

Kern- und Teilchenphysik

Johannes Blümer

SS2012

Vorlesung-Website

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA



■ Von Nukleonen zu den Quarks

■ Elastische, inelastische Streuung

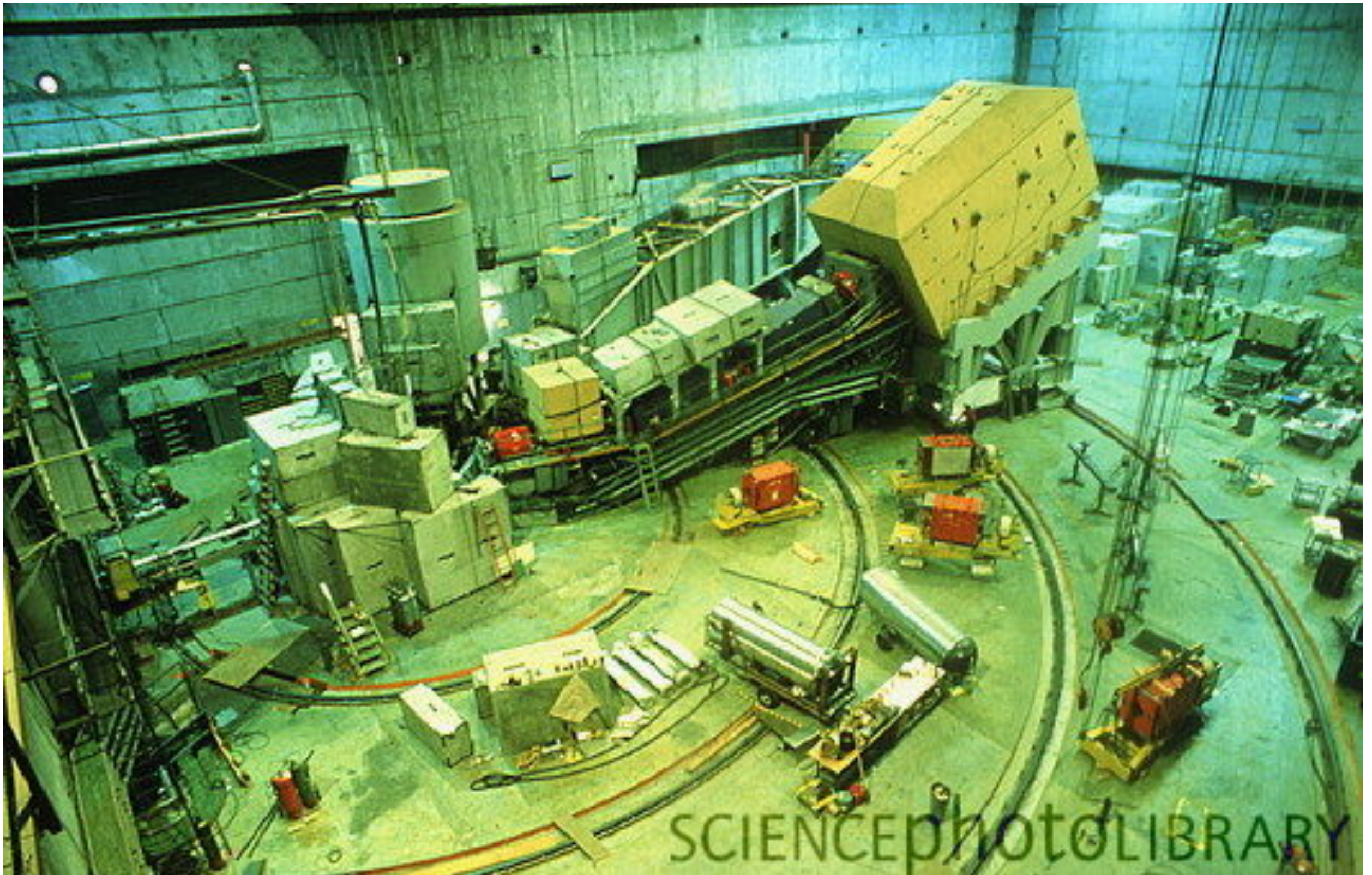
- Formfaktoren des Nukleons
- Quasielastische Streuung
- Tiefinelastische Streuung
 - Nukleonanregungen
 - Strukturfunktionen
 - Partonen, Breit-System
- EMC-Effekt

✓ v13

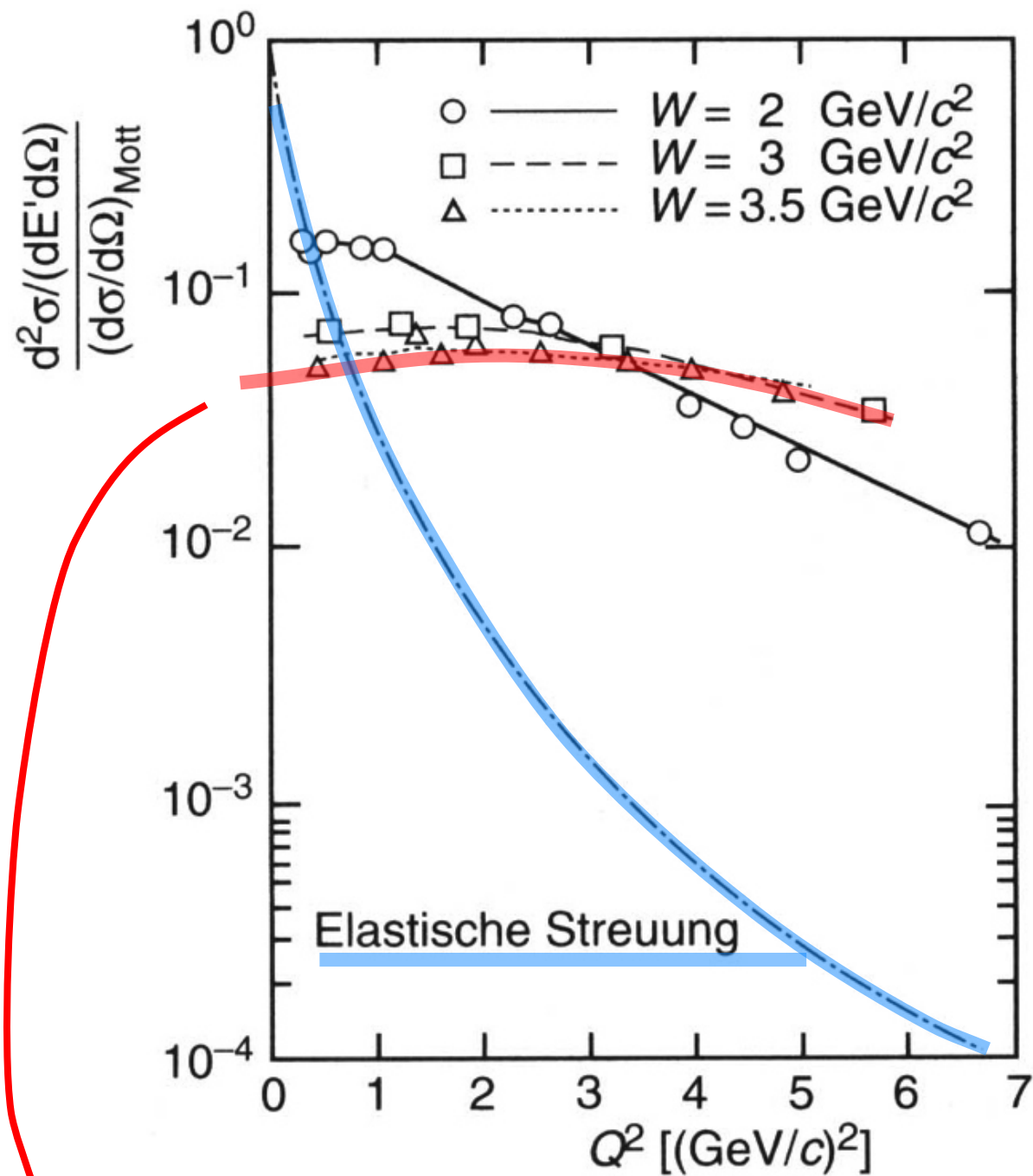
■ Quarkstruktur der Hadronen

- Quarkmodell, additive QZ, Ladungsbetrachtungen
- Vergleich von eN mit ν N-Streuung
- Charakteristika von F_2 , neue Messungen an HERA, Skalenbrechung
- Aufbau von Hadronen aus Quarks
- R-Wert aus e^+e^- -Streuung, "Color"
- farbige Quarks und qg-Wechselwirkung

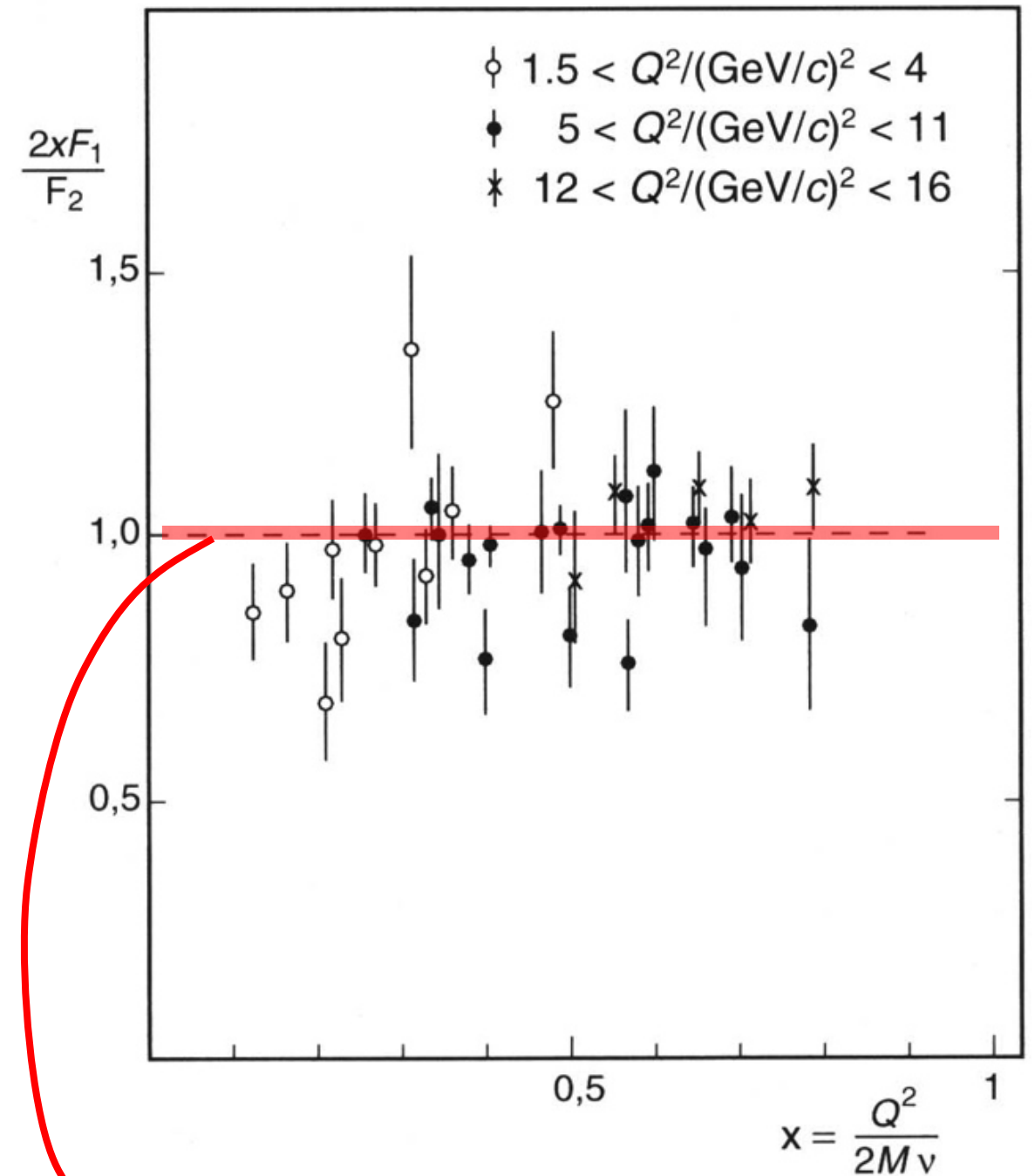
SLAC-Spektrometer



Hinweise auf punktförmige Spin-1/2 Streuzentren im Nukleon

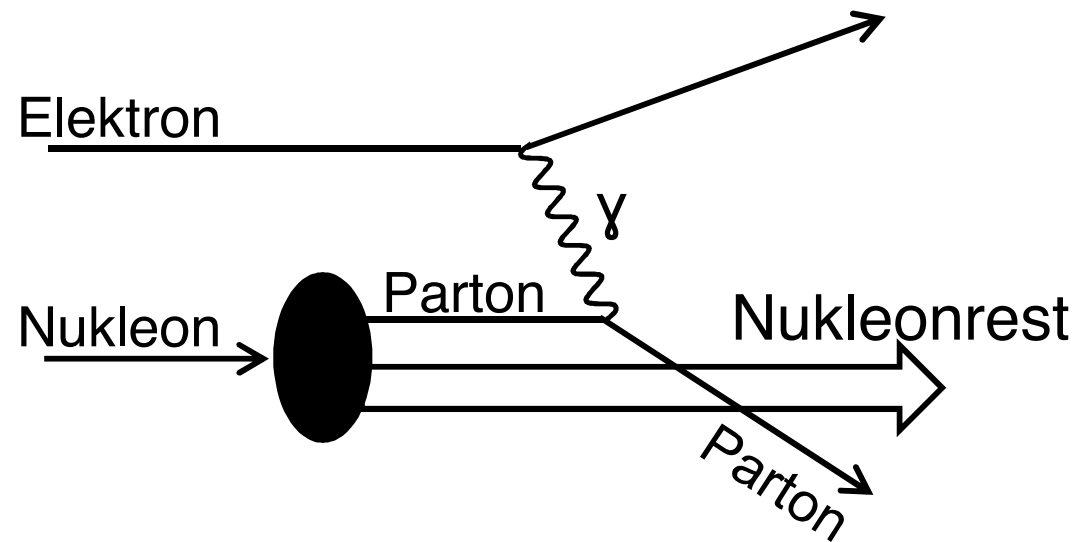


Formfaktor/Strukturfunktion hängt nicht von Q^2 ab: Punktstreuung!

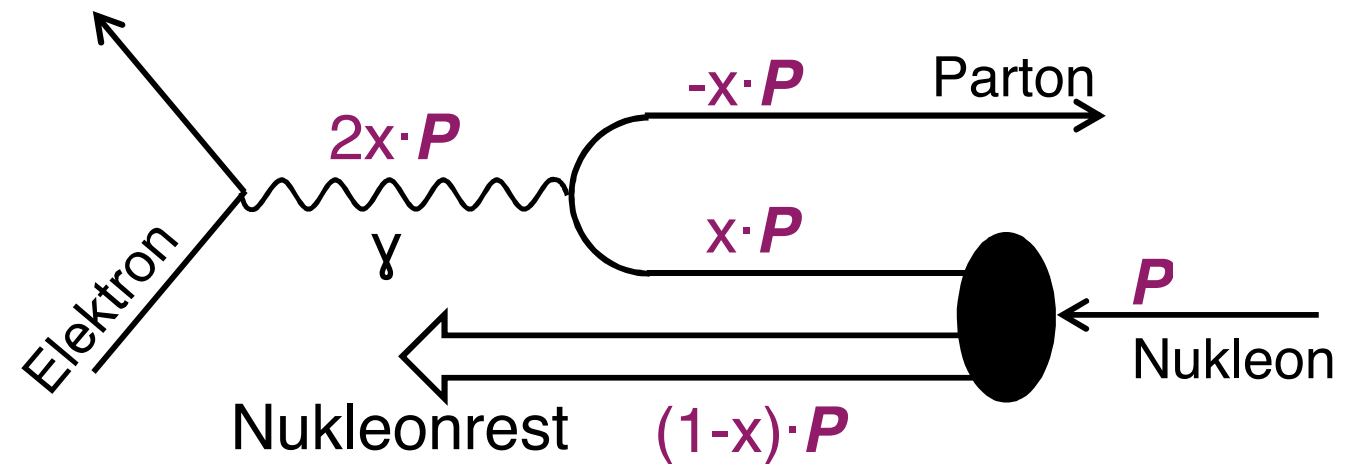


Callan-Gross-Relation: $2x F_1 = F_2$ ist erfüllt, d.h. die punktförmigen Streuzentren haben Spin 1/2

Breit-System, Partonen, SF im Quarkbild



Labor – System



Breit – System:

virtuelles γ , überträgt nur Impuls, keine Energie

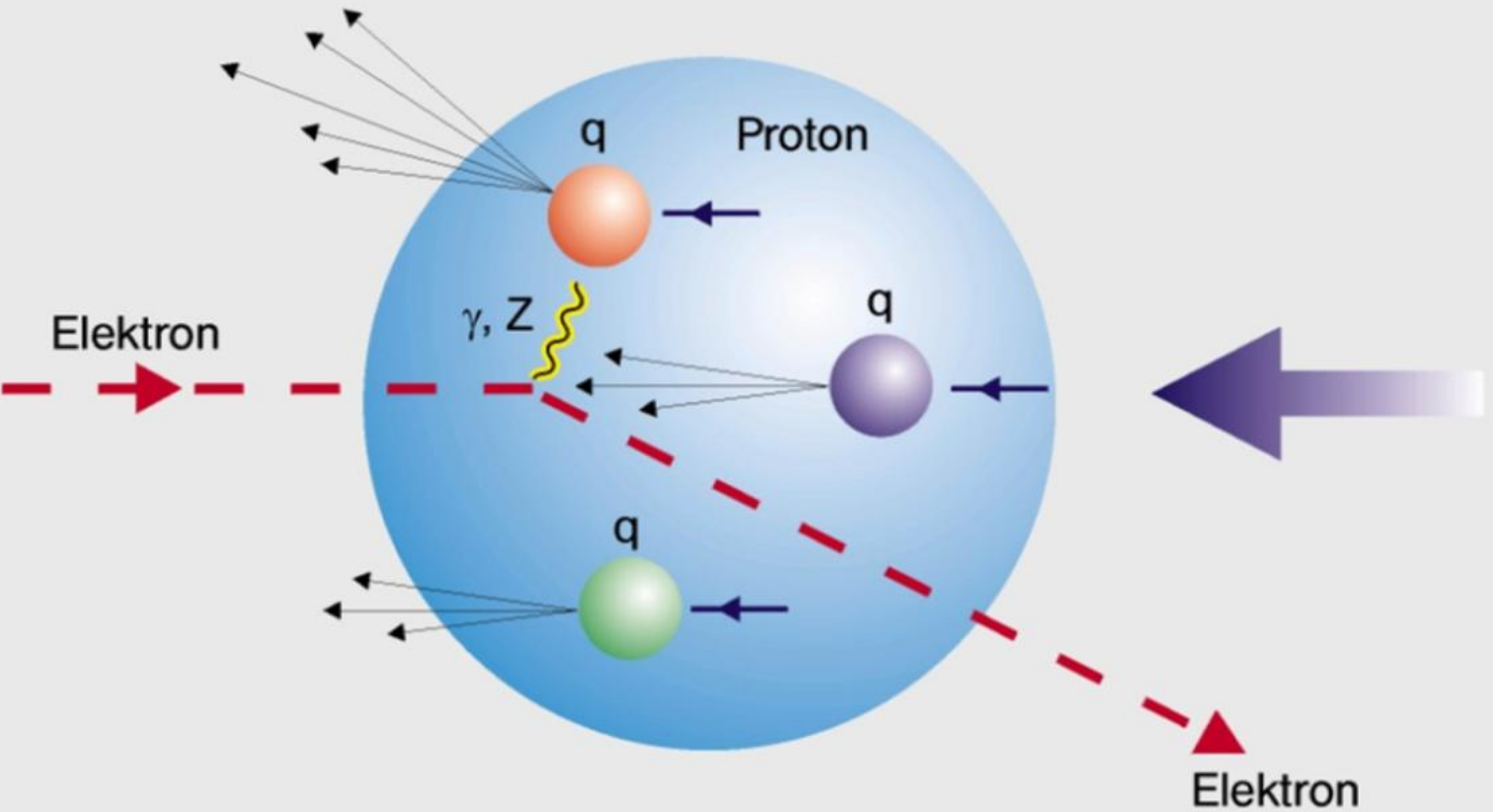
$$\tilde{q} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vec{q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2x\vec{P} \end{pmatrix}$$

anschaulich: $x = \frac{Q^2}{2M\nu} \Rightarrow x = \text{Bruchteil des Viererimpulses des Nukleons, der vom Proton getragen wird}$

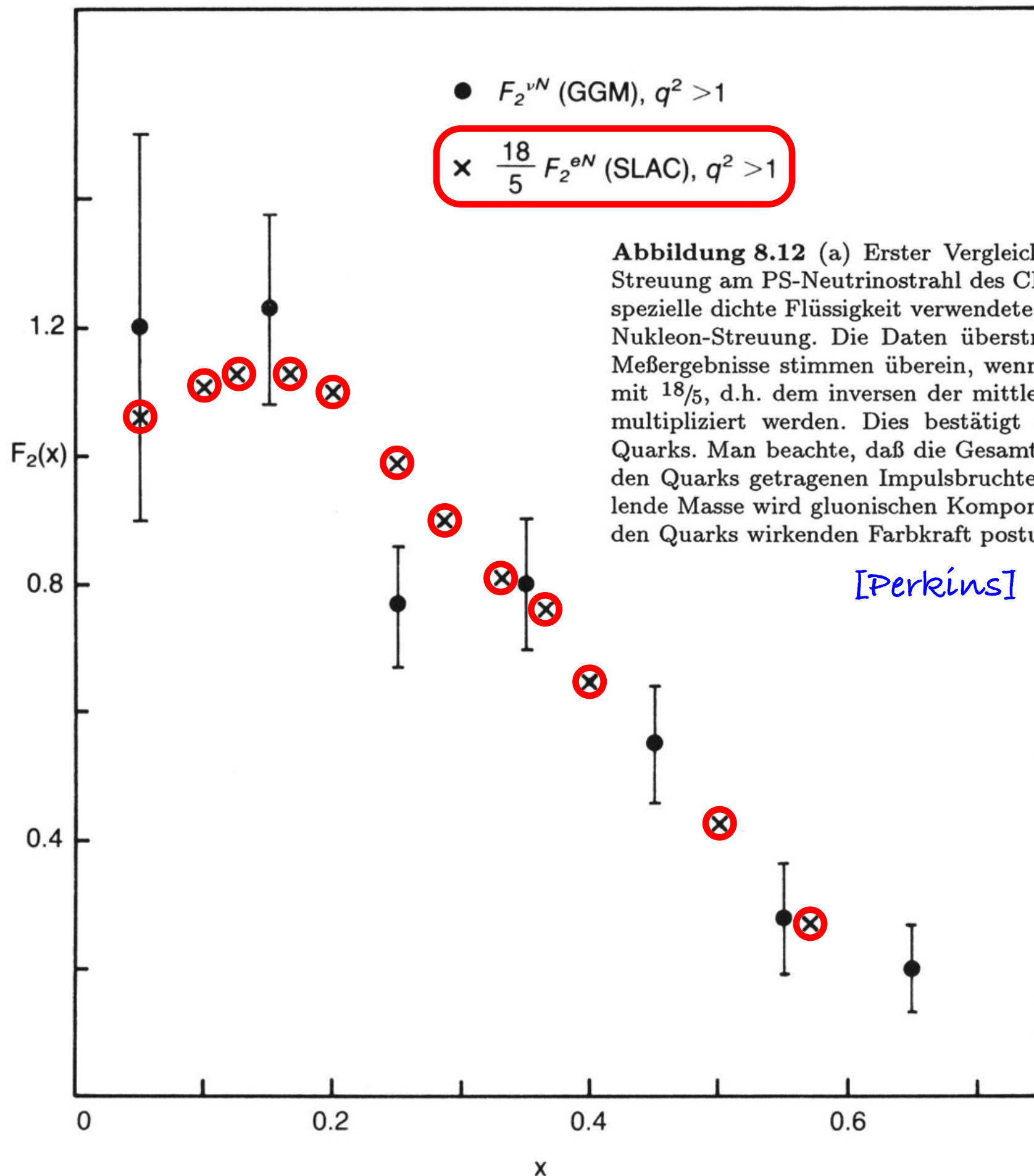
*Quarktypen f , Impulsanteile x , Verteilungsfunktion $q_f(x)$
Seequarks aus virtuellen Quark-Antiquark-Paaren*

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

Von Partonen zu Quarks



F2-Vergleich in e, v-Streuung



GGM: Gargamelle,
berühmte Blasenkammer
am CERN

Gargamelle-Blasenkammer am CERN



F2-Vergleich in e, v-Streuung

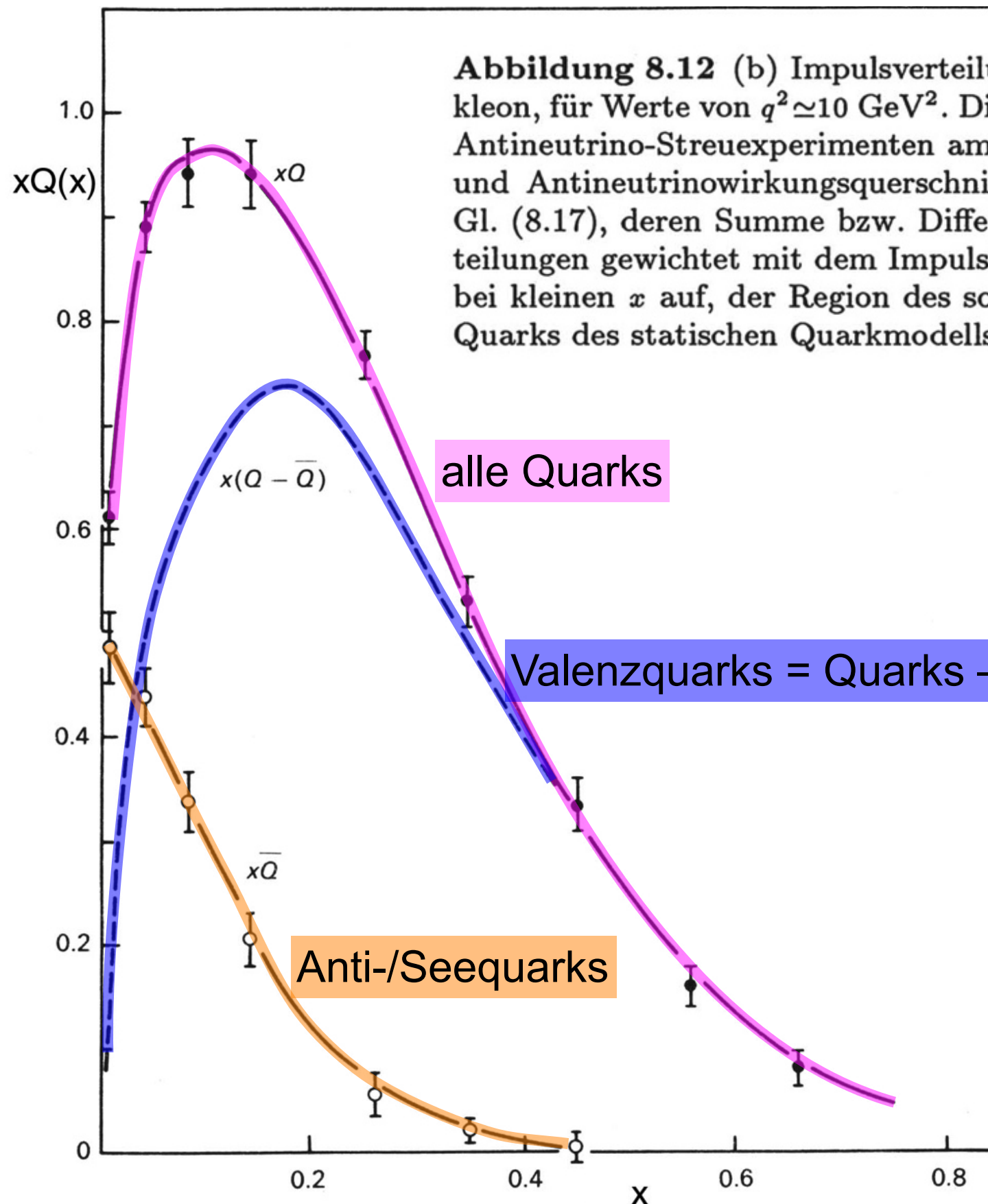


Abbildung 8.12 (b) Impulsverteilungen von Quarks (Q) und Antiquarks ($\bar{Q}$) im Nukleon, für Werte von $q^2 \simeq 10 \text{ GeV}^2$. Die Daten stammen aus Resultaten von Neutrino- und Antineutrino-Streuexperimenten am CERN und Fermilab. Die differentiellen Neutrino- und Antineutrinowirkungsquerschnitte messen die Strukturfunktionen F_2 und F_3 aus Gl. (8.17), deren Summe bzw. Differenz nach Gl. (8.23) die Quark- und Antiquarkverteilungen gewichtet mit dem Impulsbruchteil x ergibt. Antiquarks ($\bar{Q}$) treten bevorzugt bei kleinen x auf, der Region des sogenannten Quark-Antiquark-„See“. Die „Valenz“-Quarks des statischen Quarkmodells ($Q - \bar{Q}$) findet man konzentriert um $x=0.2$.

alle Quarks

Valenzquarks = Quarks – Antiquarks

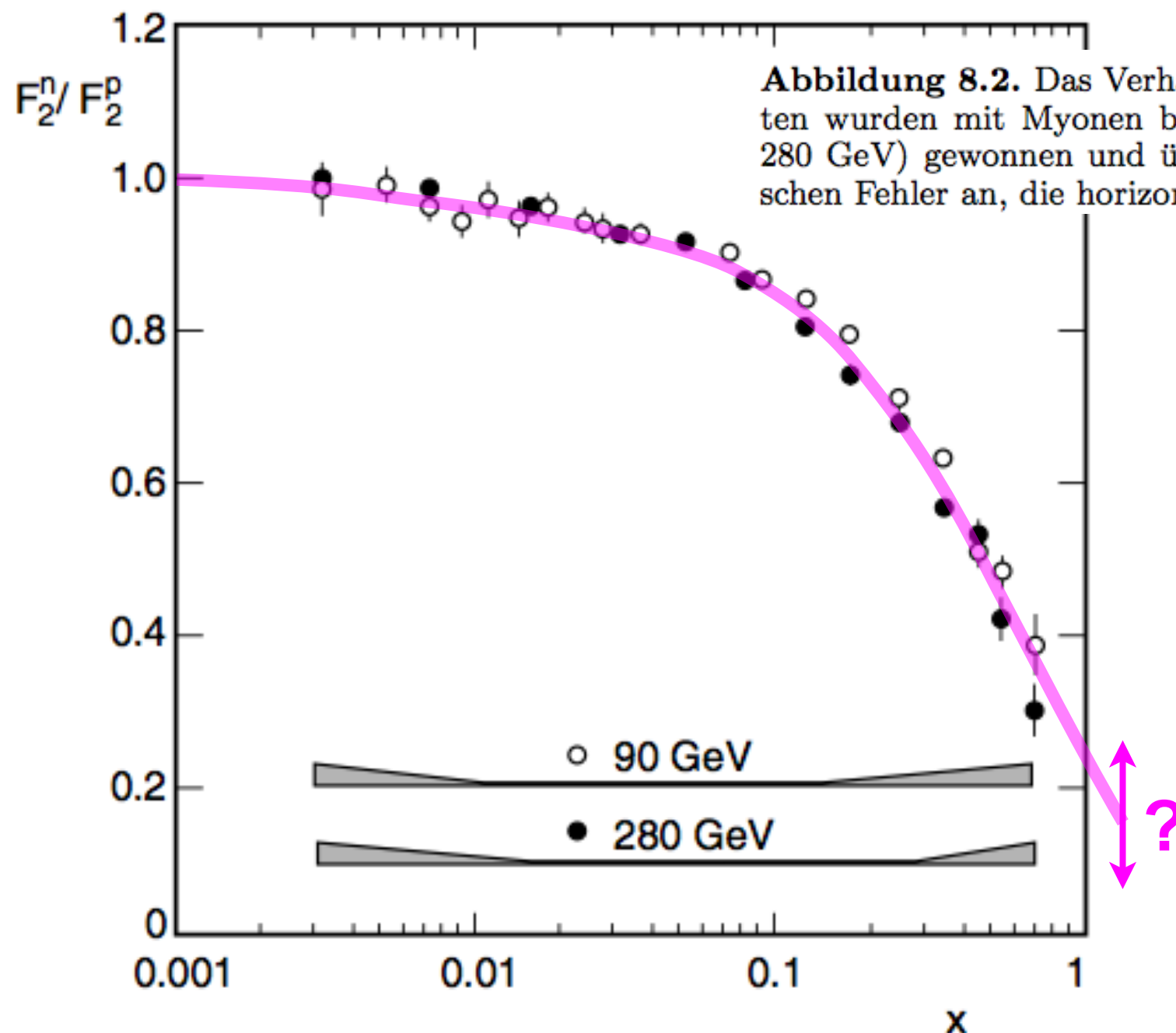
Anti-/Seequarks

Grenzfälle...

Bilde F_2^n / F_2^p und untersuche Grenzfälle:

$x \rightarrow 0$: $F_2^n / F_2^p = 1 \Rightarrow$ Seequarks dominieren
sind gleich in p und n

$x \rightarrow 1$: $F_2^n / F_2^p = \frac{1}{4} = \frac{z_d^2}{z_u^2}$, nicht $= \frac{2}{3} = \frac{2z_d^2 + z_u^2}{z_d^2 + 2z_u^2}$



noch unverstanden: “EMC-Effekt”

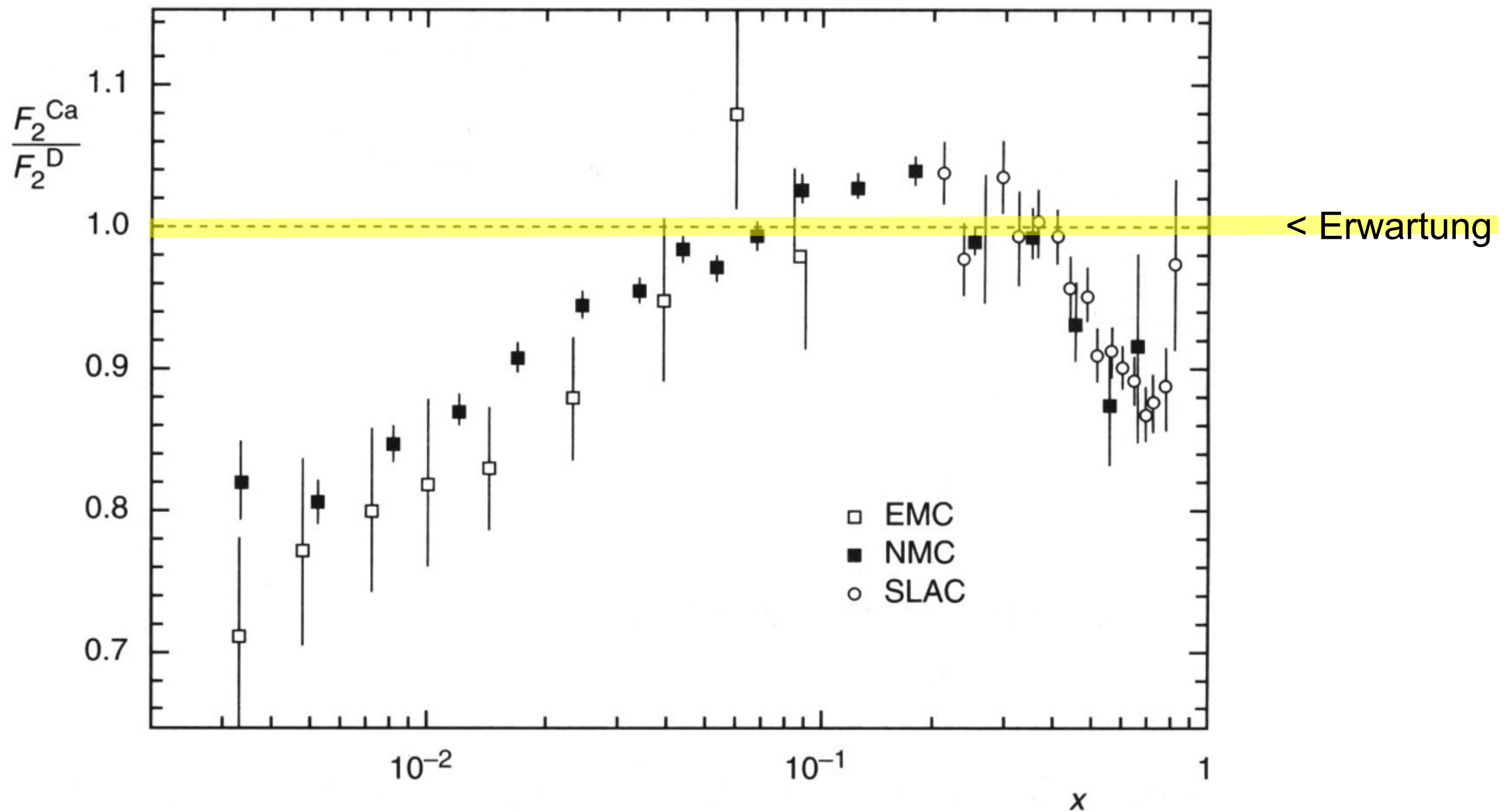


Abb. 7.8. Der Quotient der Strukturfunktionen F_2 von Kalzium und Deuterium als Funktion von x [Ar88, Go94b, Am95]

Quarks und Strukturfunktionen

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

$$F_2^{eN}(x) = \frac{5}{18}(u + \bar{u} + d + \bar{d}) + \frac{1}{9}(s + \bar{s})$$

$$F_2^{\nu, \bar{\nu}N} \approx \frac{18}{5} F_2^{eN}(x)$$

$q_v(x)$ hat Maximum bei $x \approx 0.17$

mittlerer Impulsanteil eines Valenzquarks: $\langle x_v \rangle \approx 0.12$

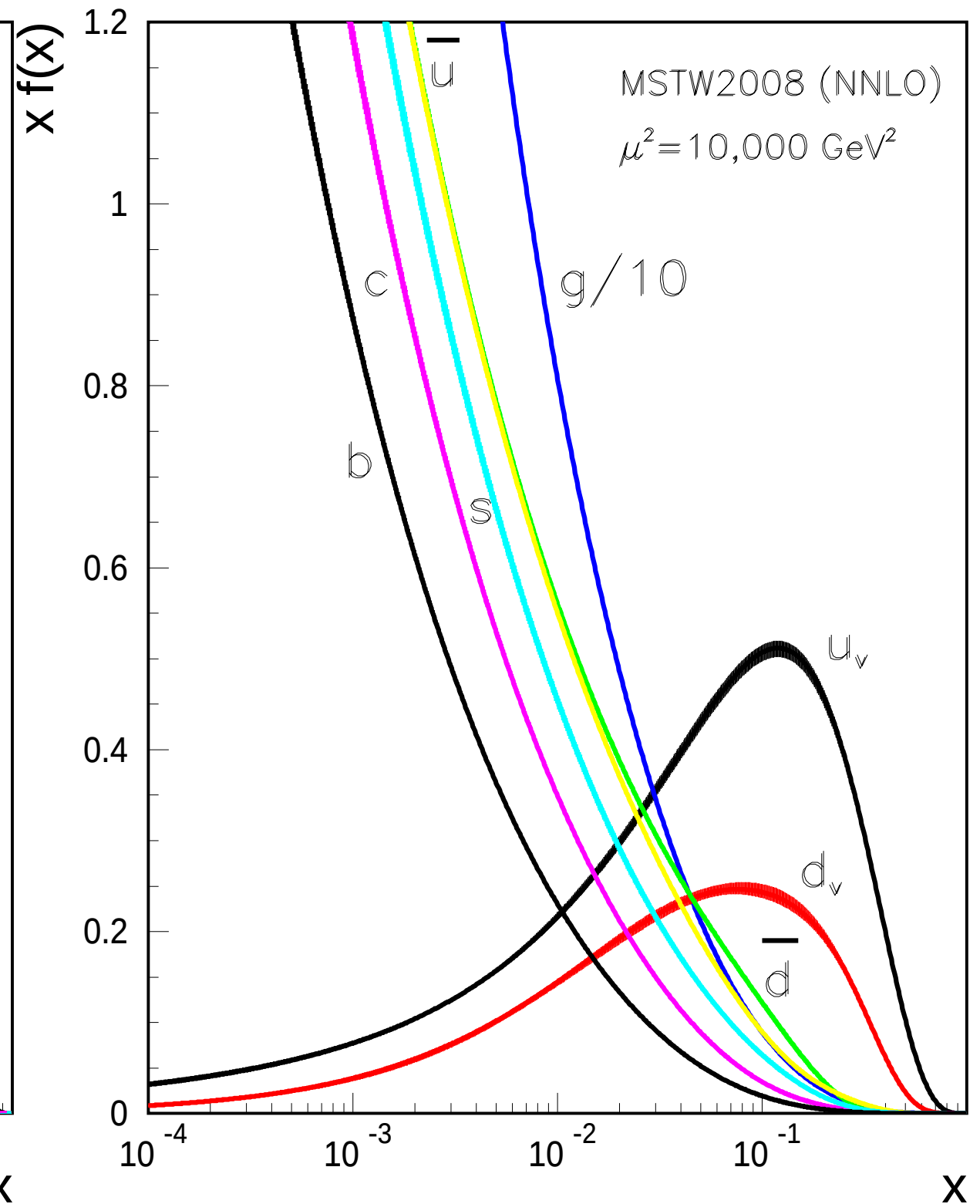
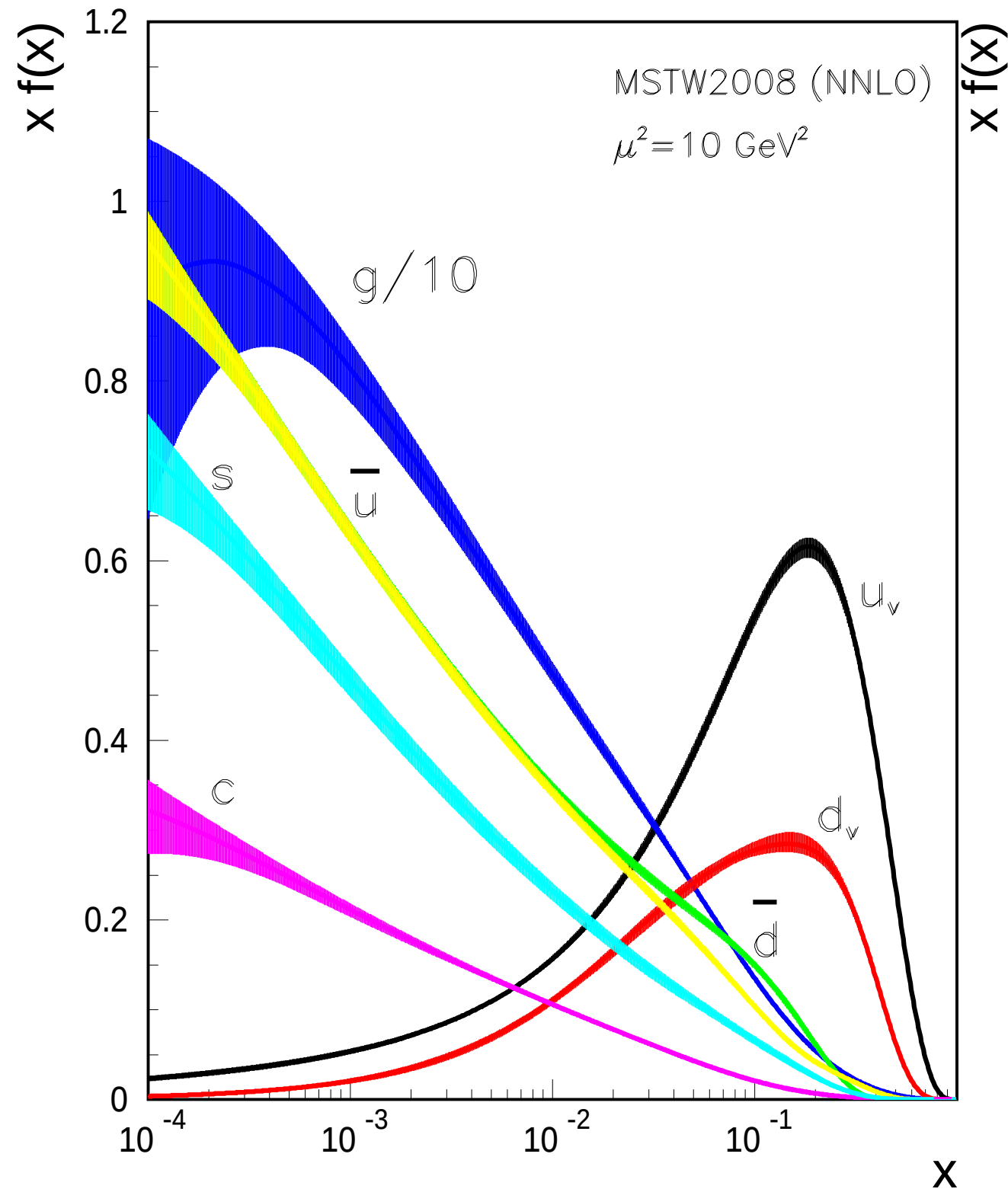
mittlerer Impulsanteil eines Seequarks: $\langle x_s \rangle \approx 0.04$

$$\int_0^1 F_2^{\nu N}(x) dx \approx \frac{18}{5} \int_0^1 F_2^{eN}(x) dx \approx 0.5$$

