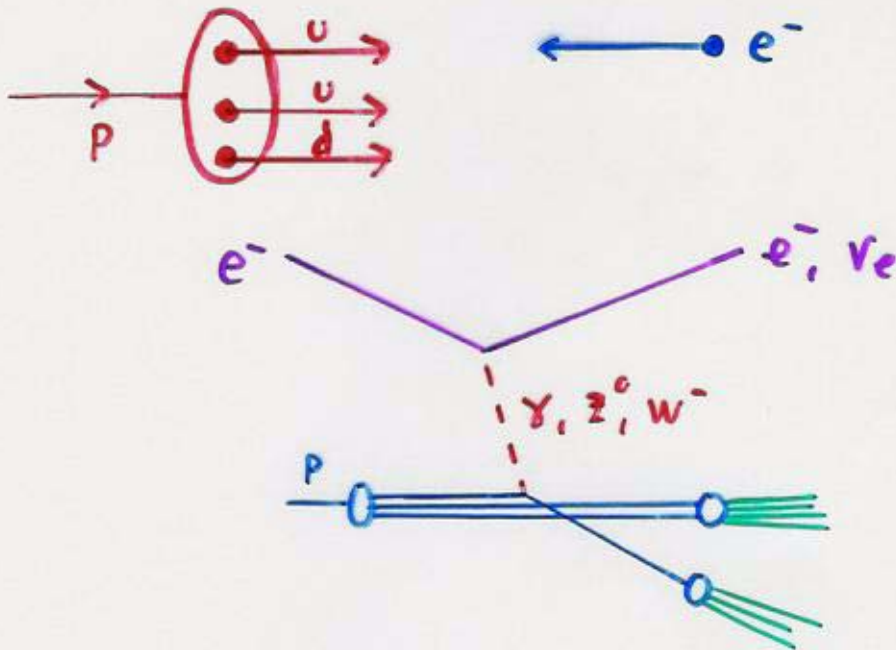
$$\text{Partonens spinn} = 0 \Rightarrow F_1(x, Q^2) = 0$$

$$\text{Partonens spinn} = \frac{1}{2} \Rightarrow F_1(x, Q^2) = \frac{1}{2x} F_2(x, Q^2)$$

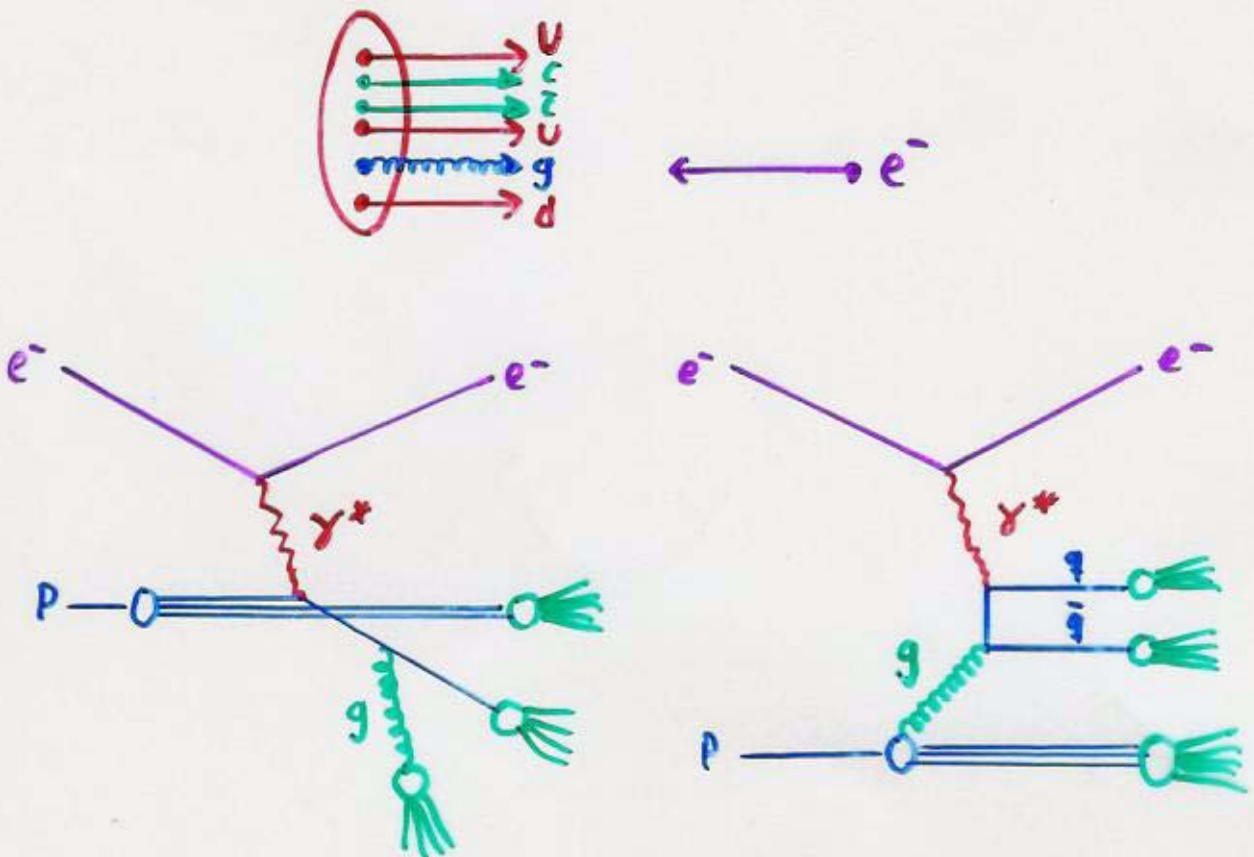


Slutsats: Partonerna har spinn = $\frac{1}{2}$ och
 $F_1 = \frac{1}{2x} F_2$ (Callan - Gross förhållandet)

Partonmodellen (ren kvarkmodell)



QCD modellen (valenskvarker, sjökvarker, gluoner)



Parton fördelningar

Strukturfunktionen $F_2(x, Q^2)$ kan skrivas som en summa av parton fördelningar $q(x)$. Dessa fördelningar beskriver hur stor andel (x) av protonens rörelsemängd som partonen bär på:

$$F_2(x) = x \sum_f e_f^2 q_f(x) + x \sum_{\bar{f}} e_{\bar{f}}^2 \bar{q}_{\bar{f}}(x)$$

\swarrow \nwarrow \swarrow \nwarrow
 u, d, s, c, t, b u, d, s, c, t, b
 kvark- \swarrow \nwarrow \swarrow \nwarrow
 lösningen \swarrow \nwarrow \swarrow \nwarrow
 Parton \swarrow \nwarrow
 fördelningen

$$F_2(x) = x \left[\left(\frac{2}{3}\right)^2 [u(x) + c(x) + t(x)] + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 [d(x) + s(x) + b(x)] \right] +$$

$$+ x \left[\left(-\frac{2}{3}\right)^2 [\bar{u}(x) + \bar{c}(x) + \bar{t}(x)] + \left(\frac{1}{3}\right)^2 [\bar{d}(x) + \bar{s}(x) + \bar{b}(x)] \right]$$

Experiment ger följande:

