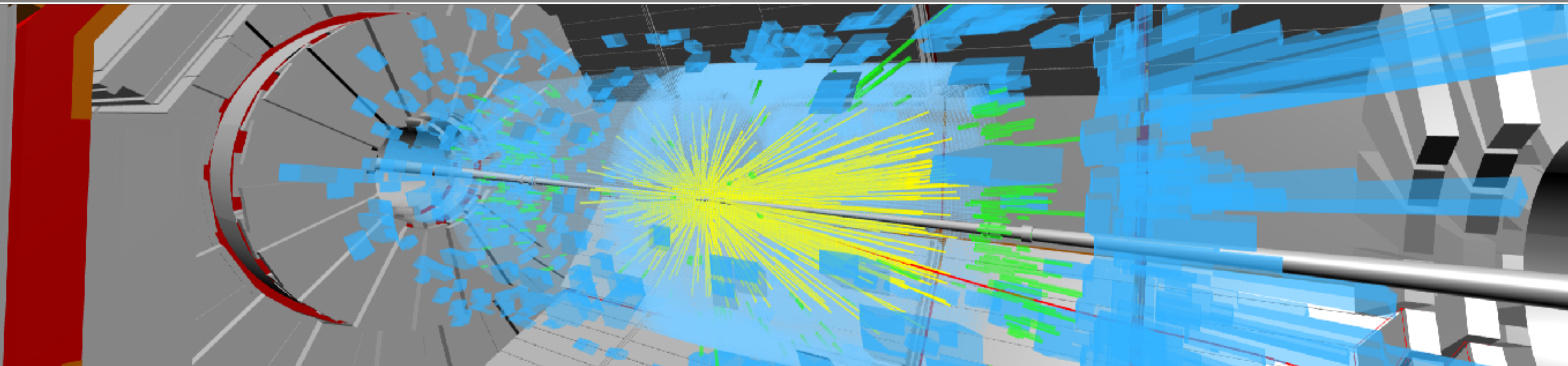


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Karlsruher Institut für Technologie
Sommersemester 2019 – 12. Vorlesung (Teil 2)

ULRICH HUSEMANN, KATHRIN VALERIUS

Bildquelle: CMS



Auflösung Aufgabe 22

- Welche der Aussagen zur Farbwechselwirkung sind korrekt?
- A. Das statische Potenzial ist coulombartig für kleine Abstände und linear für große Abstände > 1 fm.
 - B. Die Kopplungskonstante wird stärker für kleine Abstände.
 - C. Die Produktionsrate von Hadronen in e^+e^- -Kollisionen ist proportional zur Zahl der Farbladungen.
 - D. In der Natur gibt es nur Hadronen, die aus Quark-Antiquark-Paaren oder drei Quarks bzw. Antiquarks bestehen.
 - E. Die asymptotische Freiheit in der QCD führt zur Bildung von Jets.

Kurze Wiederholung

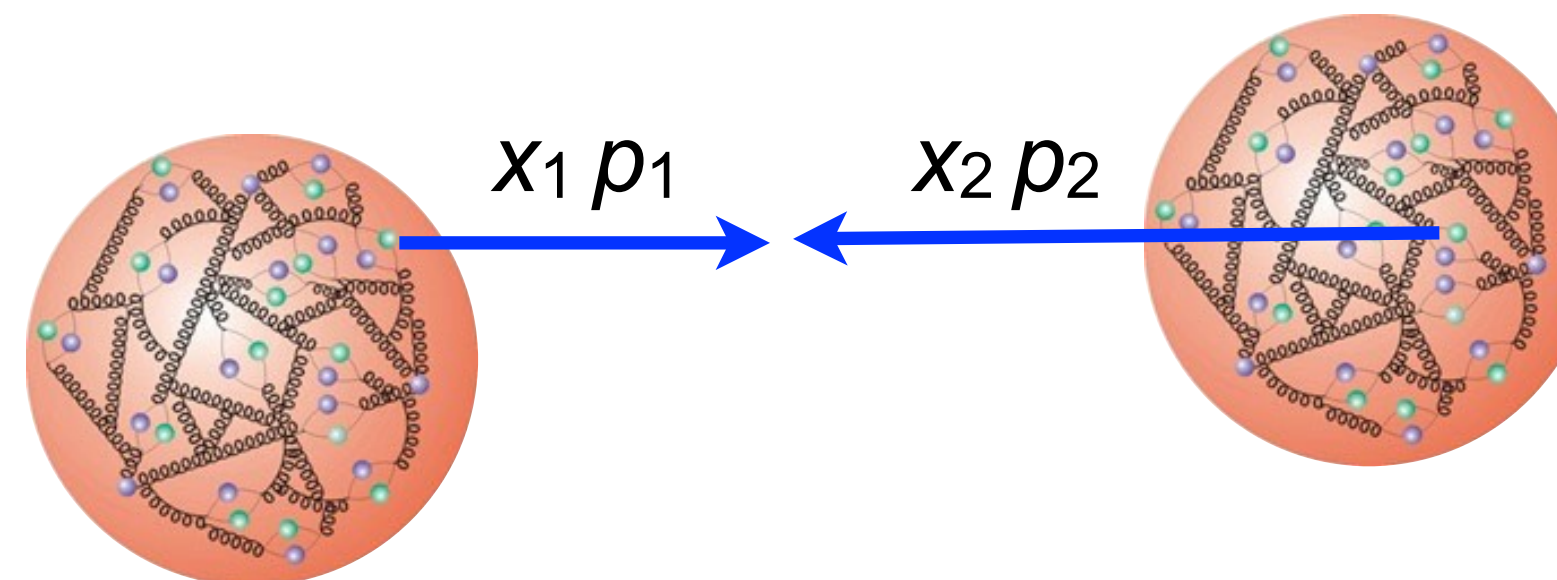
- Wechselwirkungen in der QCD:
 - **Farbladungen** der Quarks (Farbe) **und** Gluonen (Farbe+Antifarbe)
 - Farbe als physikalischer Freiheitsgrad: z. B. **Antisymmetrie** der Ω^- -Wellenfunktion
 - Zahl der Farbladungen: z. B. aus **Verhältnis** des hadronischen und $\mu^+\mu^-$ -Wirkungsquerschnitts in e^+e^- -Kollisionen als Funktion der Schwerpunktsenergie $\sqrt{s}$
- Laufende Kopplungskonstanten:
 - QED: **Abschirmung** der Ladung durch Vakuumpolarisation
→ **größere** Kopplung für größere Impulsüberträge (= kleinere Abstände)
 - QCD: **Antiabschirmung** der Farbladung (Gluonen) dominiert Abschirmung (Quarks)
→ **kleinere** Kopplung für größere Impulsüberträge → **asymptotische Freiheit**
- Quarks mit hohen Impulsen: **Jets** (3-Jet-Ereignisse → Entdeckung des Gluons)

Kapitel 6.4

Struktur der Nukleonen und Partonmodell

Motivation: Struktur der Nukleonen

- Studium der **Nukleonenstruktur**: interessant „an sich“
 - Wie teilt sich der **Impuls** der Nukleonen auf die Partonen auf?
 - Woher kommt der **Spin** der Nukleonen? (hier nicht behandelt)
- Wichtige Eingangsgröße für **Experimente mit Hadronen**:
 - Beispiel: Proton-Proton-Kollisionen am LHC → eigentlich Kollisionen zwischen **Partonen** (mit Bruchteilen x_i der Protonenimpulse p_i)



- Physikalische **Interpretation** der LHC-Ergebnisse
→ sehr genaue Kenntnis der **Struktur** des Protons benötigt

Erinnerung: Inelastische eN-Streuung

■ Inelastische Streuung:

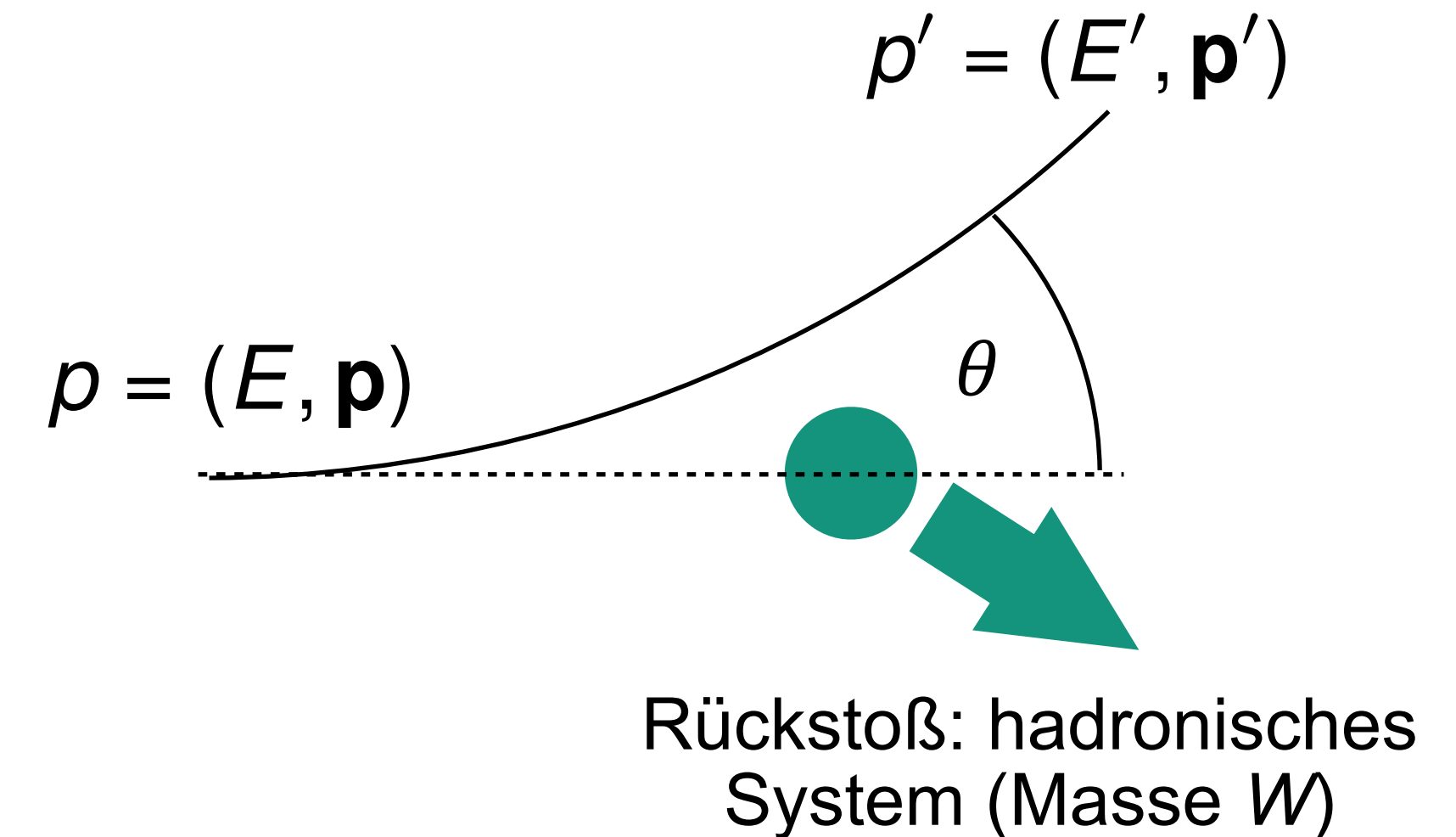
- Unelastischer Energieübertrag auf Target
- Targetnukleon bricht auf, **hadronisches System** mit Masse $W \geq M$ nimmt Rückstoß auf

■ Kinematik: **lorentzinvariante** Größen

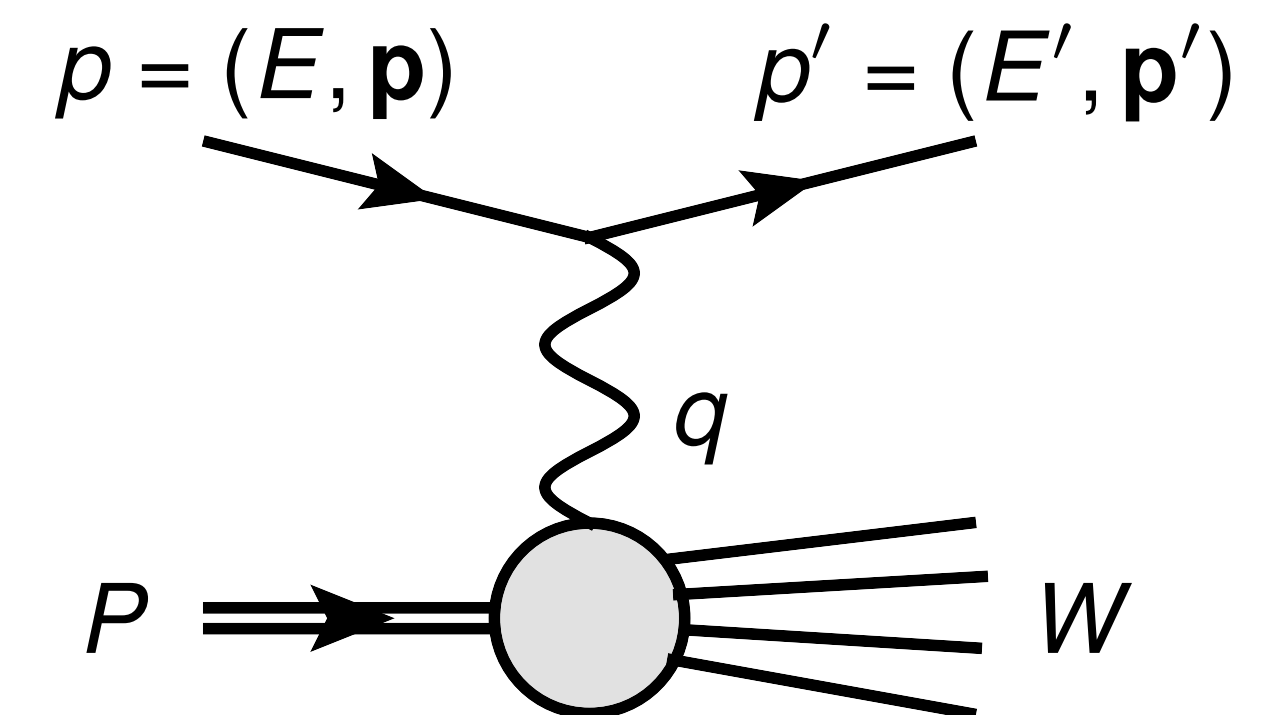
- Impulsübertrag: $Q^2 = -q^2 = -(p - p')^2$
- Energieübertrag: $\nu = \frac{P \cdot q}{M} \rightarrow \nu^* = E - E'$
- Inelastizität: $y = \frac{P \cdot q}{P \cdot p} \rightarrow y^* = \frac{E - E'}{E}$
- Invariante Masse des hadronischen Systems:
 $W^2 = (P + q)^2 = M^2 + 2M\nu - Q^2$

■ Bedingung für **tiefinelastische Streuung**

(engl.: deep inelastic scattering, DIS): $W^2, \nu^2/c^4, Q^2/c^2 \gg M^2$



eN-Streuung: Impulsübertrag durch virtuelles Photon

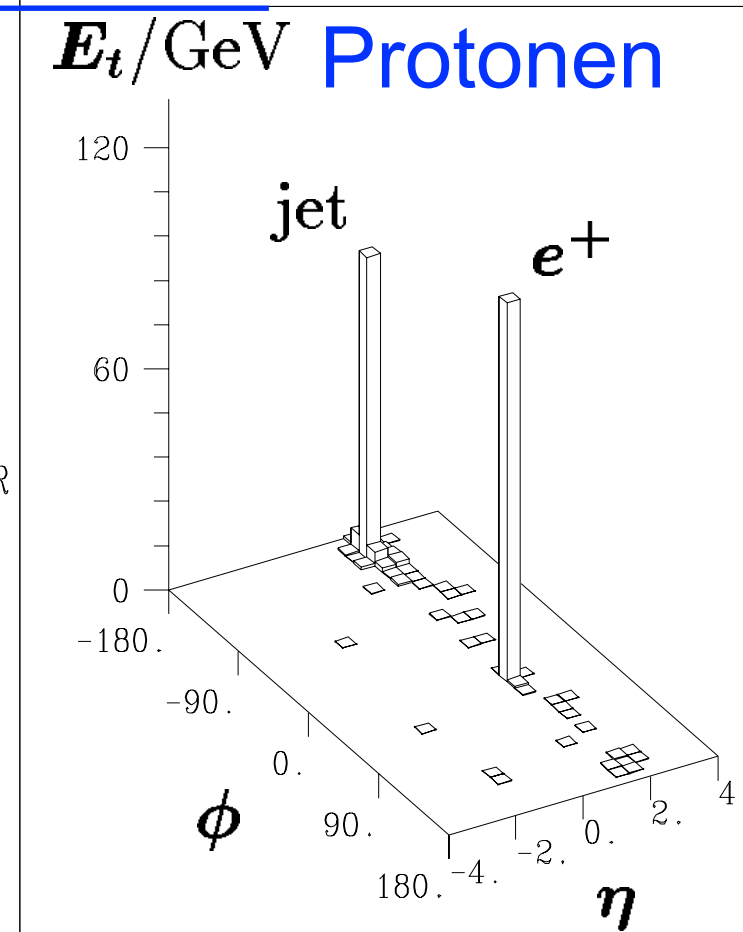
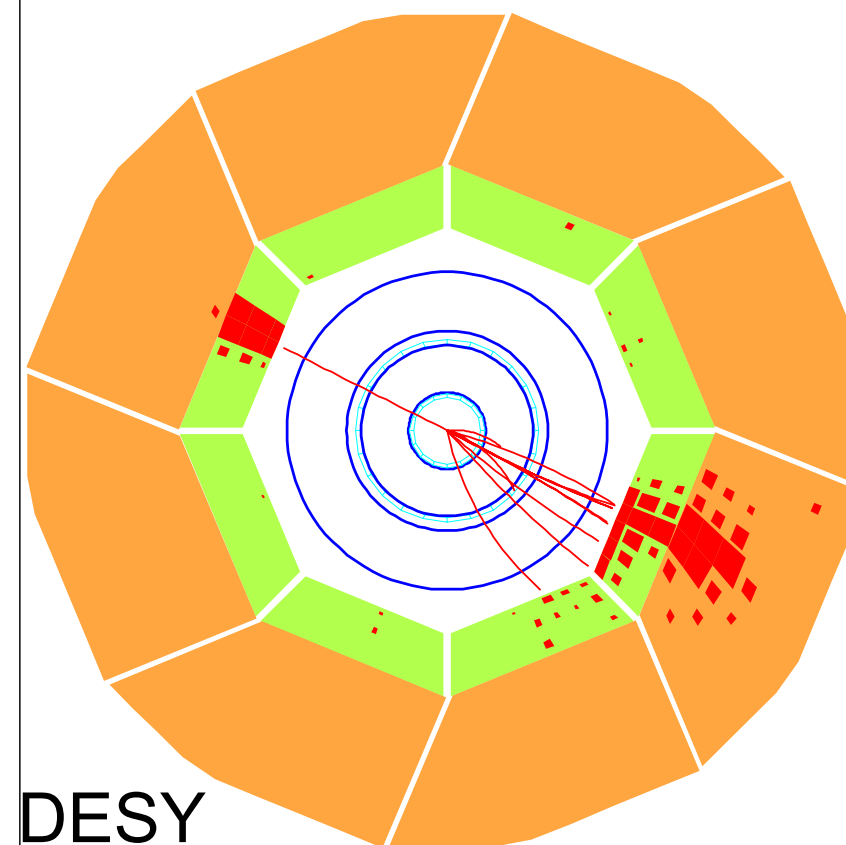
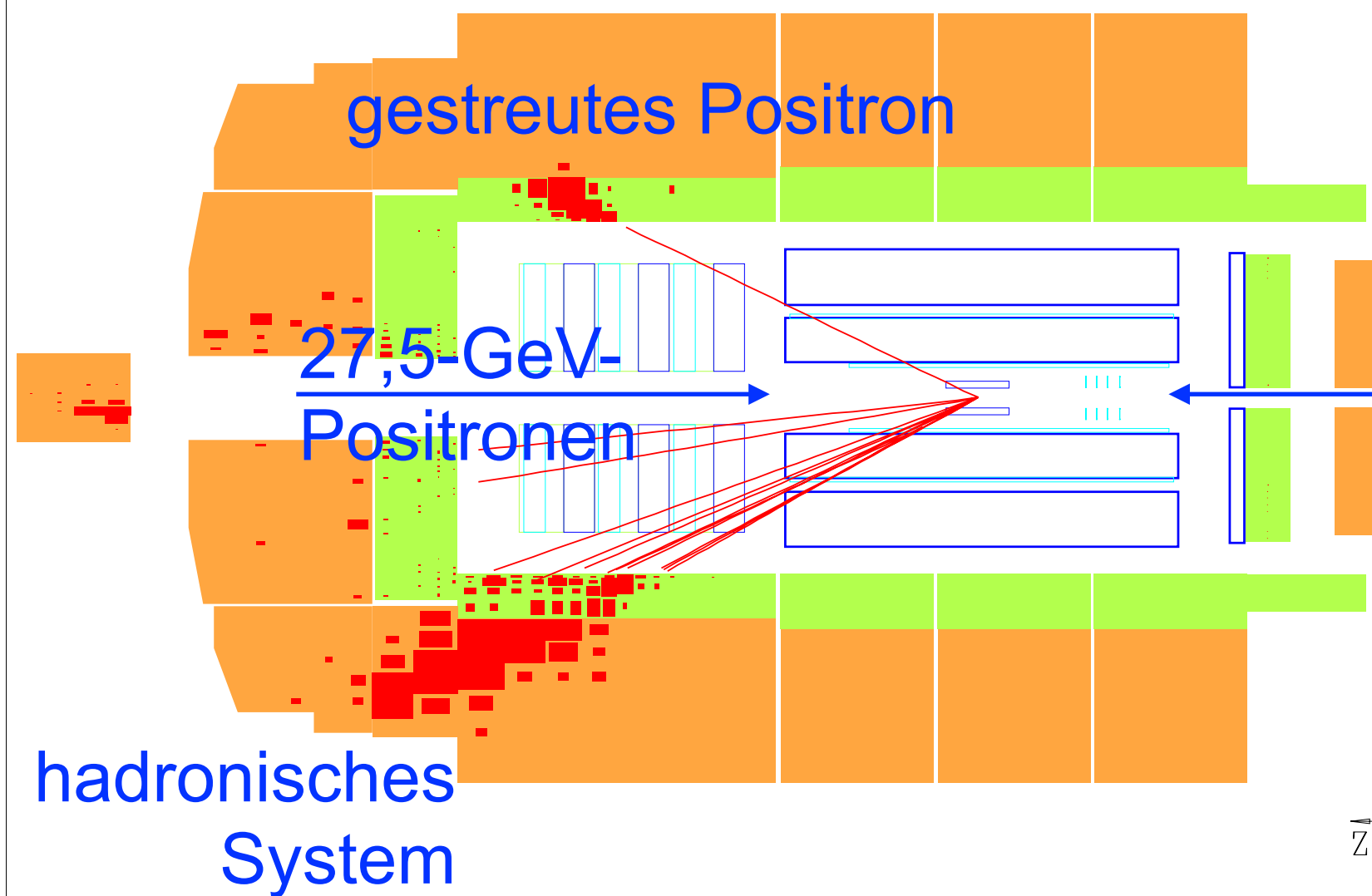


e⁺p-Kollision bei HERA

H1 Run 122145 Event 69506 Date 19/09/1995

$$W = 211 \text{ GeV} \gg m_p$$

$$Q^2 = 25030 \text{ GeV}^2, \quad y = 0.56, \quad M = 211 \text{ GeV}$$



(DESY, 1992–2007, Experimente H1 und ZEUS)

Erinnerung: Inelastische eN-Streuung

- Differenzieller Wirkungsquerschnitt für inelastische eN-Streuung:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2(\hbar c)^2}{Q^4} \left[\frac{1-y}{x} F_2(x, Q^2) + y^2 F_1(x, Q^2) + \mathcal{O}(M/E) \right]$$

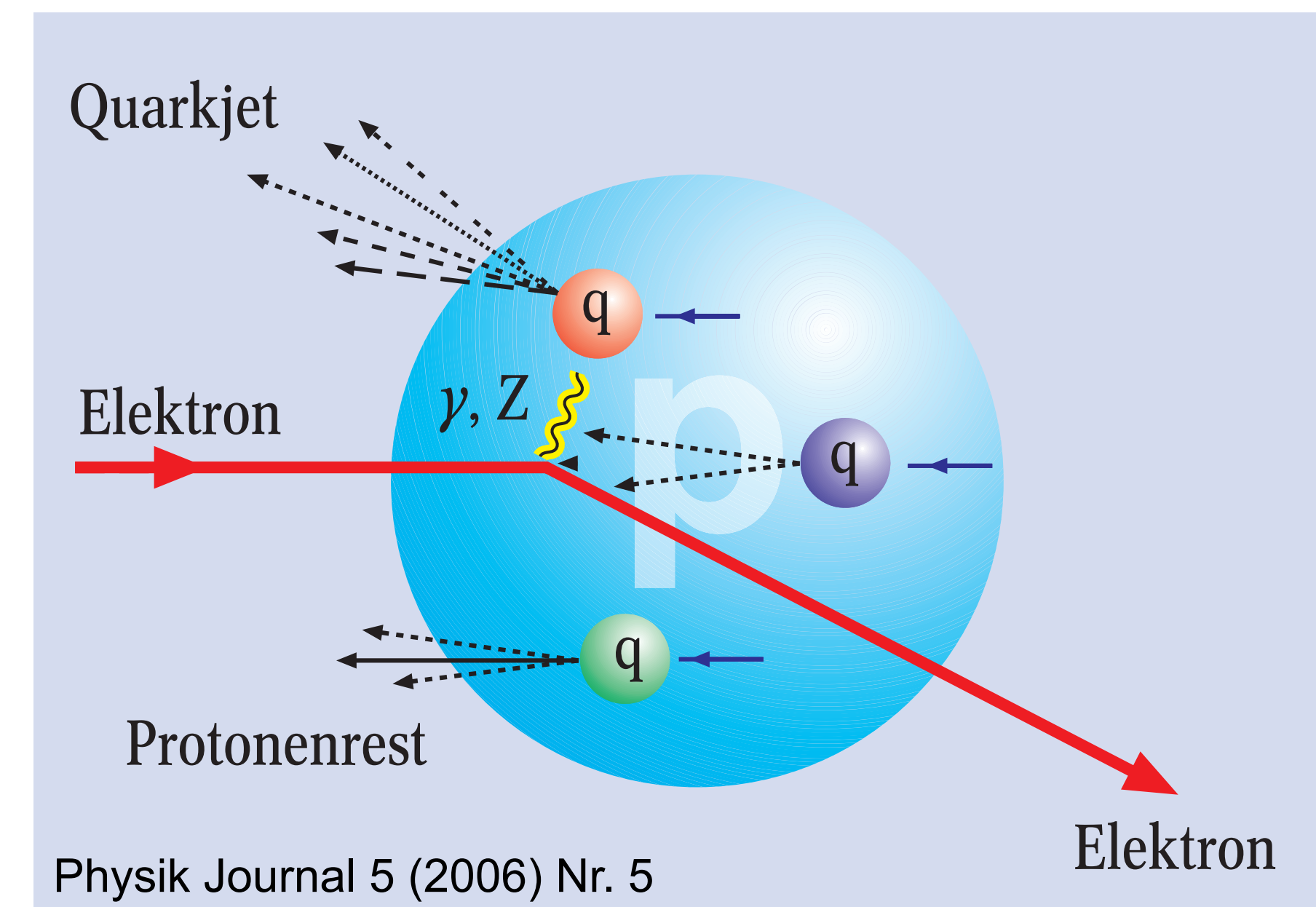
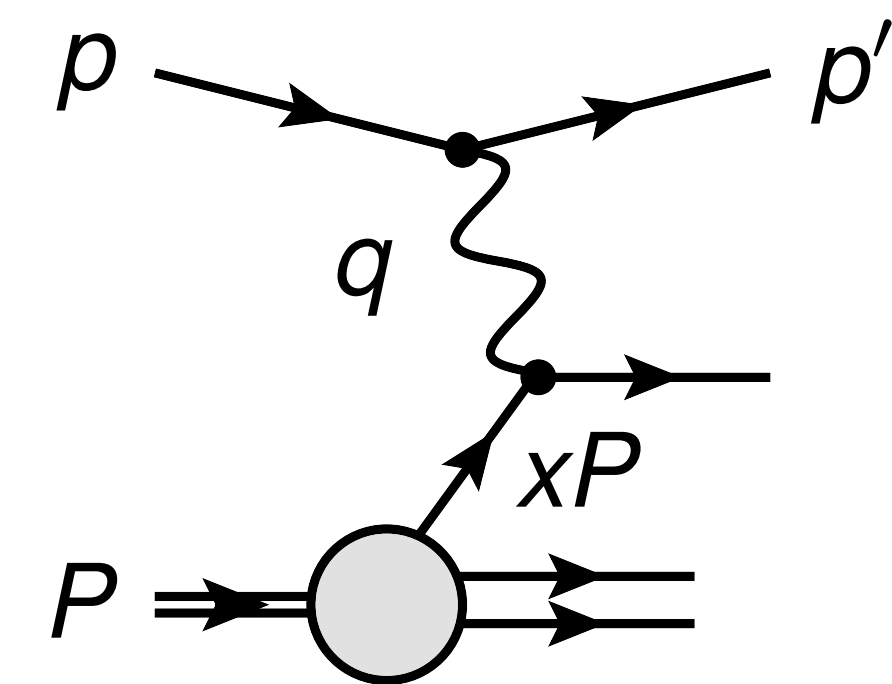
- Inelastisch → abhängig von **zwei** Variablen, z. B. Impulsübertrag Q^2 und Bjorken-Skalierungsvariable

$$x \equiv x_{\text{Bj}} \equiv \frac{Q^2}{2M\nu} = \frac{Q^2}{2P \cdot q}$$

- $F_{1,2}$: **Strukturfunktionen** des Nukleons (dimensionslos)
- Experimentell: **Bjorken-Skalierungsverhalten** → für tiefinelastische Streuung hängt differenzieller Wirkungsquerschnitt (näherungsweise) nur von **einer** Variable ab (z. B. x_{Bj})

Erinnerung: Partonmodell

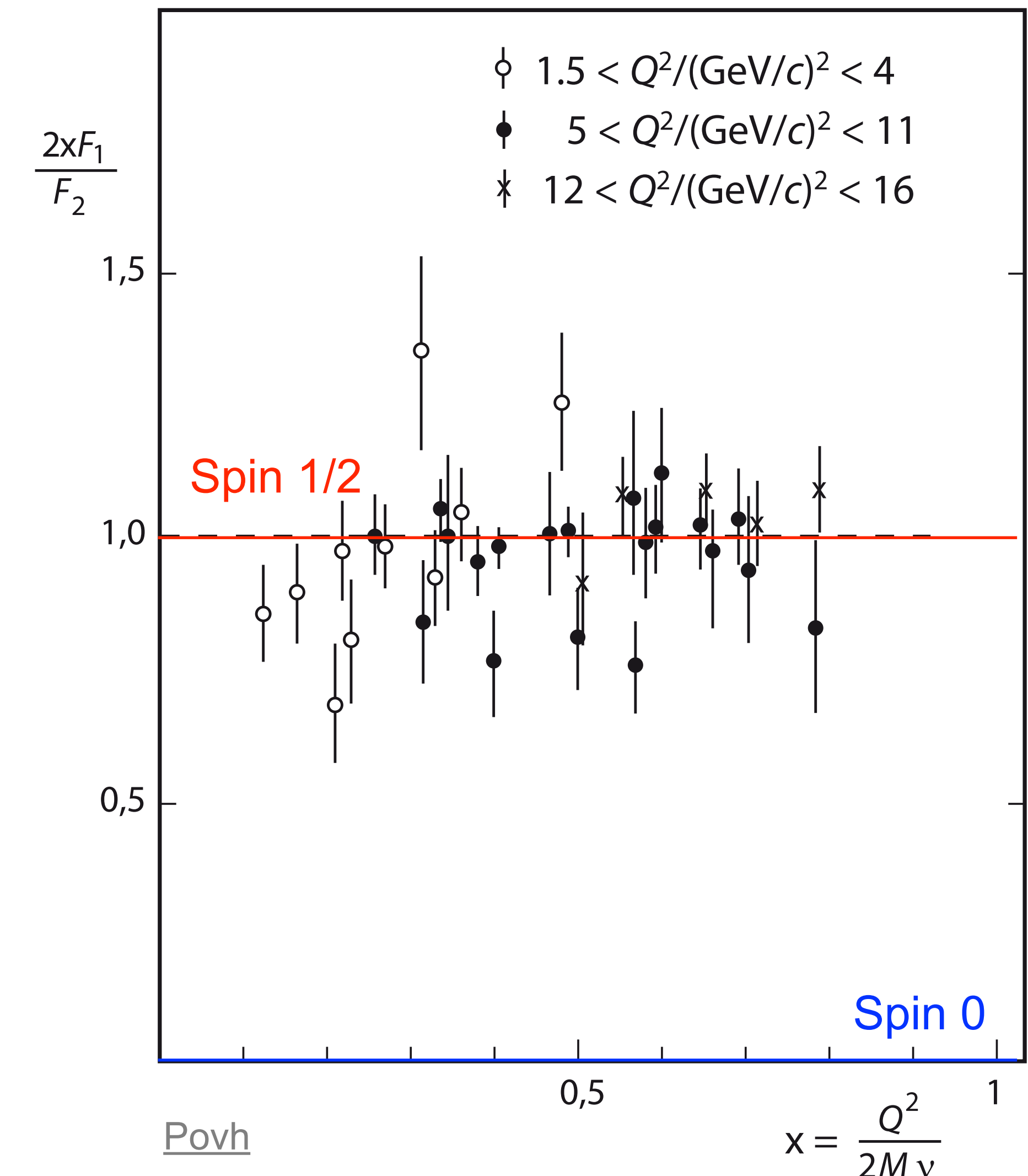
- Interpretation: (naives) **Partonmodell**
(Bjorken, Feynman, 1969)
 - Bei hohen Energien: eN-Streuung
= (inkohärente) Summe aus elastischen Streuprozessen mit Bestandteilen des Nukleons („Partonen“)
 - Heute: Partonen = **Quarks und Gluonen**
(quasifrei aufgrund asymptotischer Freiheit)
 - Interpretation: für gegebenes x_{Bj} (definiert aus Streukinematik) streut virtuelles Photon an **Parton mit Impulsbruchteil x** des Nukleons (in geschickt gewähltem Bezugssystem)



Callan-Gross-Relation

- Vorhersage des Partonmodells:
Zusammenhang zwischen Strukturfunktionen $F_1(x)$ und $F_2(x)$
aufgrund von Helizitätserhaltung
- Spin-1/2-Partonen: **Callan-Gross-Relation**

$$F_1(x) = \frac{1}{2x} F_2(x)$$
- Spin-0-Partonen: $F_1(x) = 0$
- Daten verträglich mit **Spin-1/2-Hypothese**,
aber nicht mit **Spin-0-Hypothese**
→ **relevante Partonen: Spin 1/2**



Naives Partonmodell

- Tiefinelastische Elektron-Nukleon-Streuung im naiven Partonmodell:
 - QCD: asymptotische Freiheit → **elastische** Streuung von Photonen an **einzelnen Spin-1/2-Partonen** mit Ladung $e_i \cdot e$ (e : Elementarladung)
 - **Inkohärente** Summe über alle elastischen Streuprozesse an Partonen → Summation von **Wahrscheinlichkeiten** $\sim |\text{Matrixelement}|^2$
 - Symbolisch:

$$\left| \text{Diagram 1} \right|^2 = \sum_j \int_0^1 dz_j e_j^2 \cdot \left| \text{Diagram 2} \right|^2$$

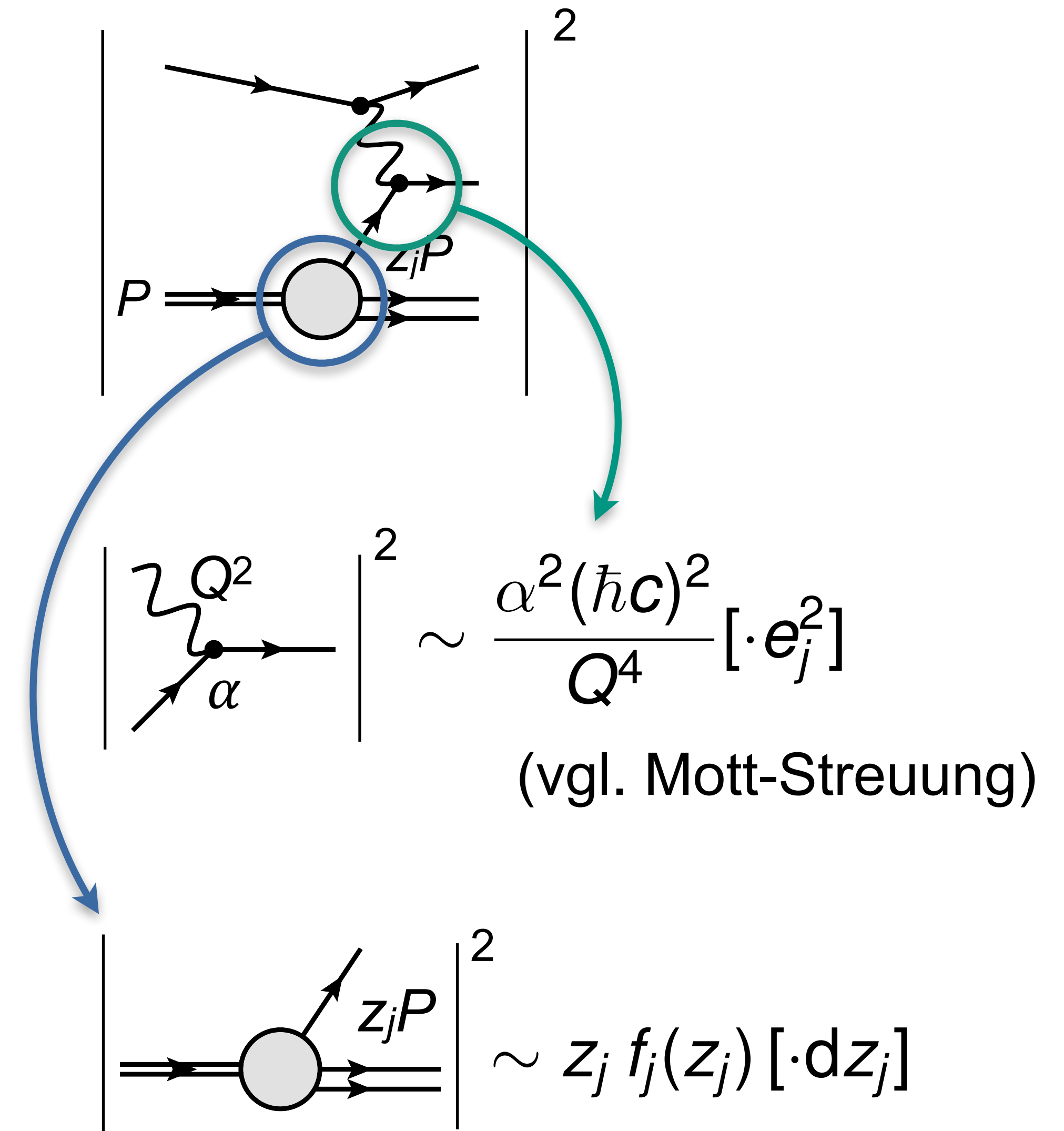
Diagram 1: A deep inelastic scattering (DIS) process. An incoming electron (represented by a straight line with an arrow) emits a virtual photon (represented by a wavy line) and scatters. The virtual photon interacts with a nucleon (represented by a grey circle) via a hard scattering vertex. The nucleon is then fragmented into several outgoing partons (represented by straight lines). The incoming nucleon is labeled P .

