

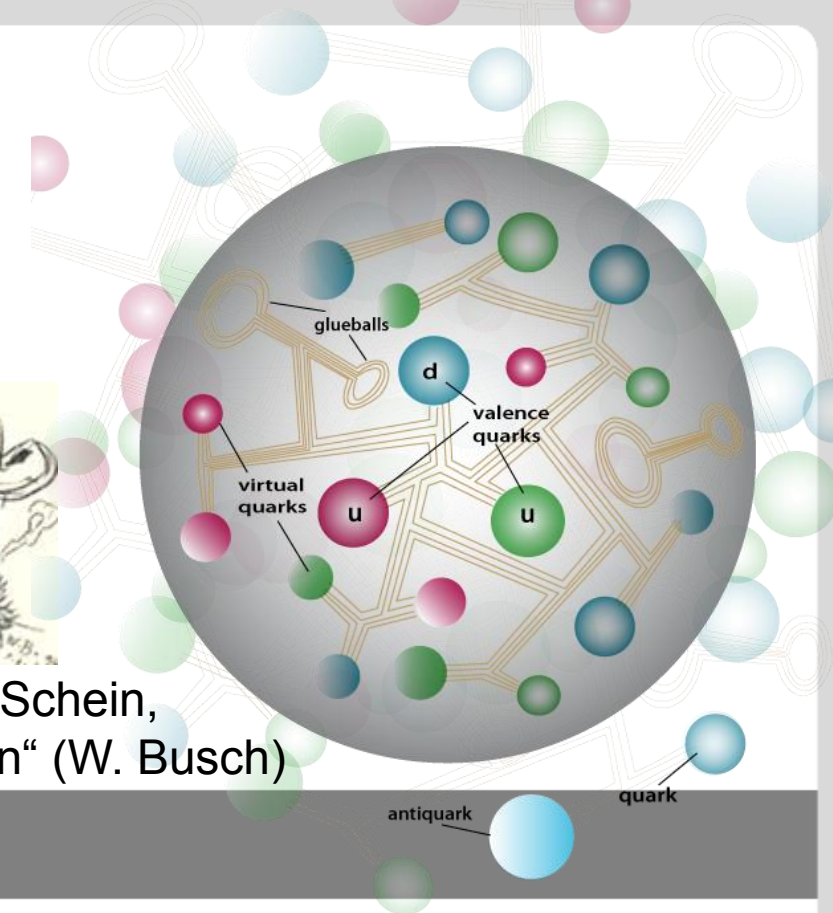
Kerne und Teilchen

Physik VI

Vorlesung # 08 6.5.2010

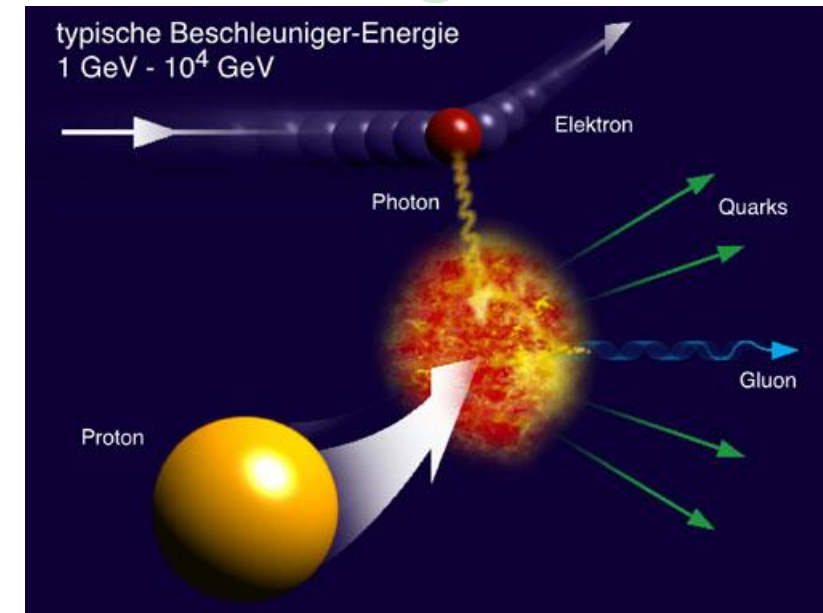
Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

„Verlockend ist der äußere Schein,
der Weise dringet tiefer ein“ (W. Busch)



Nukleonen

- Streuung an Partonen
- Strukturfunktionen im Partonenmodell
- Callan-Gross Relation
- Partonverteilungen (pdf)
- Impulsverteilung des Nukleons
- Gluonen & Masse des Nukleons



Nukleonen: Formfaktoren & Resonanzen



■ Sachs-Formfaktoren des Nukleons:

elektrischer (G_E) & magnetischer (G_M) Formfaktor des Nukleons

- $Q^2 = 0$: Proton: $G_E(0) = 1$, $G_M(0) = 2.79$, Neutron: $G_E(0) = 1$, $G_M(0) = -1.91$

anomale magnetische Momente $g_{\text{Proton}} = 5.58$, $g_{\text{Neutron}} = -3.82$

- aus Q^2 -Abhängigkeit von $G \Rightarrow$ Ladungsverteilung $\rho(r)$ der Nukleonen p, n