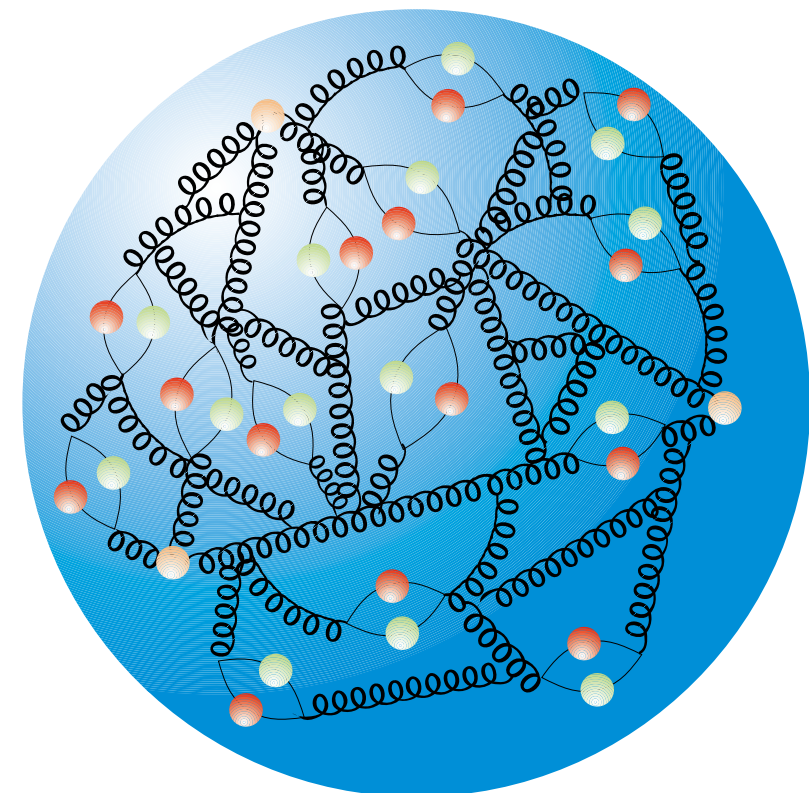
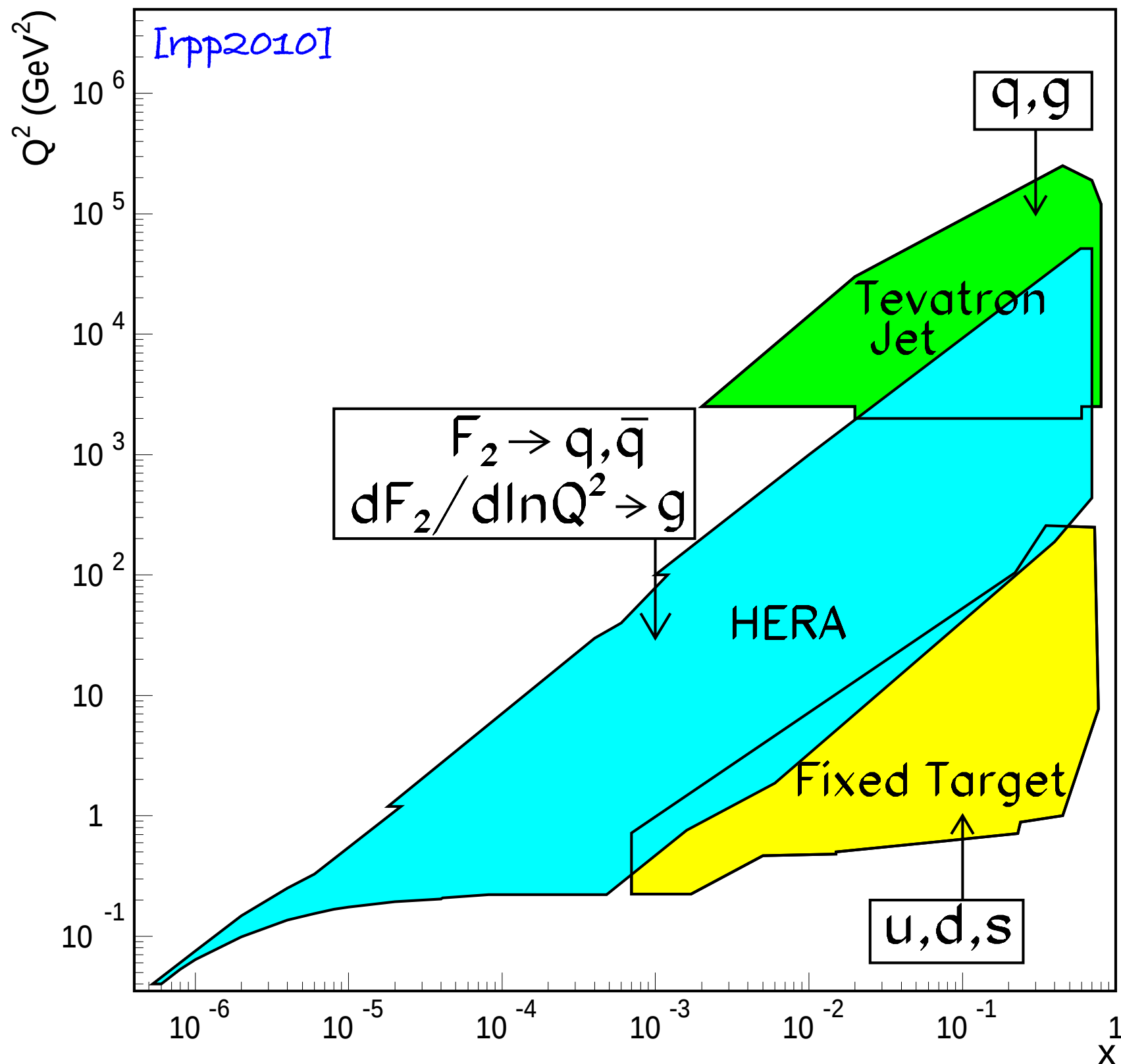
untersuche Grenzfälle: $x \rightarrow 0$, $x \rightarrow 1$

Strukturfunktionen front-line

Irpp20101



Strukturfunktionen front-line



Bem. zu HERA

HERA

Physics Accomplishments of HERA

C. Diaconu, T. Haas, M. Medinnis, K. Rith, and A. Wagner

Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2010. 60:101–28

POINTING THE WAY.

How HERA
is helping to shape the future of physics



[http://www.desy.de/sites2009/site_www-desy/content/e421/e55042/e3003/e68431/e10845/e69406/HERA Pointing the way eng.pdf](http://www.desy.de/sites2009/site_www-desy/content/e421/e55042/e3003/e68431/e10845/e69406/HERA%20Pointing%20the%20way_eng.pdf)

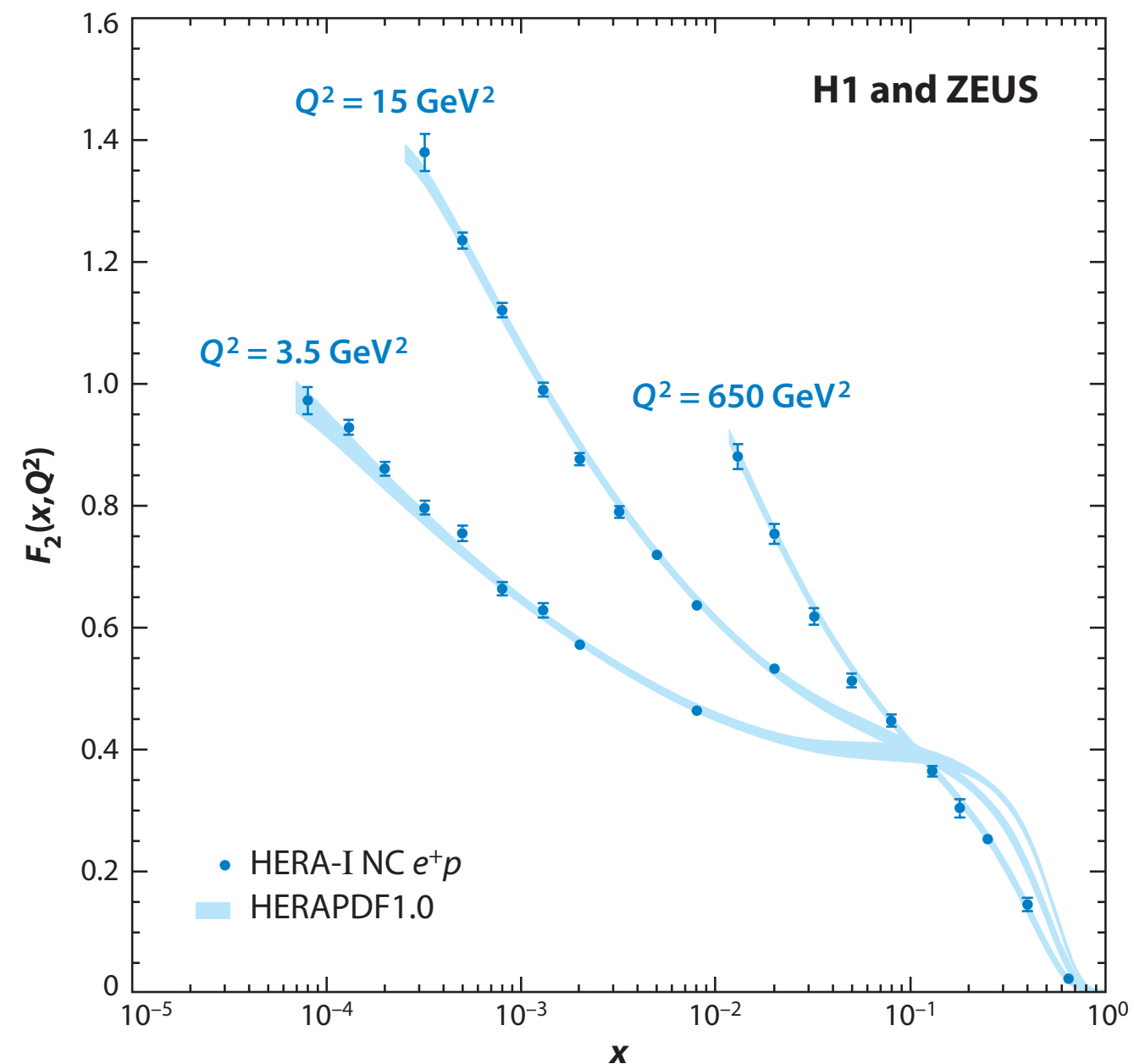
HERA: **H**adron-**E**lektron- **R**ing-**A**nlage