Diagram 2: A similar DIS process, but the virtual photon interacts with a single parton inside the nucleon. The parton is labeled $z_j P$, indicating it carries a fraction z_j of the nucleon's momentum P . The nucleon is again labeled P .

Naives Partonmodell: Faktorisierung

- DIS kann in zwei Unterprozesse zerlegt werden („Faktorisierung“):
 - Elementarer Streuprozess zwischen Photon und Spin-1/2-Parton
 - Wahrscheinlichkeit, Partontyp j mit Impulsanteil im Intervall $[z_j, z_j+dz_j]$ in Proton zu finden
- $f_j(z_j)$: **Partonverteilungsfunktion** (engl.: parton density function, PDF) mit Normierung

$$\sum_j \int_0^1 z_j f_j(z_j) dz_j = 1$$



Naives Partonmodell: F_2

- Vergleich mit DIS-Wirkungsquerschnitt:

$$\frac{d^2\sigma}{dx dQ^2} = \frac{4\pi\alpha^2(\hbar c)^2}{Q^4} \left[\frac{1-y}{x} F_2(x, Q^2) + y^2 F_1(x, Q^2) + \mathcal{O}(M/E) \right]$$

- **Elastische** Streuung an Partonen: $y = 0$, $F_i(x, Q^2) \rightarrow F_i(x)$
- Für **einzelnes** punktförmiges Spin-1/2-Parton mit Impuls $z_i P$ und Ladung e_i :

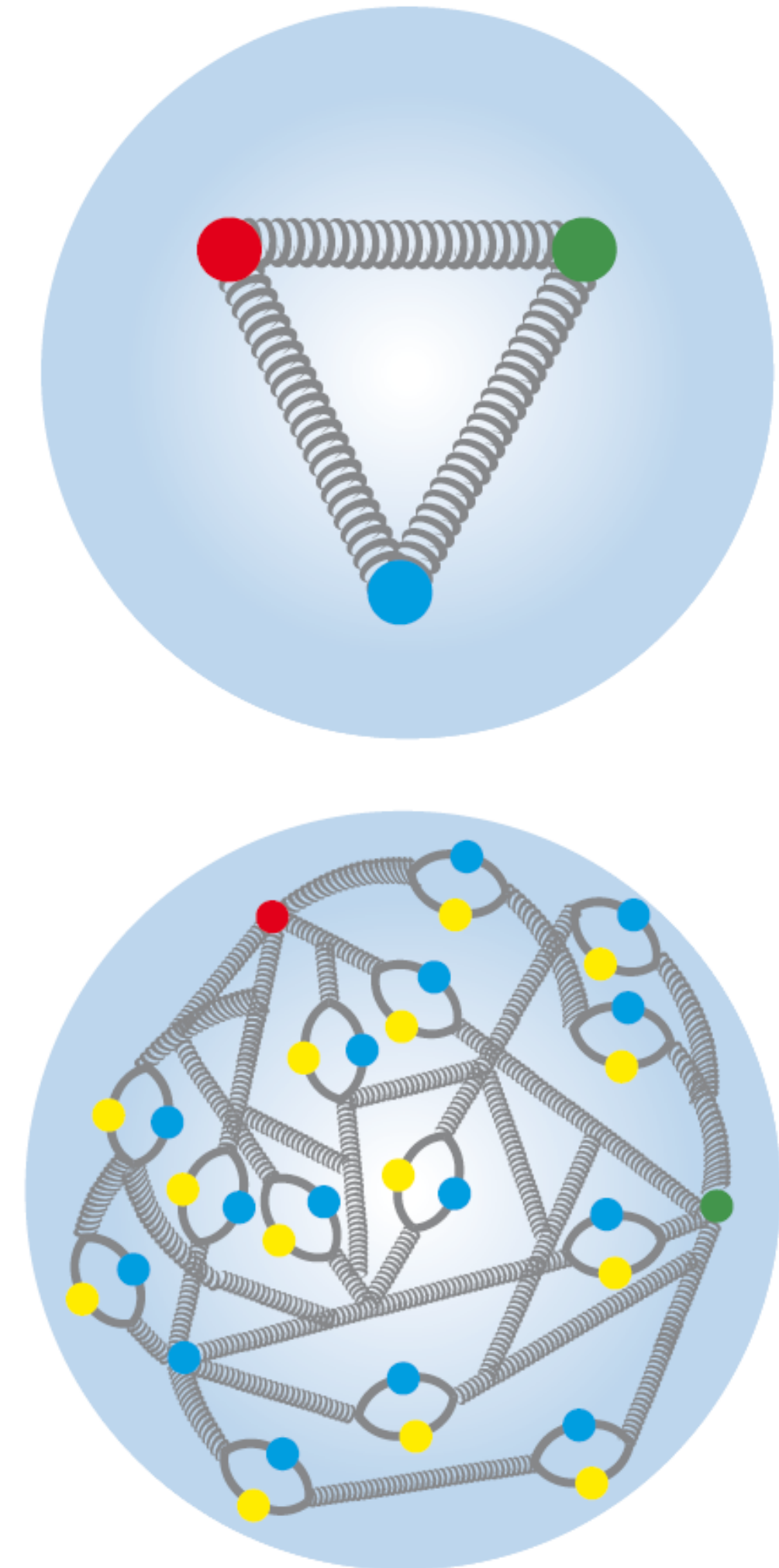
$$F_2(x) = e_i^2 \cdot \delta(z_i - x)$$

- Für **alle** Spin-1/2-Partonen im Nukleon (Summe über Partontypen j):

$$F_2(x) = \sum_j \int e_j^2 \cdot z_j f_j(z_j) \cdot \delta(z_j - x) dz_j = \sum_j e_j^2 \cdot x f_j(x)$$

Erweitertes Partonmodell

- Relevante Partonen im naiven Partonmodell:
 - **Elektromagnetische** Wechselwirkung: **geladene** Partonen
 - Quarkmodell: **Quantenzahlen** der Nukleonen durch **Valenzquarks** gegeben (Proton = $|uud\rangle$, Neutron = $|udd\rangle$)
- **QCD-Prozesse** im Nukleon: **erweitertes** Partonmodell
 - Emission von **Gluonen** (= neutrale Spin-1-Partonen) und Aufspaltung von Gluonen in **Quark-Antiquark-Paare**
- Nukleon = Valenzquarks + „See“ aus **zusätzlichen Quarks und Antiquarks** („Seequarks“) sowie **Gluonen**



Bildquelle: DESY

Strukturfunktion $F_2(x)$

- **Strukturfunktion $F_2(x)$ für Nukleonen im erweiterten Partonmodell:**

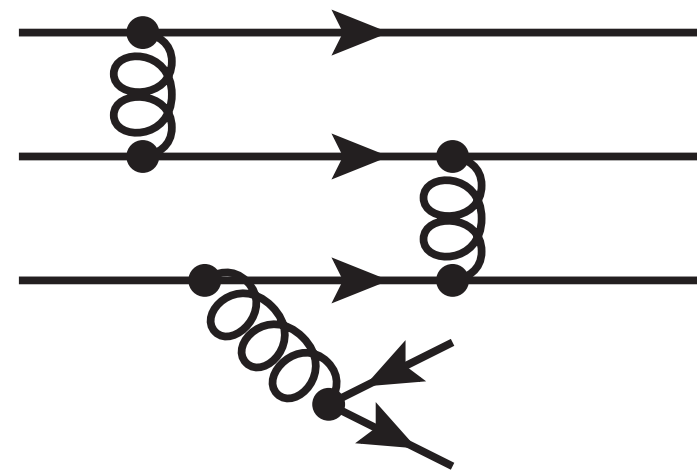
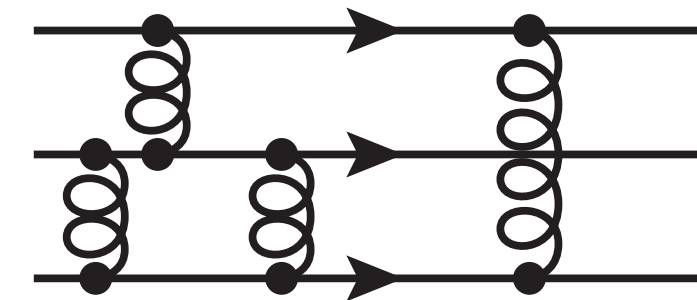
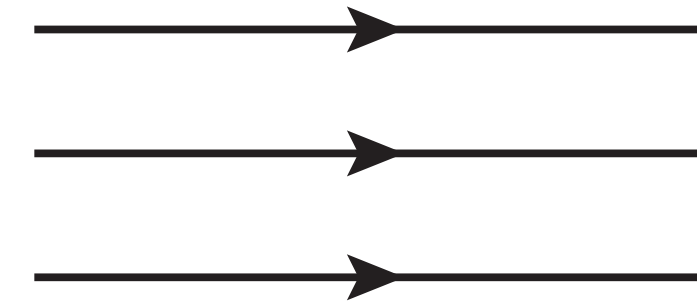
$$F_2^{eN}(x) = x \sum_j e_j^2 [q_j(x) + \bar{q}_j(x)]$$