Dipolformfaktoren $G(Q^2)$:

$$G(Q^2) = \frac{1}{(1 + 1.41 \cdot Q^2 [\text{GeV}^2 c^{-2}])^2}$$

$\Rightarrow$ exponentieller Abfall $\rho(r)$

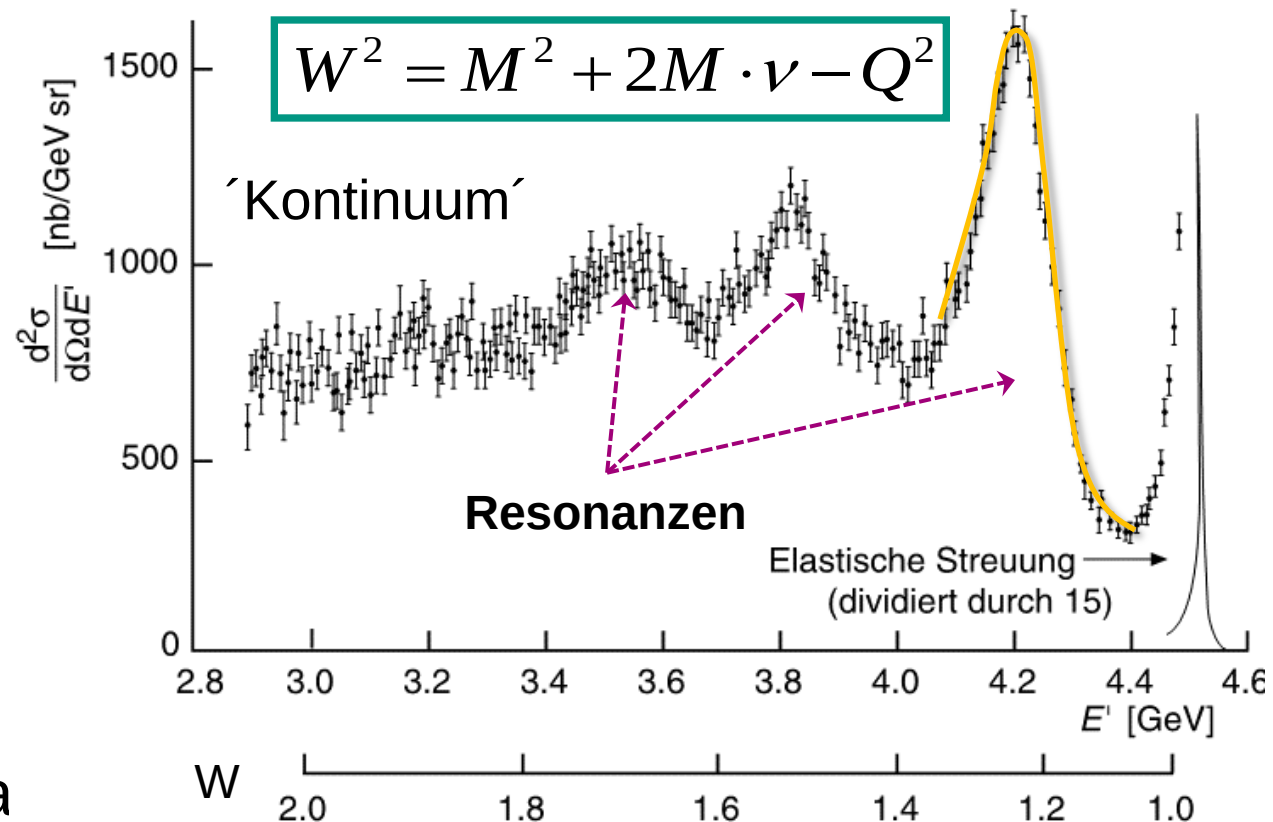
$\Rightarrow$ qdr. Ladungsradius $r \sim 0.8$ fm

■ Resonanzen:

tiefeinelastische Elektronstreuung

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

Nukleon wird angeregt (Δ -Resona



Nukleonen: tiefinelastische Streuung



■ große invariante Masse W :

- doppelt differentieller Wq. $d^2\sigma/d\Omega dE'$ des e^- wird unabhängig von Q^2
- Streuung an punktförmigen Konstituenten des Nukleons

■ Bjorken-Skalenvariable x :

- Maß der Inelastizität der Streuung
- elastisch: $x = 1$, inelastisch: $0 < x < 1$

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

■ dimensionslose Strukturfunktionen:

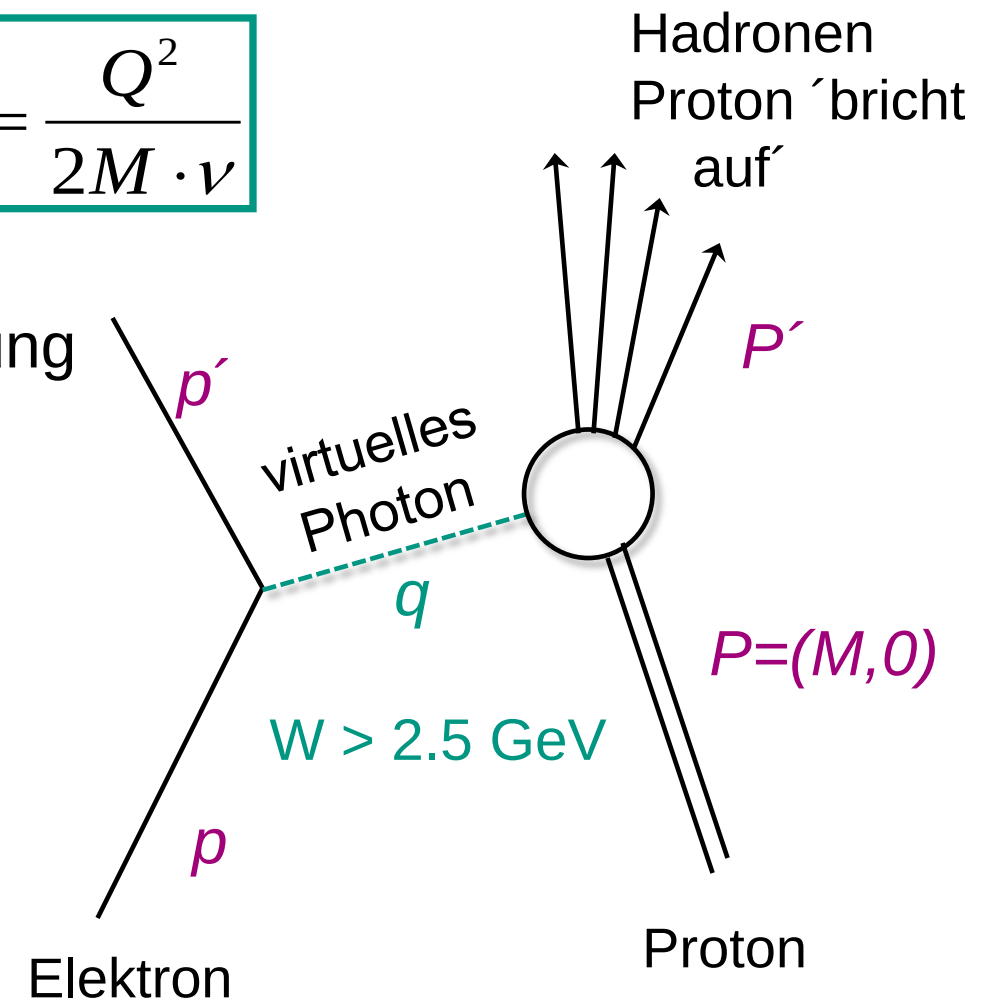
- = Fouriertransformierte der Ladungsverteilung
- magnetische Wechselwirkung:

$$F_1(x, Q^2) = Mc^2 \cdot W_1(Q^2, \nu)$$

- elektrische Wechselwirkung:

$$F_2(x, Q^2) = \nu \cdot W_2(Q^2, \nu)$$

Skaleninvarianz: F_1, F_2 unabhg. von Q^2
Streuung an punktförmigen Partonen



■ Parton-Modell des Nukleons R. Feynman (1969):

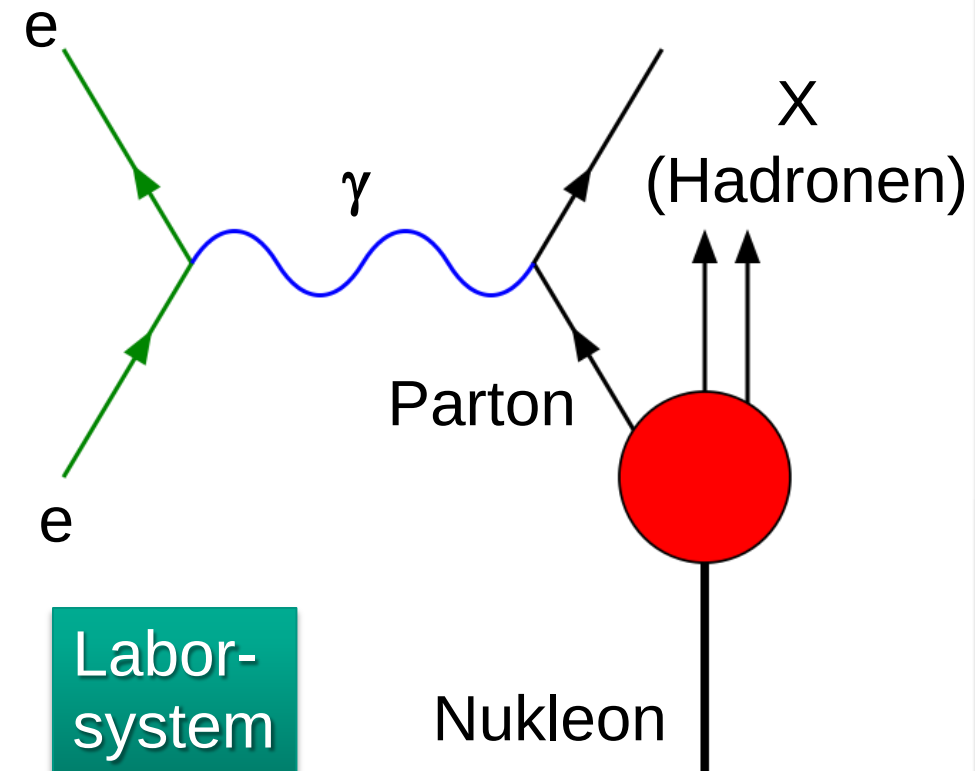
- die inelastische ep-Streuung lässt sich darstellen als eine inkohärente Überlagerung von **elastischen Elektron-Parton-Wechselwirkungen** d.h. Stoßzeit des Elektrons ist kleiner als Wechselwirkungszeit der Partonen
- kurze „Belichtungszeit“: Partonen sind in ihrem Zustand quasi „eingefroren“ spätere QCD-Wechselwirkung der Partonen lässt das Nukleon zerplatzen

■ Bjorken-Variable x:

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

x = Bruchteil des Viererimpulses des Nukleons, der vom Parton beim Stoßprozess getragen wird

bessere Diskussion der Kinematik durch Übergang vom Laborsystem in das Breit-System



Streuung an Partonen

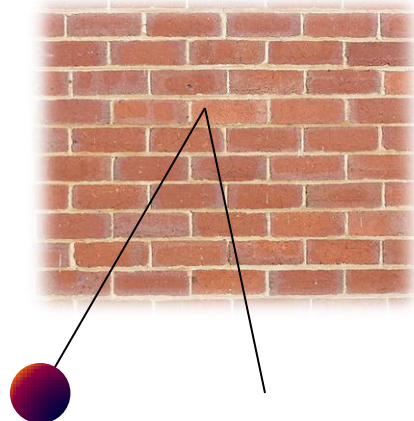
■ Kinematik im **Breit-System**:

- in diesem schnell bewegten System sind die transversalen Impulse & Ruhemassen der Partonen vernachlässigbar
[damit eigentlich: x = Anteil am longitudinalen Impuls des Nukleons]
- das **virtuelle Photon γ** überträgt **nur Impuls, aber keine Energie**
 $q = (0, \vec{q}) = (0, 2x \cdot P)$
- das Parton wird zurückgestreut wie an einer festen Wand
($x \cdot P \rightarrow -x \cdot P$)