Betrieb 1991 - 2007

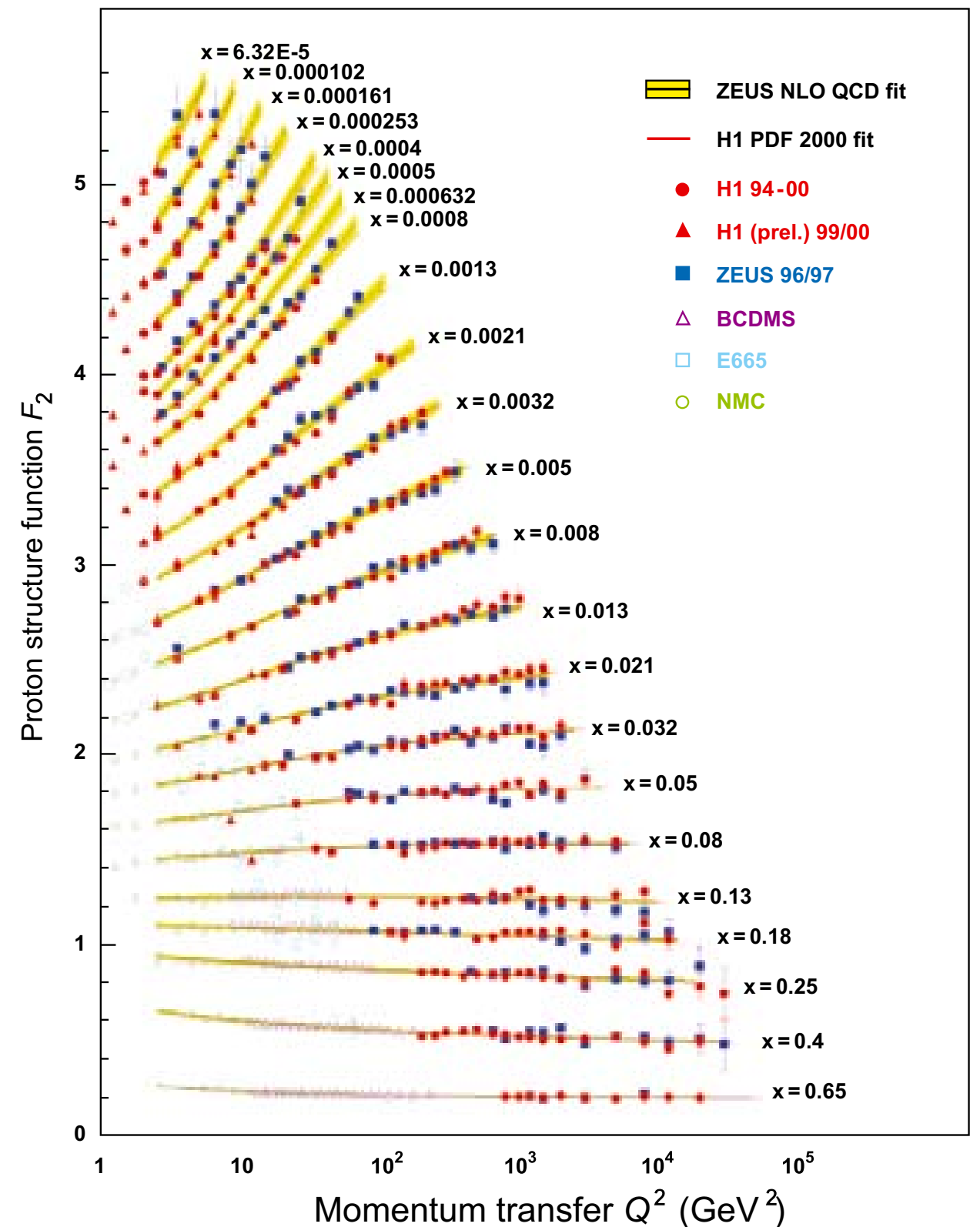
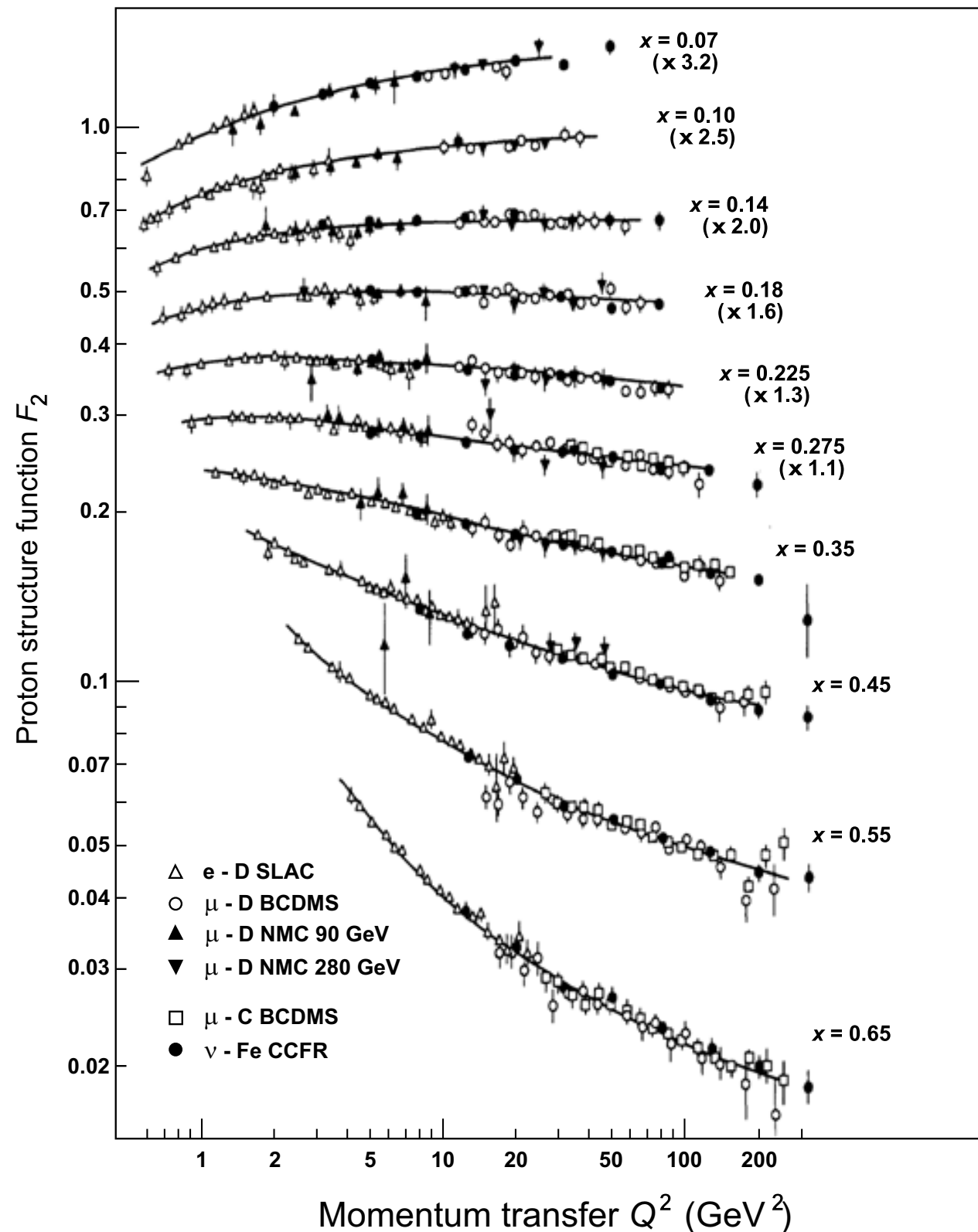
Länge 6,3 km, Endenergie der $e^\pm$ 30 GeV, der Protonen 820 GeV.

4 Wechselwirkungszonen: Experimente H1, ZEUS, HERA-B und HERMES.

*Vorab: deutet der drastische Anstieg von F_2 bei hohen Q^2 auf eine Substruktur der Quarks o. ä.?
Nein, die höhere Auflösung "bringt immer mehr gg-Paare zum Vorschein"*

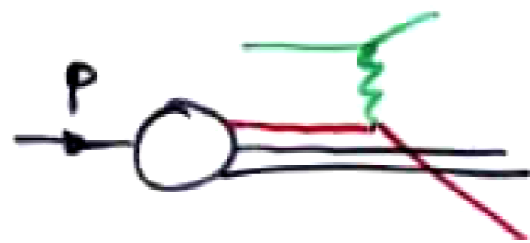
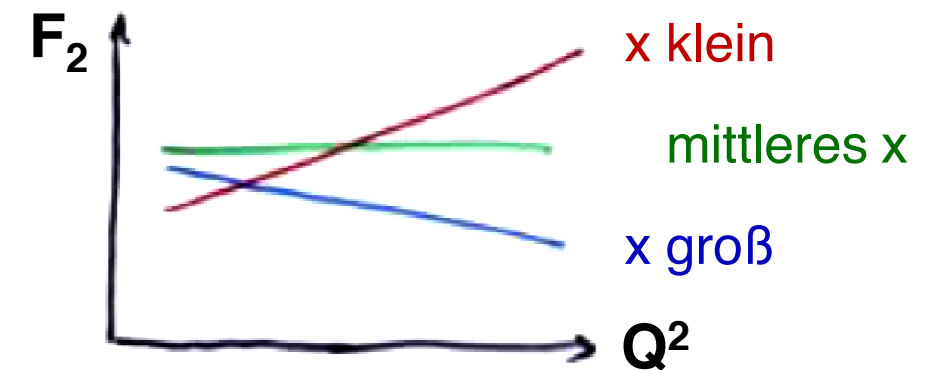


F₂ Vergleich von HERA mit früheren Messungen

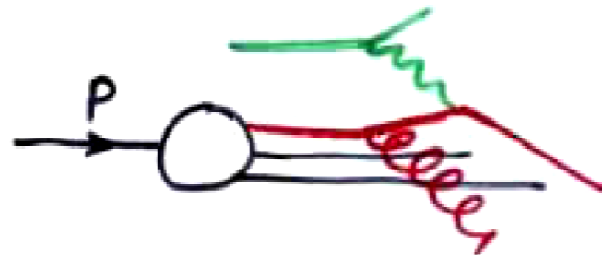


Skalenbrechung

Auflösung von **virtuellen Substrukturen** im Quarkverbund: ein Quark "besteht" aus Quarks und Gluonen, ein Gluon "besteht" aus Quarks und Antiquarks.



"normal"



Quark mit Impuls $y \cdot P$ strahlt Gluon ab und trägt danach Impuls $x \cdot P$ (kleiner!)



Gluon "zerfällt" in $q\bar{q}$, von denen eines vom Photon getroffen wird.

Je höher Q^2 , desto häufiger können Aufspaltungsprozesse stattfinden.

⇒ Entwicklung in der QCD vorhersagbar.

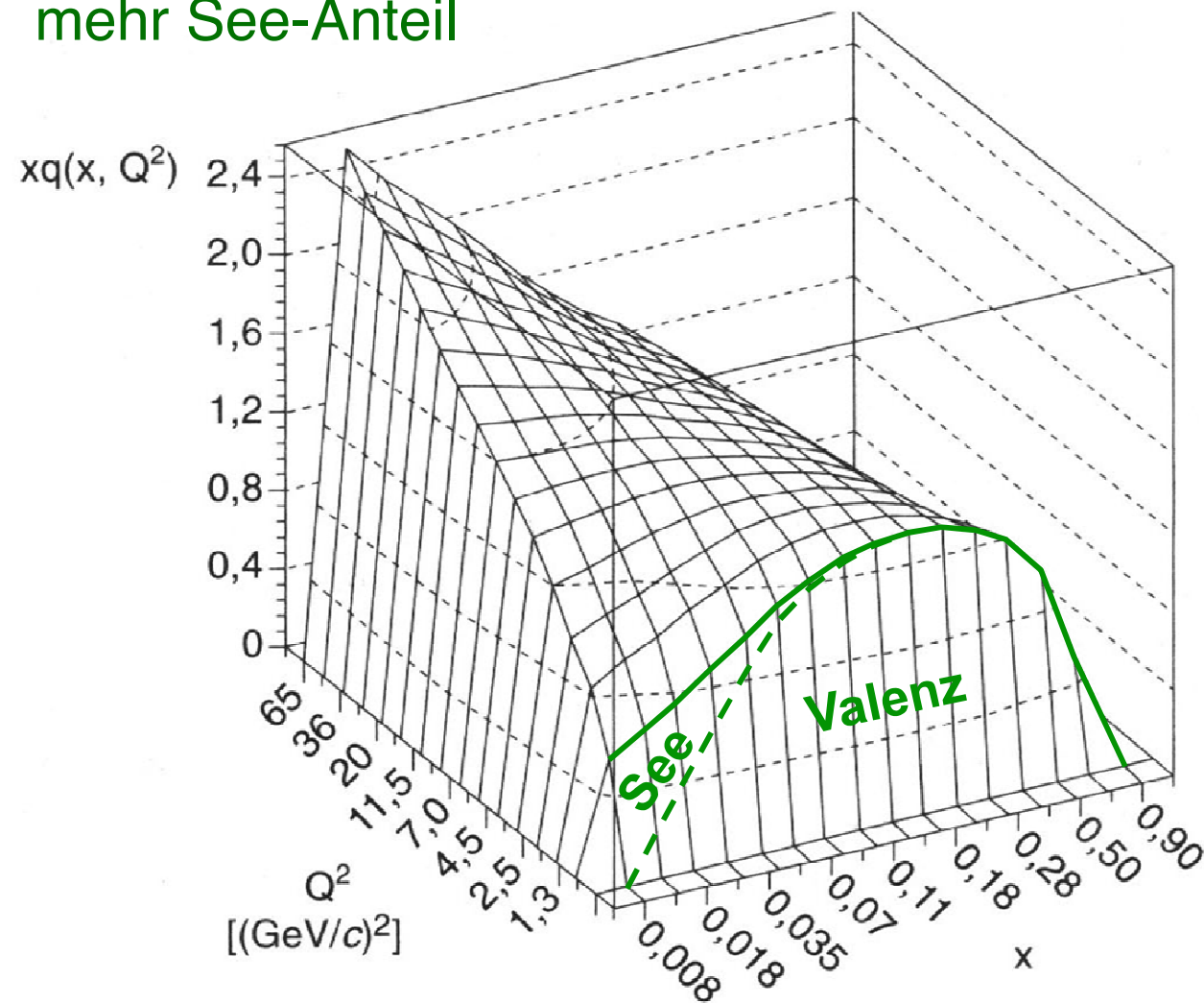
Altarelli – Parisi – Gleichungen (gekoppelte Differential-/Integralgleichungen)