- Summe der **mit e_j^2 gewichteten Impulsverteilungen*** aller möglichen Quarks und Antiquarks im Nukleon
- u- und d-Quarks: als **Valenzquarks** und **Seequarks**
- s-Quarks (im Prinzip auch c, b, t) und alle Antiquarks: nur als **Seequarks**
- **Messprogramm:** differentieller Wirkungsquerschnitt für tiefinelastische eN-Streuung $\rightarrow$ Bestimmung von $F_2(x)$ $\rightarrow$ Rückschlüsse auf PDFs
- Experimentell: Quarks und Antiquarks tragen nur **ca. 50% des Gesamtimpulses** der Nukleonen, Rest stammt von **Gluonen**

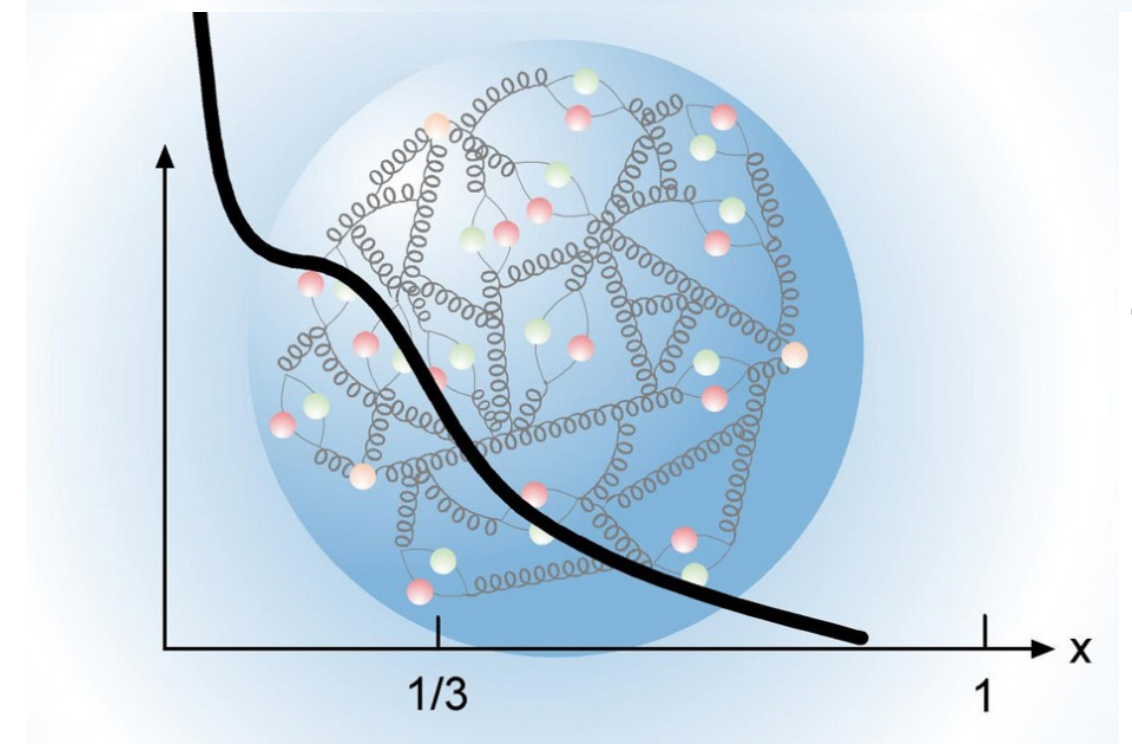
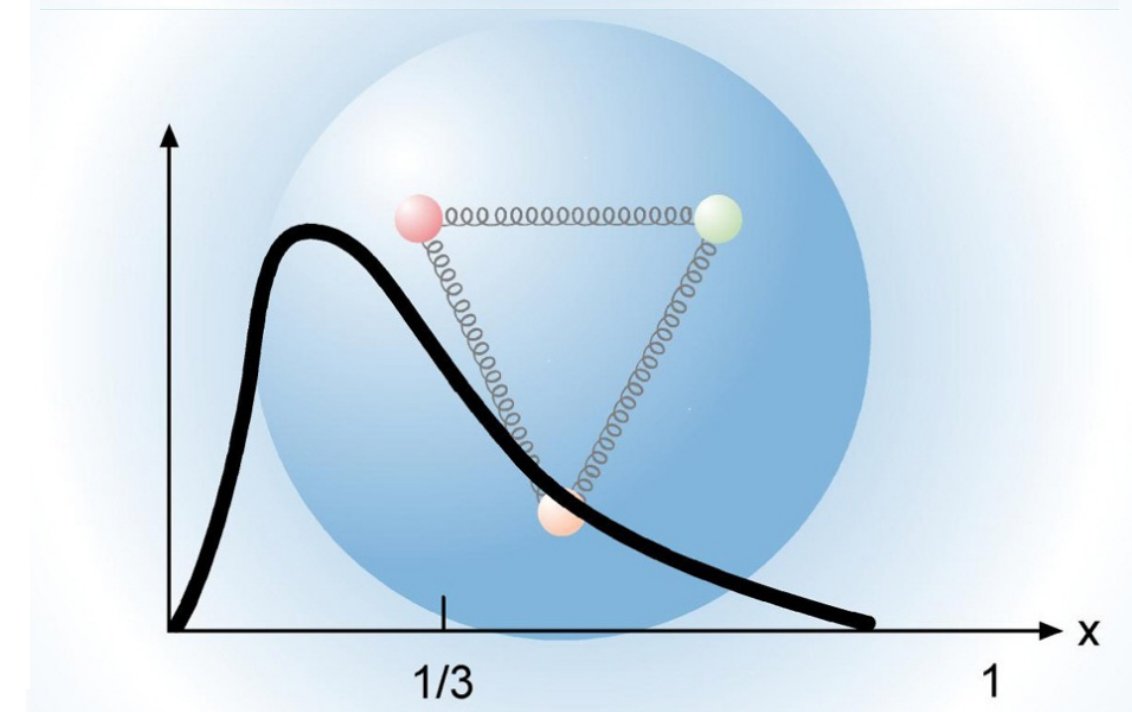
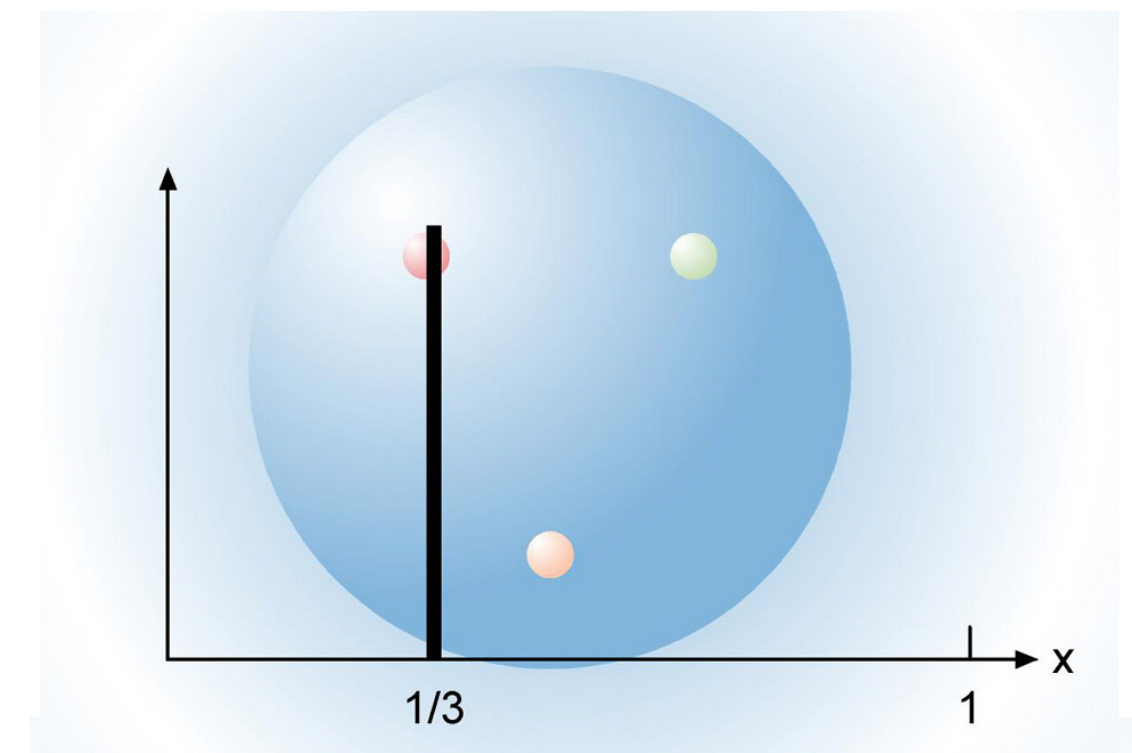
* $q_j(x)$ = Anteil der Partonen mit Impulsbruchteilen zwischen x und $x+dx$
 $xq_j(x)$ = Anteil des Protonenimpulses, der von allen Partonen in $[x, x+dx]$ getragen wird