„brick wall frame“

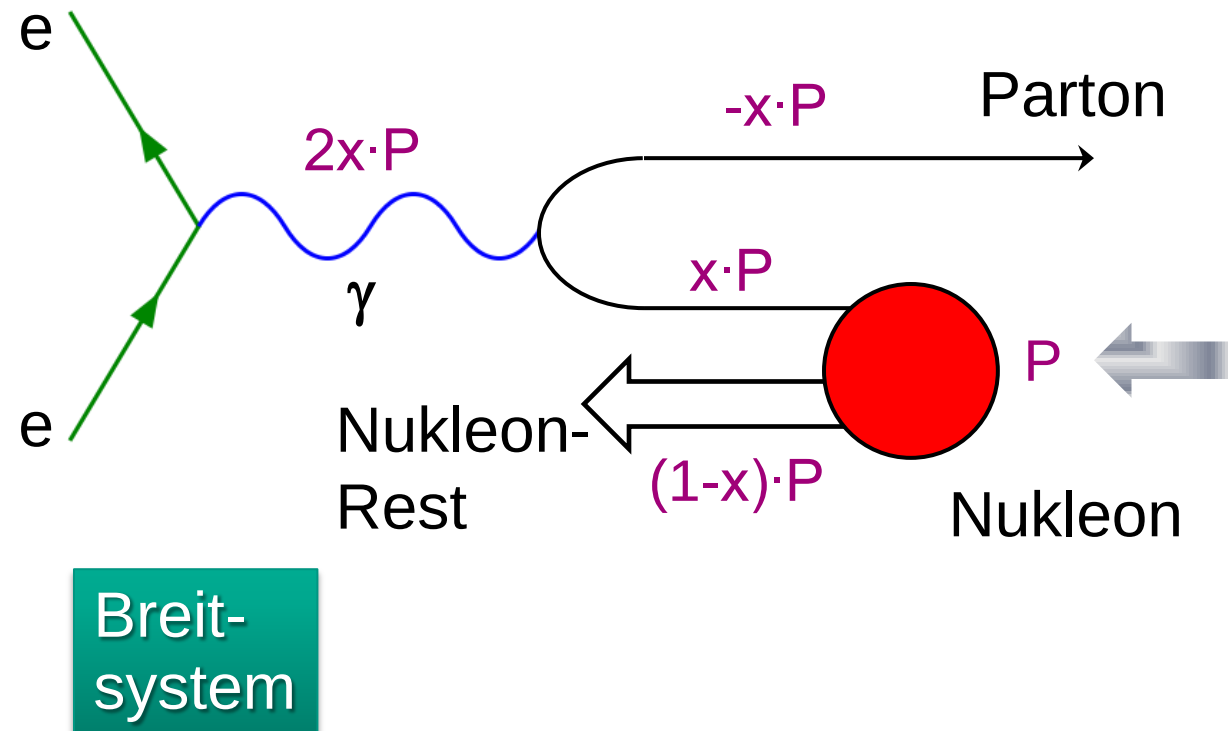


Gregory
Breit



$$\tilde{\lambda}_B = \frac{\hbar}{\sqrt{Q^2}}$$

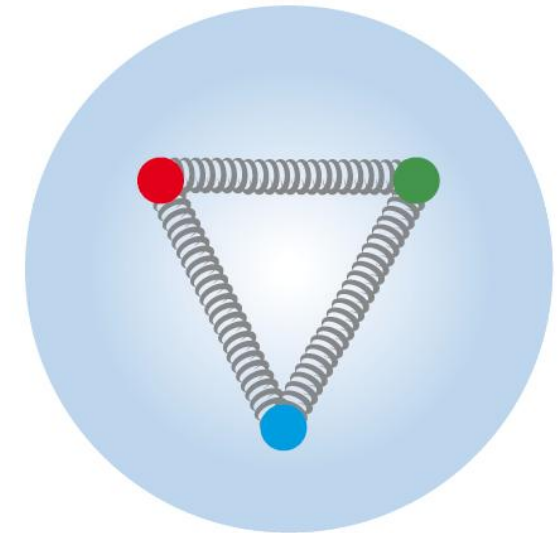
Auflösung



das Parton-Modell

- Nukleonen sind aus verschiedenen Quarktypen f mit der elektrischen Ladung $z_f \cdot e$ aufgebaut, Wq. für elektromagnet. Streuung $\sim (z_f)^2$

Proton	uud	} Quantenzahlen durch 'Valenzquarks' gegeben
Neutron	udd	

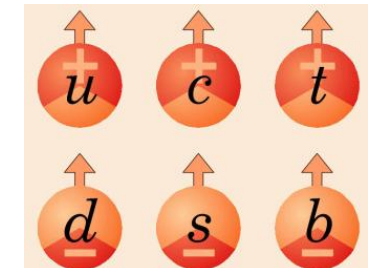


Nukleonen sind qqq Bindungszustände mit Spin $s = 1/2$

Ladung der Quarks $Q(\text{up}) = +2/3$, $Q(\text{down}) = -1/3$,

da Baryonen Δ^{++} (uuu) mit $Q = +2$, Δ^- (ddd) mit $Q = -1$

- $(+2/3)e$: $\begin{pmatrix} u_{(up)} \\ d_{(down)} \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} C(\text{charm}) \\ S(\text{strange}) \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} t_{(top)} \\ b_{(bottom)} \end{pmatrix}$



- die Quarks c , t , b sind so schwer, dass sie bei den erreichbaren Werten für Q^2 nur eine untergeordnete Rolle spielen & deshalb auch im Folgenden nicht weiter betrachtet werden müssen

das Parton-Modell

- Nukleonen sind aus verschiedenen Quarktypen f mit der elektrischen Ladung $z_f \cdot e$ aufgebaut, Wq. für elektromagnet. Streuung $\sim (z_f)^2$