Q^2 -Entwicklung von xq und xg

Quark-Verteilung

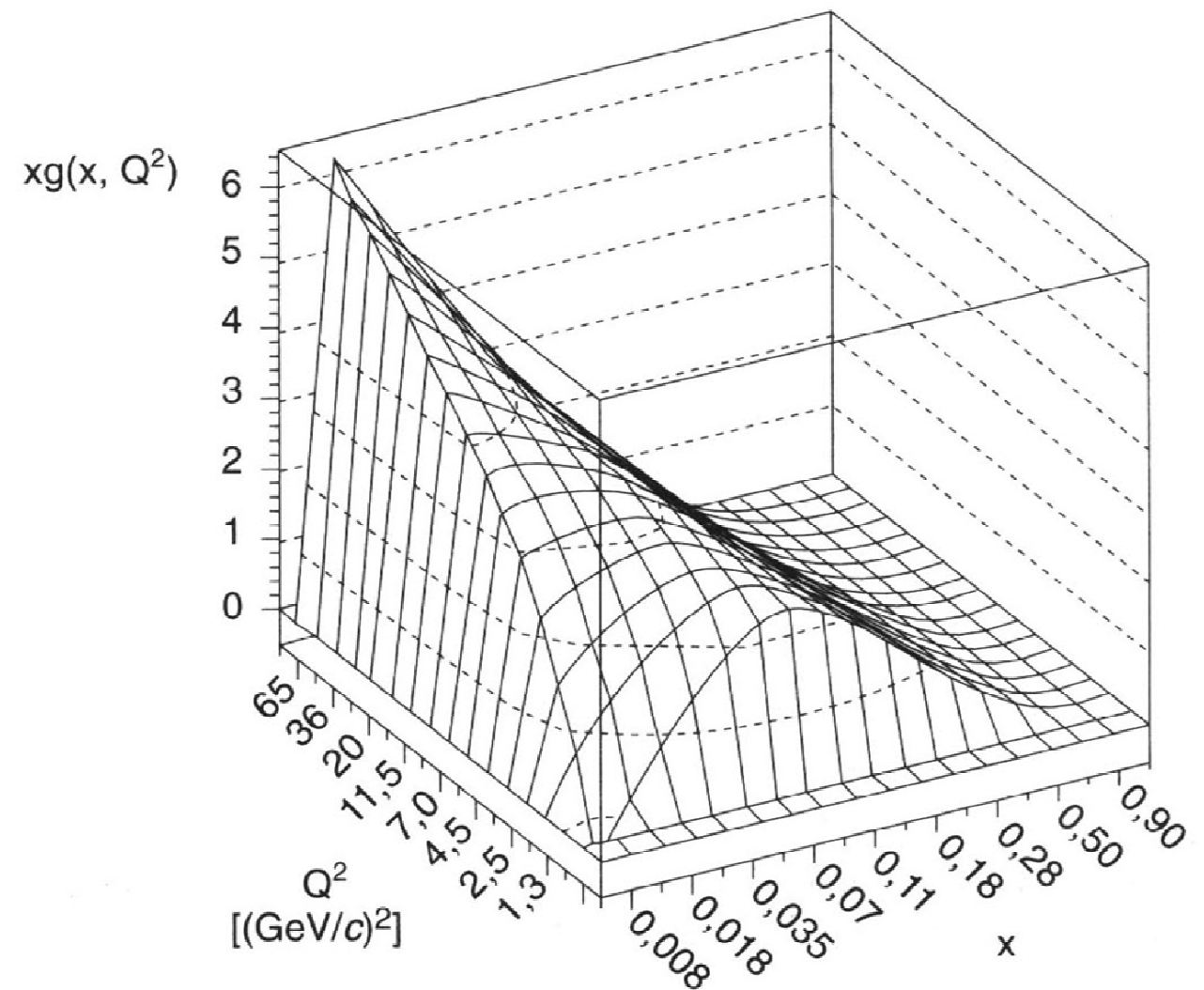
hohes Q^2 :
weniger Valenzanteil
mehr See-Anteil

viele Quarks
bei kleinem x



$$x \cdot q(x) = \sum_f x \cdot (q_f(x) + \bar{q}_f(x)) \approx \frac{18}{5} F_2^d$$

Gluon-Verteilung



$$G(x, Q^2) = x \cdot g(x)$$

Viele Teilchen – einfache Erklärung?

Leptonen

Positron

Myon

Elektron

Kerne

Neutron

Proton; Nukleon

Pion

Kaon ... J/Psi ...