Strukturfunktion $F_2(x)$

- Einfachstes Modell: **drei unabhängige Valenzquarks**
 $\rightarrow F_2 = \delta(1/3)$
- **Gluonaustausch** zwischen Valenzquarks $\rightarrow$ Verschmierung
- **Gluonaustausch und Gluonabstrahlung** $\rightarrow$ Seequarks



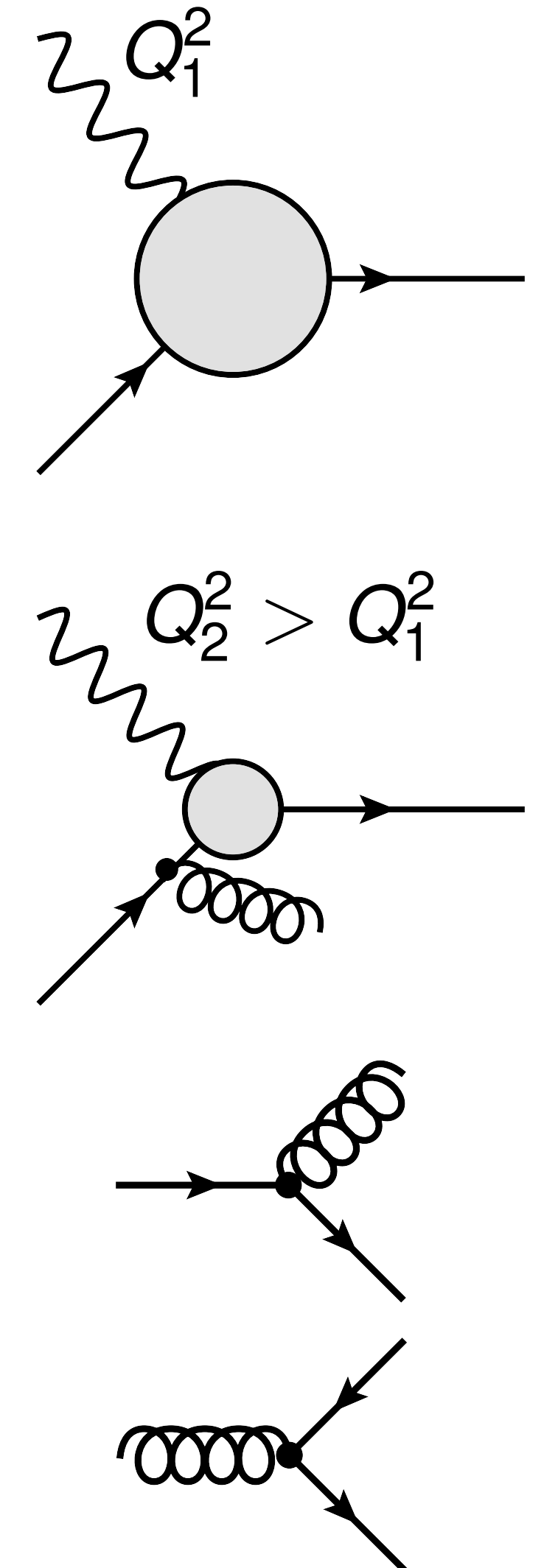
nach: Halzen, Martin, Quarks & Leptons



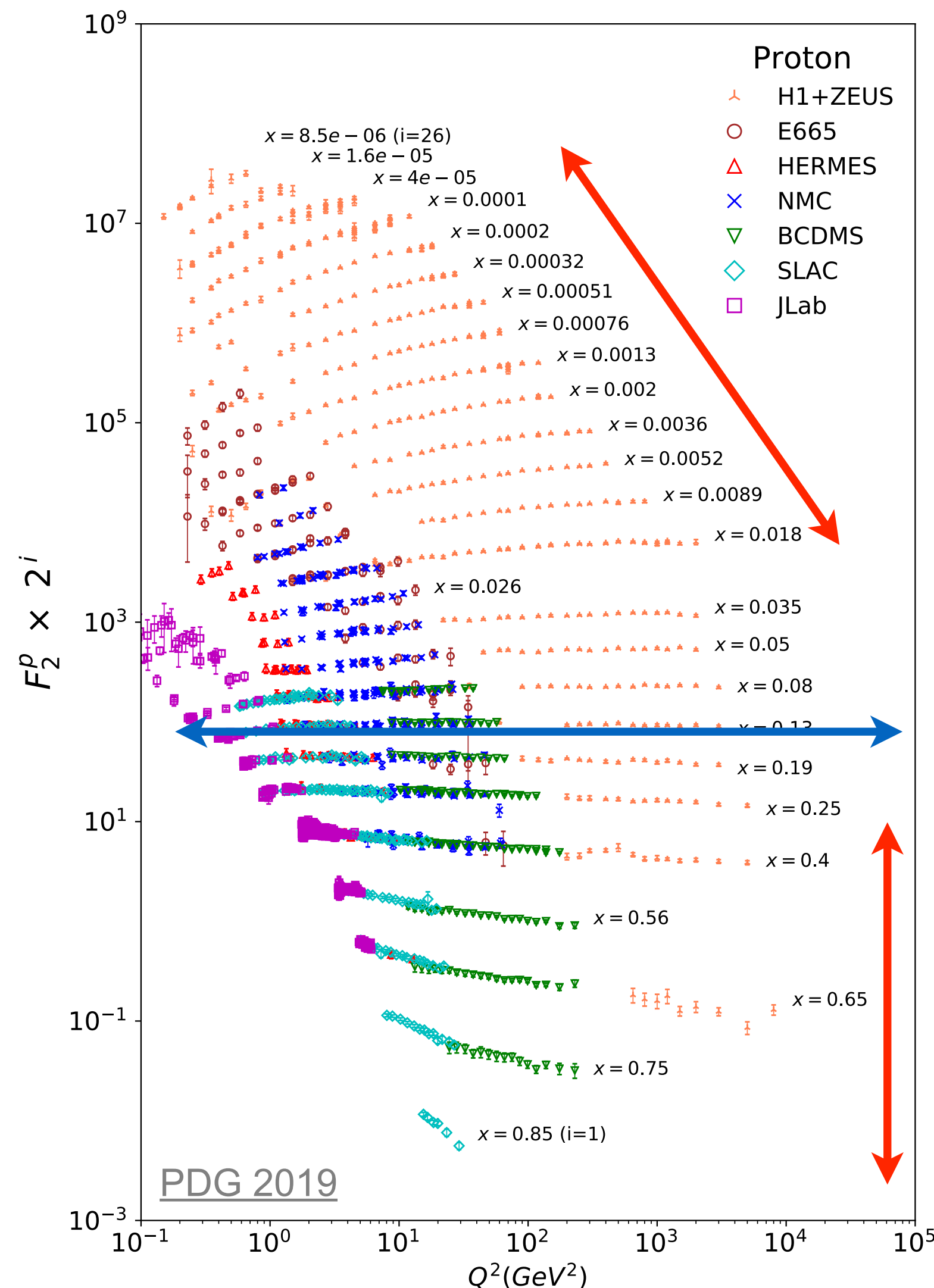
Bildquelle: DESY

Skalenverletzungen

- Anschaulich: Elektronenstrahl $\approx$ Mikroskop (virtuelle Photonen)
 - **Kleines Q^2** $\rightarrow$ **geringe Auflösung** des Photon-Parton-Vertex
 - **Großes Q^2** $\rightarrow$ **hohe Auflösung** des Photon-Parton-Vertex, Effekte der **Gluonen** werden sichtbar
- Konsequenz: **Skalenverletzungen**
= Abweichung vom Bjorken-Skalierungsverhalten
 $\rightarrow$ Strukturfunktionen werden **Q^2 -abhängig**: $F(x, Q^2)$
 - **Gluonabstrahlung**: zusätzliche Gluonen bei kleineren x , Quarkimpuls ebenfalls zu kleineren x verschoben
 - **Quark-Antiquark-Paare** aus Gluonen: zusätzliche Quarks und Antiquarks bei kleineren x