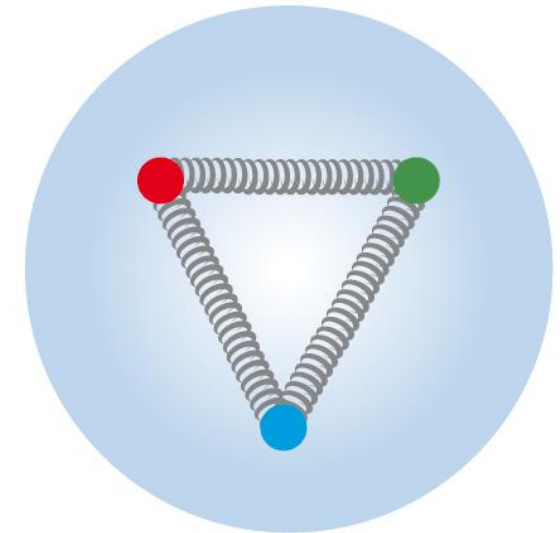
Proton

uud

Neutron

udd

Quantenzahlen durch
‘Valenzquarks’ gegeben



Nukleonen sind qqq Bindungszustände mit Spin $s = 1/2$

Ladung der Quarks $Q(\text{up}) = +2/3$, $Q(\text{down}) = -1/3$,

da Baryonen Δ^{++} (uuu) mit $Q = +2$, Δ^- (ddd) mit $Q = -1$

- für die 3 Valenzquarks des Nukleons gelten folgende Summenregeln:

$$\sum_{i=1}^3 z_f^2 = \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 = 1$$

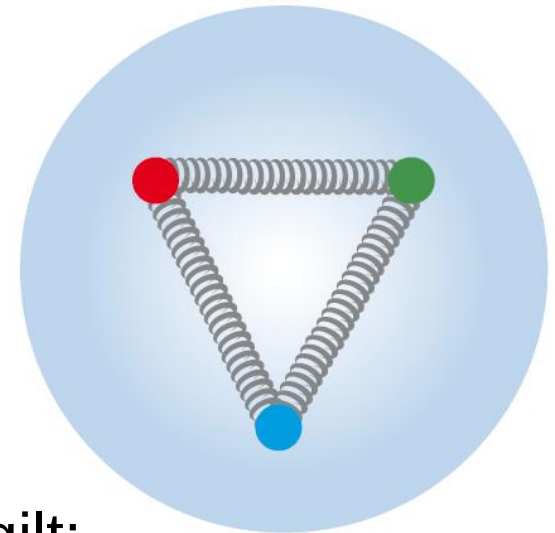
für das Proton

$$\sum_{i=1}^3 z_f^2 = \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{2}{3}$$

für das Neutron

das Parton-Modell

- Nukleonen sind aus verschiedenen Quarktypen f mit der elektrischen Ladung $z_f \cdot e$ aufgebaut, Wq. für elektromagnet. Streuung $\sim (z_f)^2$
- die einzelne **Valenz-Quarks** tragen jeweils einen Impulsanteil x
Impuls-Verteilungsfunktion $f(x)$:
Zahl der Quarks mit Flavour f im Impulsintervall $[x, x+dx]$
- für eine Verteilungsfunktion $f(x)$ eines geladenen Partons gilt:



$$\int_0^1 f(x) dx = 1$$

Normierungsbedingung

$$\int_0^1 x \cdot f(x) dx = \frac{a}{N}$$

bei N Partonen tragen diese einen Anteil a des Gesamt-Impulses des Nukleons

- **Strukturfunktion $F_2(x)$** beschreibt die 'elektrische' Streuung an den Ladungen der Partonen (geladene Quarks)

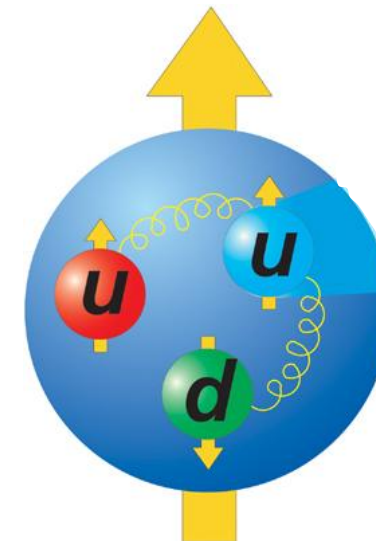
$$\int_0^1 \frac{F_2(x)}{x} dx = \sum_{i=1}^3 z_f^2$$

= 1 für das Proton
= 2/3 für das Neutron

$$\int_0^1 F_2(x) dx = \frac{a}{N} \cdot \sum_{i=1}^3 z_f^2$$

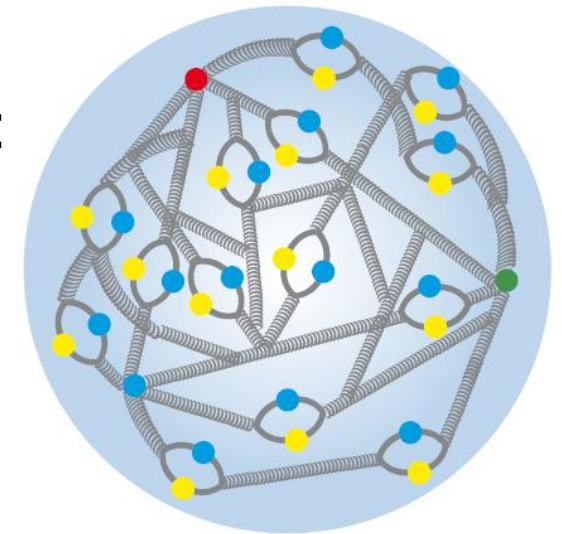
mit $N = 3$ (Quarkmodell von M. Gell-Mann):
Proton: $\int = 1/3$ und Neutron $\int = 2/9$
d.h. falls nur 3 geladene Quarks existieren