Hadronen

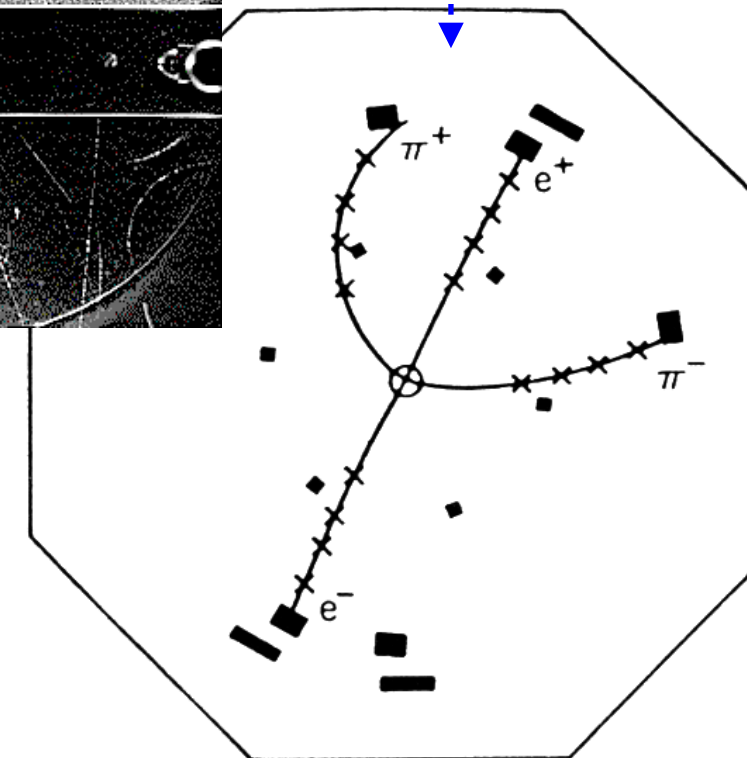
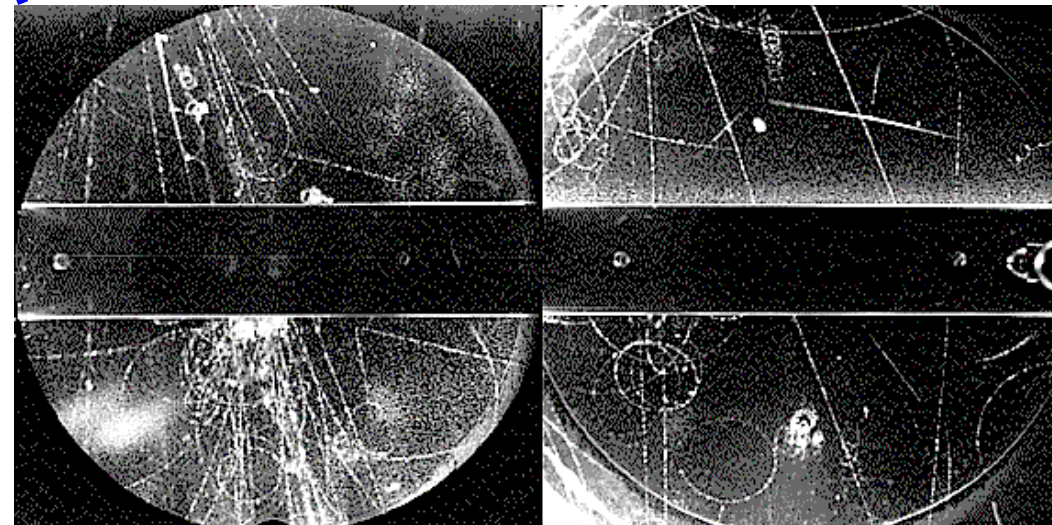
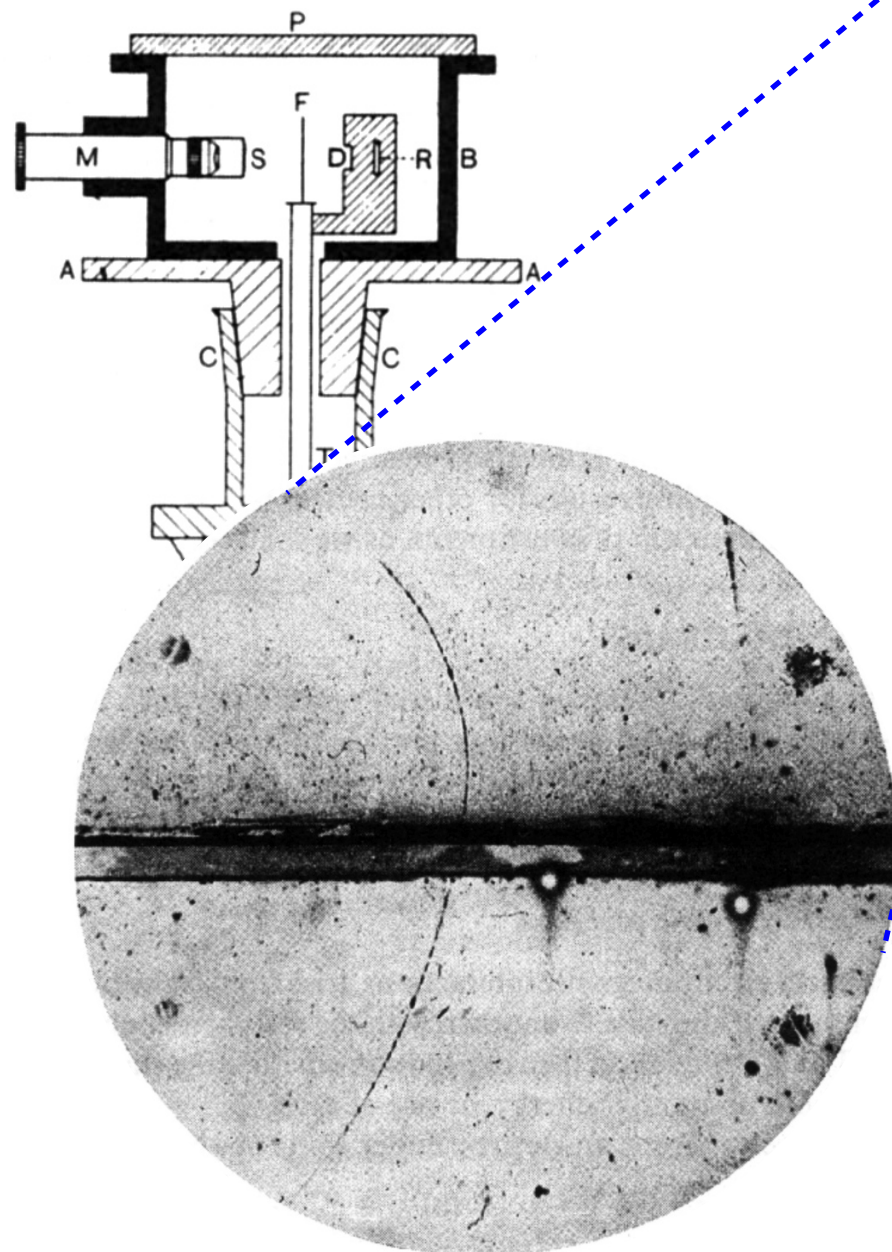
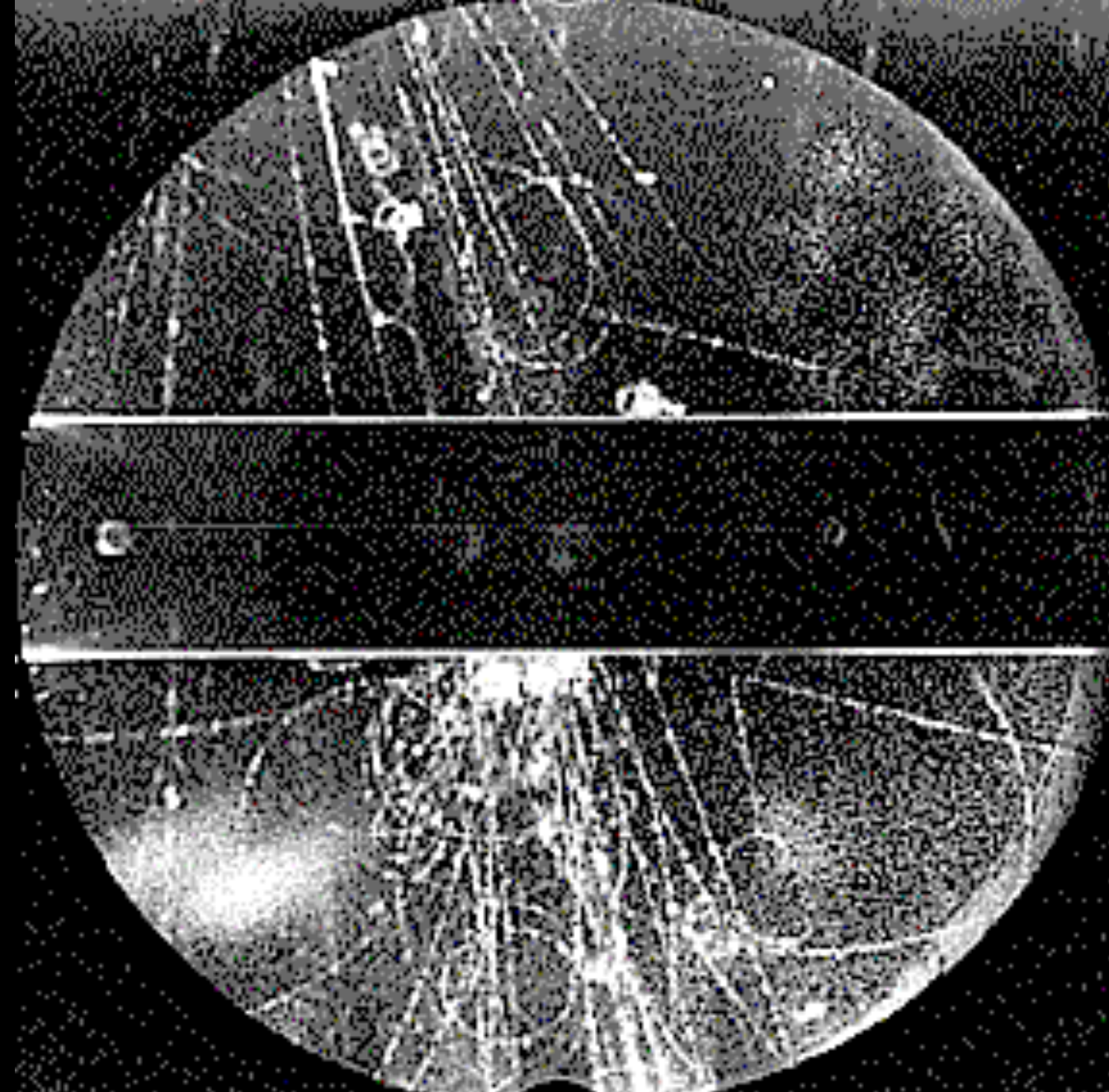
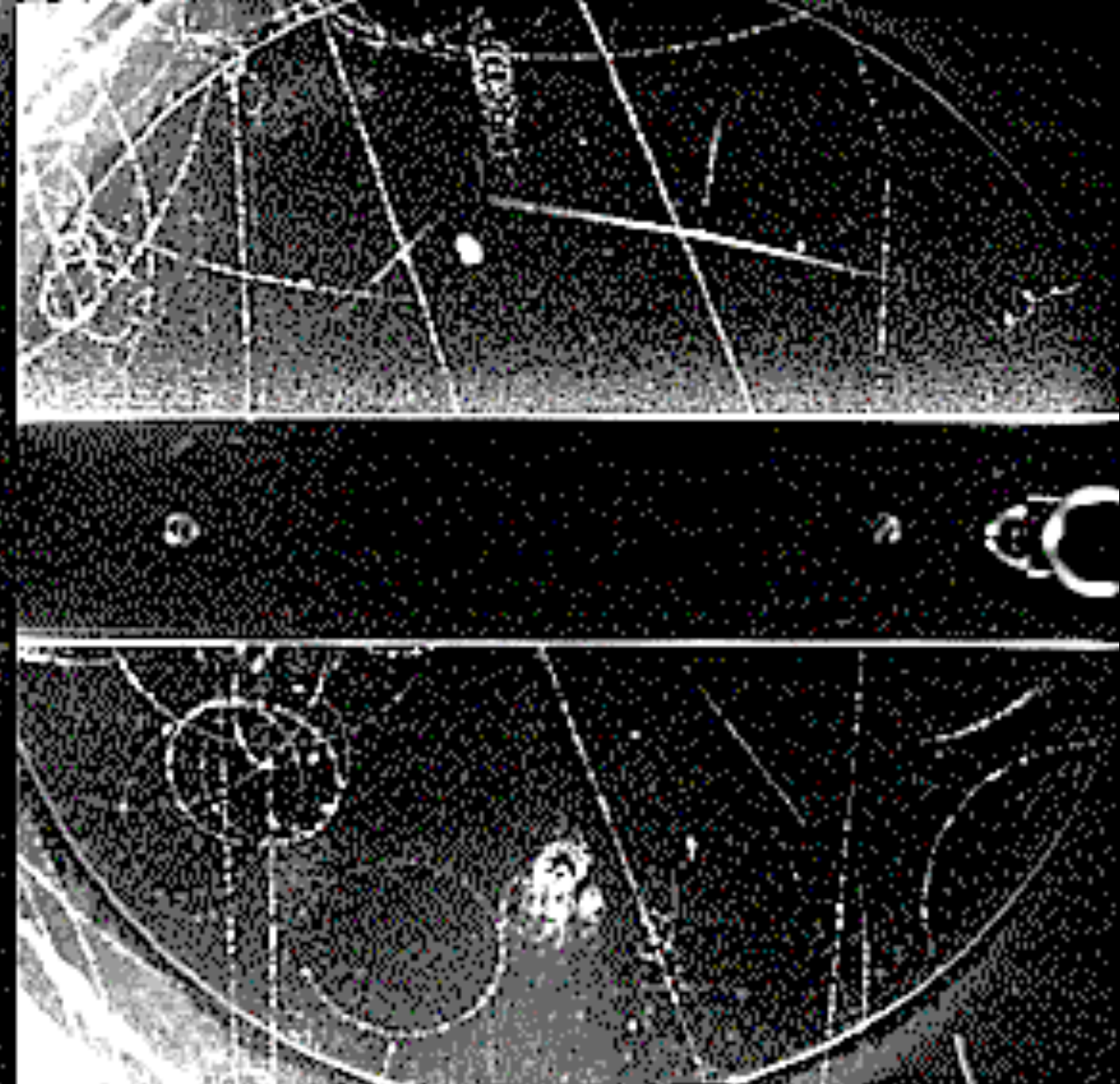


Fig. 4.8. Example of the decay $\psi' \rightarrow \pi^+ \pi^- \psi$, followed by $\psi \rightarrow e^+ e^-$



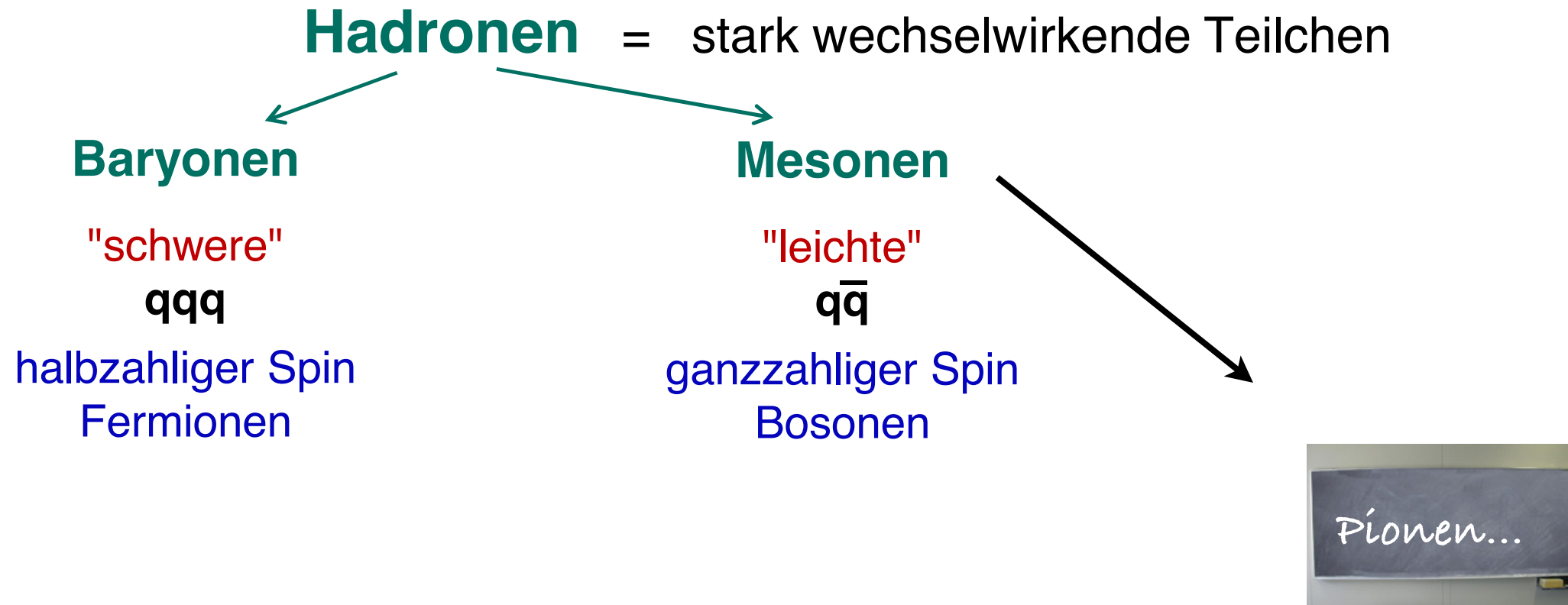
The left-hand image shows the decay of a neutral kaon, captured the previous year, 1946. Being uncharged the neutral kaon leaves no track, but a "V" of tracks appears when it decays into two lighter charged particles, each of which is a pion (just below the central bar towards right of the chamber).



The right-hand image shows the decay of a charged kaon into a muon and a neutrino. The kaon has come in at the top right of the chamber and the decay occurs where the track appears to bend to the left abruptly. The track beyond this kink is due to the muon, which penetrates the bar across the chamber. The neutrino has no charge and so remains invisible in the detector - its presence is inferred from the imbalance in momentum where the kink occurs.

<http://www.particlephysics.ac.uk/news/picture-of-the-week/picture-archive/the-kaon-s-50th-anniversary.html>

Hadronen



Baryonzahlerhaltung: $\Sigma B = \textit{konst.}$

“Seltsame” Teilchen: $\Sigma S = \textit{konst.}$