Messung von $F_2(x, Q^2)$



Skalen-
verletzung

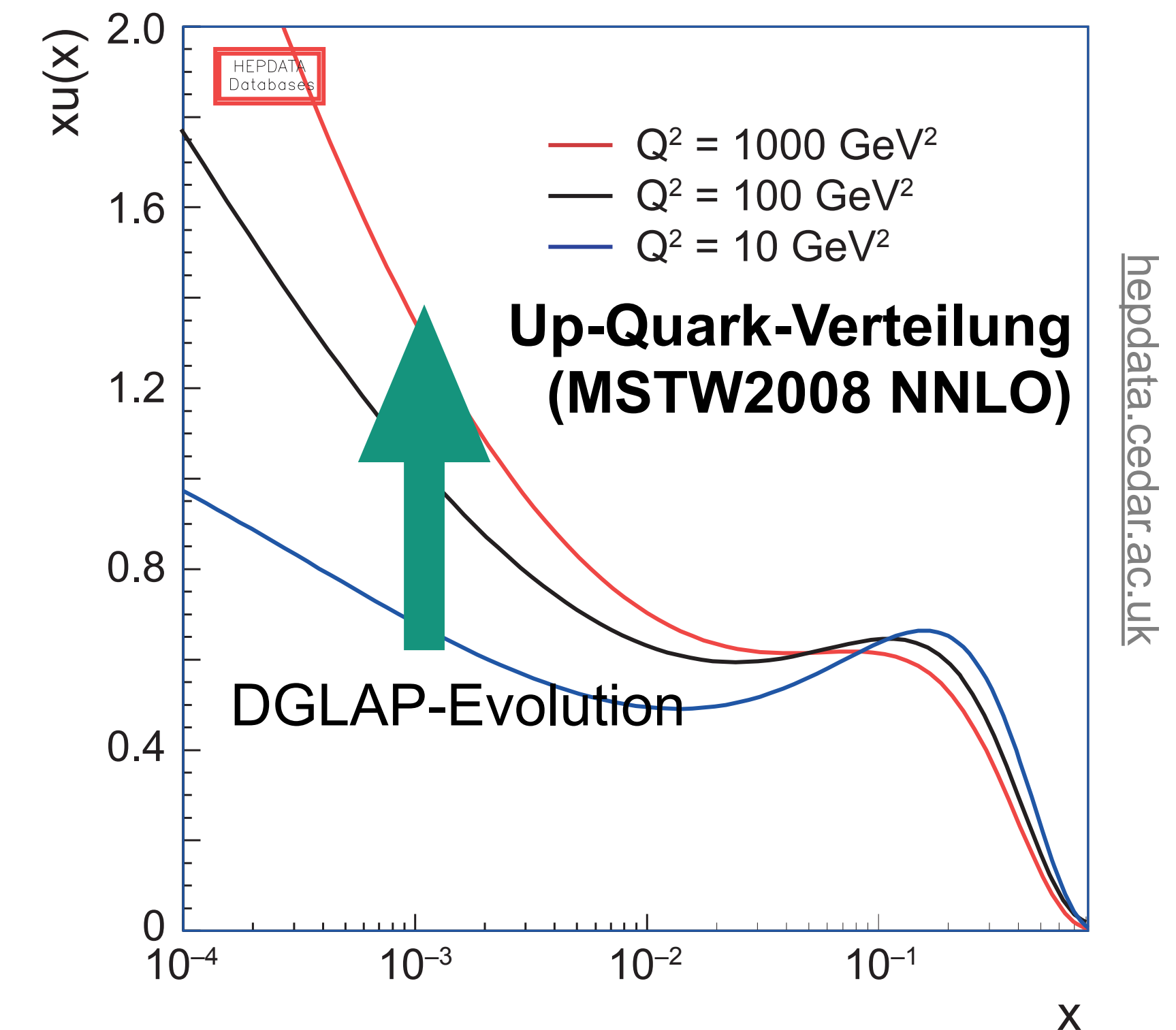
Bjorken-
Skalierungs-
verhalten

Skalen-
verletzung

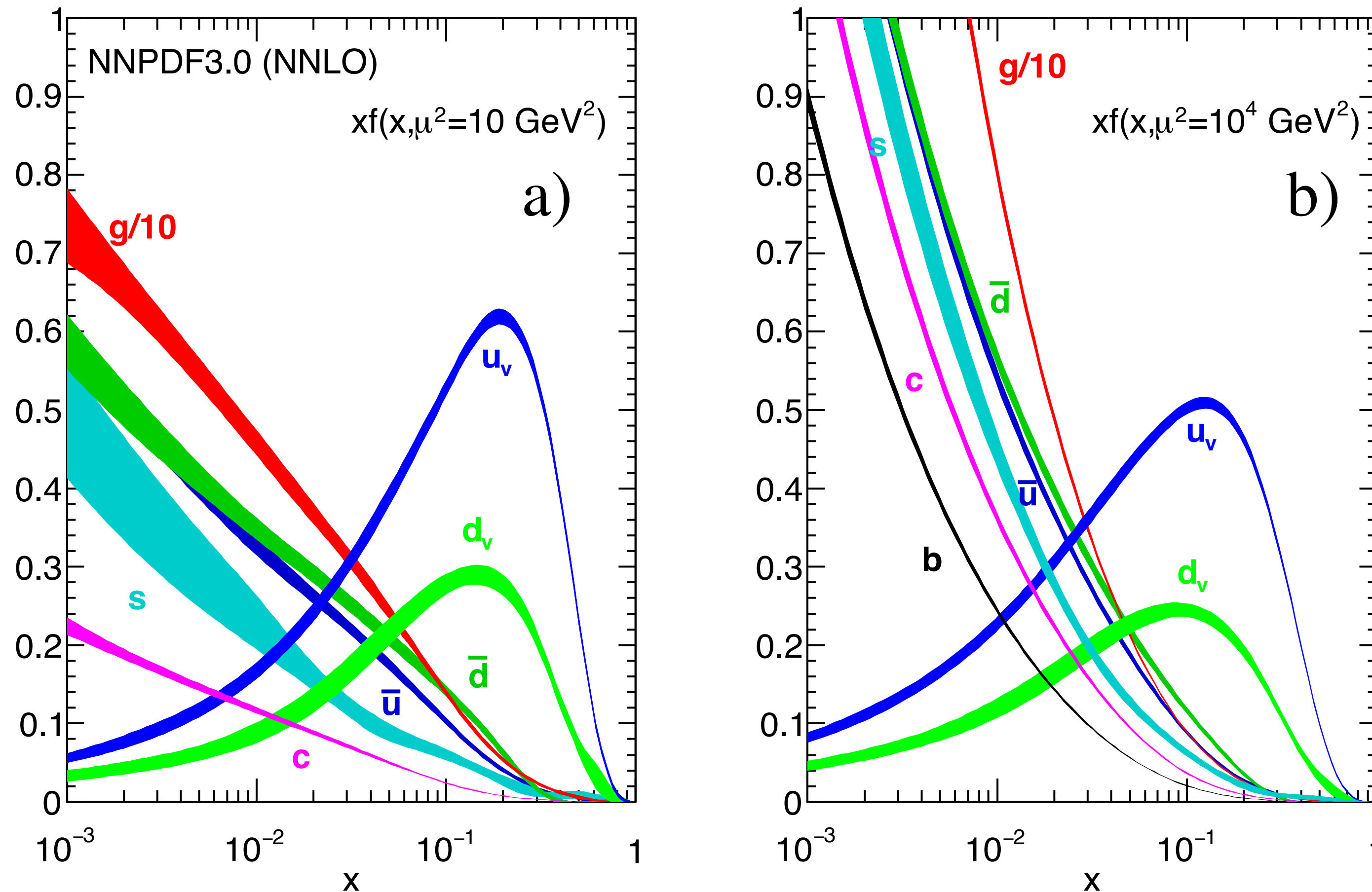
- **Skalierungsverhalten** für mittlere Werte von x : F_2 **unabhängig** von Q^2
- Verhalten für steigendes Q^2 :
Skalenverletzung durch Gluonen
 - Weniger Partonen mit großem x → F_2 fällt mit Q^2 ab
 - Mehr Partonen mit kleinen x → F_2 steigt mit Q^2 an

Partonverteilungen

- Beschreibung der **inneren Struktur** von Nukleonen mittels PDFs:
 - PDFs (bisher) **nicht** aus ersten Prinzipien **berechenbar**
 - PDFs = **universelle Eigenschaft** von Nukleonen → können in einem Prozess (z. B. tiefinelastische Streuung: F_2) bestimmt und auf andere Prozess angewendet werden
- **Evolution** der PDFs: **Bestimmung** einer PDF bei Q_0^2 → **Berechnung** der PDF bei beliebigen andere Q^2 (Dokshitzer-Gribov-Lipatov-Altarelli-Parisi-Gleichung, kurz: **DGLAP-Gleichung**)



Partonverteilungen



PDG 2019

- Unterschiedliche Physikprozesse (DIS, Jets, ...) sensitiv auf unterschiedliche **PDF-Kombinationen**
- Strategie: **gemeinsame Anpassung** vieler Messungen (HERA, LHC, Tevatron, Fixed Target) an parametrisierte Form der PDFs („PDF-Fit“)
- Beispiel: NNPDF3.0

Aufgabe 23

- Welche der folgenden Aussagen zum Partonmodell sind korrekt?
 - A. PDFs sind universelle Wahrscheinlichkeitsdichten für Partonen mit einem Impulsbruchteil x eines Nukleons.
 - B. Der gesamte Impuls eines Nukleons wird von Spin-1/2-Partonen getragen.
 - C. Für die Physik am LHC ist eine genaue Kenntnis der Proton-PDFs wichtig.
 - D. Mit steigendem Impulsübertrag Q^2 beinhalten Nukleonen weniger Gluonen mit geringen Impulsen.
 - E. In guter Näherung gibt es zusätzlich zu den Valenzquarks im Nukleon gleich viele Quarks und Antiquarks.

- Bitte beantworten Sie diese Frage anonym auf ILIAS:
https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=fold_1080516&client_id=produktiv

Kurze Zusammenfassung

- Tiefinelastische Streuung:
 - Wirkungsquerschnitt parametrisiert durch **Strukturfunktionen**
 - Partonmodell: Beschreibung der Strukturfunktionen durch gewichtete Summe aus **Partonverteilungen** (PDFs)
 - **Erweitertes** Partonmodell: QCD-Wechselwirkung der Quarks und Gluonen
 - Proton = **drei Valenzquarks** + **See** aus Quarks, Antiquarks, Gluonen
 - Bjorken-Skalierungsverhalten **verletzt**
- Partonverteilungen:
 - **Universelle** Eigenschaften des Nukleons, nicht ab initio berechenbar
 - PDF aus Messungen bei festem $Q^2 \rightarrow Q^2$ -Evolution durch DGLAP-Gleichungen
 - Experimente mit **Fixed-Target**-Aufbauten und an **HERA, Tevatron, LHC**: Messung der Strukturfunktionen in tiefinelastischer Streuung und andere Prozesse
 - PDFs aus Anpassung an Daten