- die experimentellen Beobachtungen liegen ca. um einen Faktor 0.5 unter den Erwartungen, falls nur geladene Quarks den Impuls tragen: **geladene Partonen tragen nur ca. 50% des Nukleonen-Impulses**



das erweiterte Parton-Modell

- das erweiterte Partonenmodell berücksichtigt das Vorhandensein von
 - neutralen Teilchen, die nicht an Photonen koppeln: Gluonen
 - eines Sees aus virtuellen Quark-Antiquark Paarenbeide Komponenten können zur Streuung beitragen
einzelne Quarkflavours werden mit unterschiedlichen Verteilungen vorkommen
- die einzelne **Valenz-Quarks** tragen jeweils einen Impulsanteil x
Impuls-Verteilungsfunktion $q_f(x)$:
Zahl der Quarks mit Flavour f im Impulsintervall $[x, x+dx]$
- zahlreiche **See-Quarks** (virtuelle Quark-Antiquark Paare):
Impuls-Verteilungsfunktion $\bar{q}_f(x)$:
Zahl der Anti-Quarks mit f im Impulsintervall $[x, x+dx]$
- zahlreiche neutrale Konstituenten: **Gluonen**
Impuls-Verteilungsfunktion $g(x)$

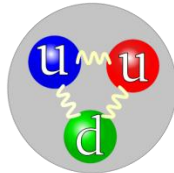


Strukturfunktionen im Parton-Modell

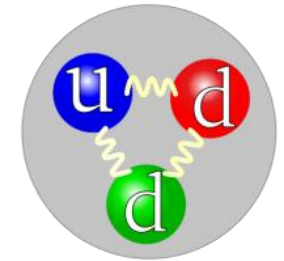
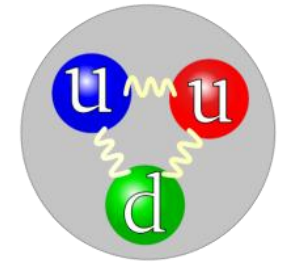
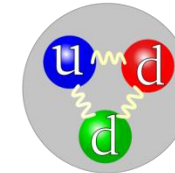
- **Isospinsymmetrie**: Proton und Neutron können durch Vertauschen von u- und d-Quark ineinander übergeführt werden, $\Rightarrow$ Normierungsrelationen:

$$q_{up}^n = q_{down}^p \quad q_{up}^p = q_{down}^n \quad q_{strange}^p = q_{strange}^n$$

Proton (uud)



Neutron (udd)



$$\begin{aligned} \int (q_{up} - \bar{q}_{up}) dx &= 2 \\ \int (q_{down} - \bar{q}_{down}) dx &= 1 \\ \int (q_{strange} - \bar{q}_{strange}) dx &= 0 \end{aligned}$$

2 up Quarks, 1 down Quark

$$\begin{aligned} \int (q_{up} - \bar{q}_{up}) dx &= 1 \\ \int (q_{down} - \bar{q}_{down}) dx &= 2 \\ \int (q_{strange} - \bar{q}_{strange}) dx &= 0 \end{aligned}$$

1 up Quark, 2 down Quarks

- Verteilungen der Valenzquarks q_v (q_{up} , q_{down}) und Verteilungen der Seequarks q_s :
 - Verteilungen der Antiquarks entsprechen denen der Seequarks

Strukturfunktionen im Parton-Modell

- Strukturfunktion $F_2(x)$: Summe der mit x und $(z_f)^2$ gewichteten Impuls-Verteilungen (pro Nukleon)
nochmals: bei der ep Streuung wechselwirken die Elektronen mit der Ladungsverteilung der Nukleonen (bzw. dem magnetischen Moment)

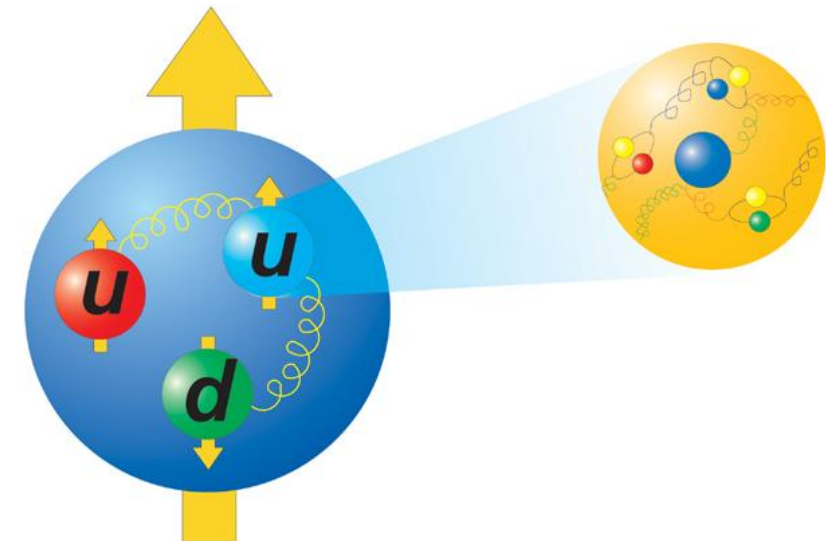
$$F_2(x) = x \cdot \sum_f z_f^2 \cdot [q_f(x) + \bar{q}_f(x)]$$

$q_f(x)$: Quark-Impulsverteilung

$\bar{q}_f(x)$: Antiquark-Impulsverteilung

f : Quarkflavours (u,d,s)

Berücksichtigung der Existenz von
virtuellen Seequarks (Quark-Antiquark-Paare)
wichtig: **s-Quarks & alle Anti-Quarks kommen
nur als See-Quarks im Nukleon vor**



- Strukturfunktionen von Proton und Neutron mit $u^n(x) = d^p(x)$:

$$F_2^{ep}(x) = x \cdot \frac{4}{9} [u^p(x) + \bar{u}^p(x)] + \frac{1}{9} [d^p(x) + \bar{d}^p(x) + s(x) + \bar{s}(x)]$$

$$F_2^{en}(x) = x \cdot \frac{4}{9} [u^n(x) + \bar{u}^n(x)] + \frac{1}{9} [d^n(x) + \bar{d}^n(x) + s(x) + \bar{s}(x)]$$

- für die **gemittelte $F_2(x)$ Strukturfunktion des Nukleons** erhält man:

$$F_2^{eN}(x) = \frac{1}{2} \cdot [F_2^{ep}(x) + F_2^{en}(x)] \quad \sim 0, \text{ nur Seequarks}$$

Valenz- & Seequarks

$$= x \cdot \left\{ \frac{5}{18} [u(x) + \bar{u}(x) + d(x) + \bar{d}(x)] + \frac{1}{9} [s(x) + \bar{s}(x)] \right\}$$



mittlere quadrat. Ladung der up- und down-Quarks: **5/18**
 ↳ **drittelzahlige Quark-Ladungen**

Strukturfunktionen im Parton-Modell

- Vergleich der Nukleon-Strukturfunktionen in eN und ν N Streuung:

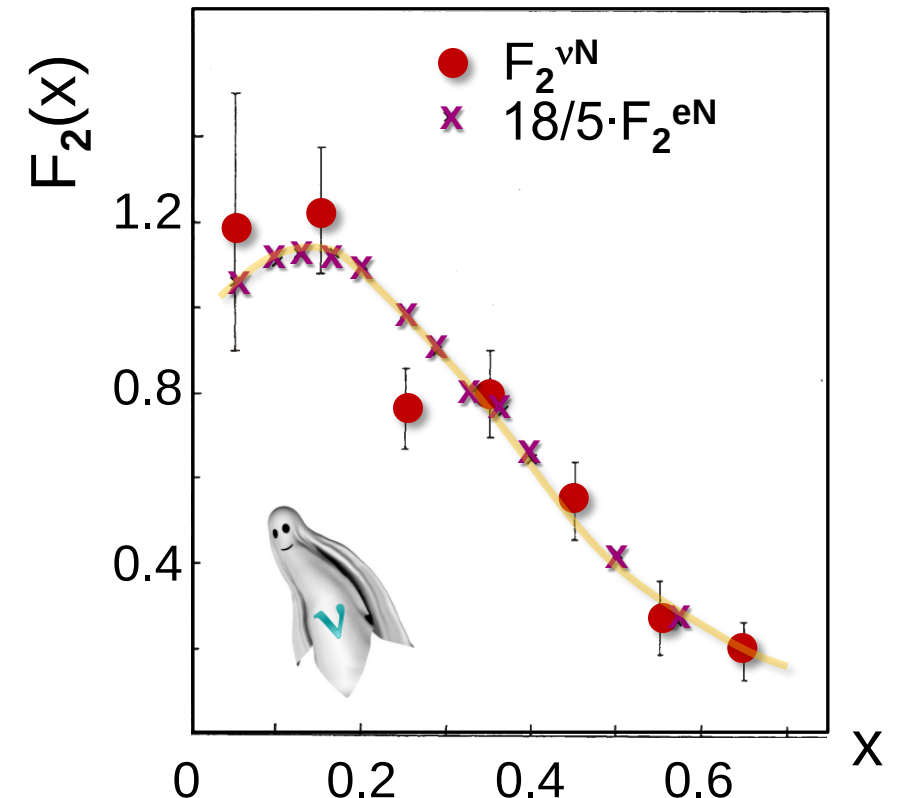
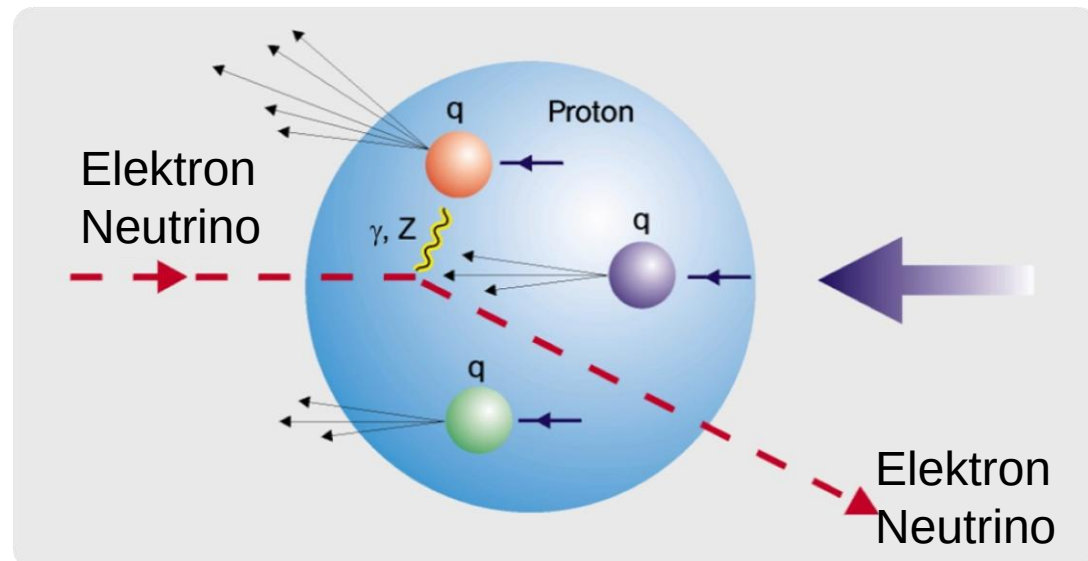
$$F_2^{\nu, N}(x) = x \cdot \sum_f \left[q_f(x) + \bar{q}_f(x) \right]$$

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

Neutrinos (ν 's) 'sehen' nicht die elektrische Ladung q_f

identische Strukturfunktionen

Quark-Ladungen für up: +2/3, down -1/3



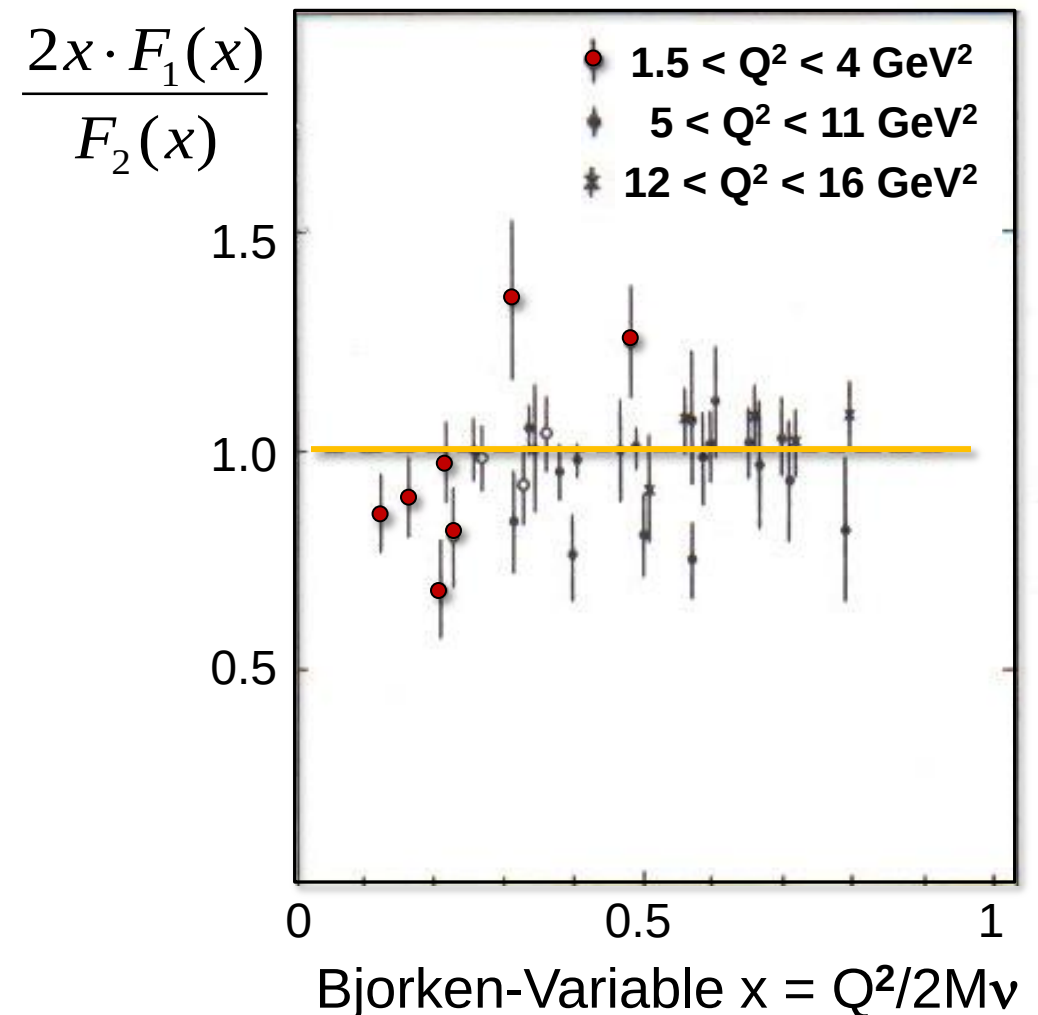
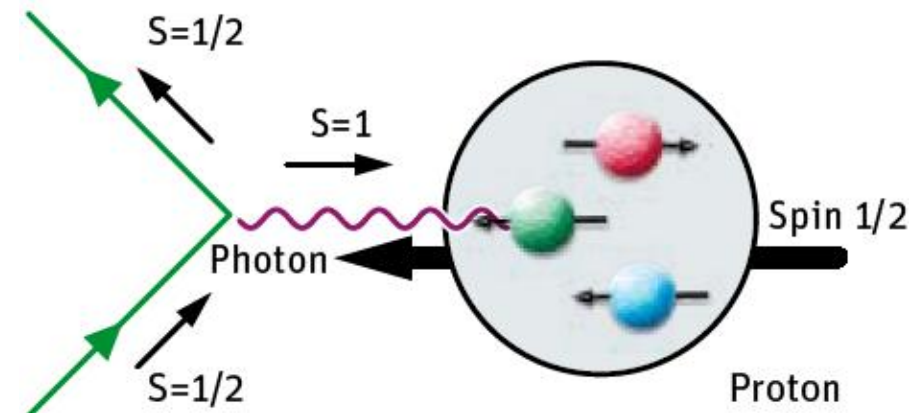
Callan-Gross Relation

- die Streuung des Elektrons erfolgt an punktförmigen **Spin $\frac{1}{2}$ Teilchen**, durch Vergleich des Wq. mit $F_1(x)$ & $F_2(x)$ mit dem spinabhängigen Mott-Wq. erhält man folgende Relation:

$$F_2(x) = 2x \cdot F_1(x) \quad \text{Callan-Gross Relation}$$

- die Strukturfunktion F_1 entsteht durch magnetische Wechselwirkung, für Spin-0 Teilchen wäre $F_1(x) = 0$
- die Callan-Gross Relation ist für das Nukleon gut erfüllt ✓

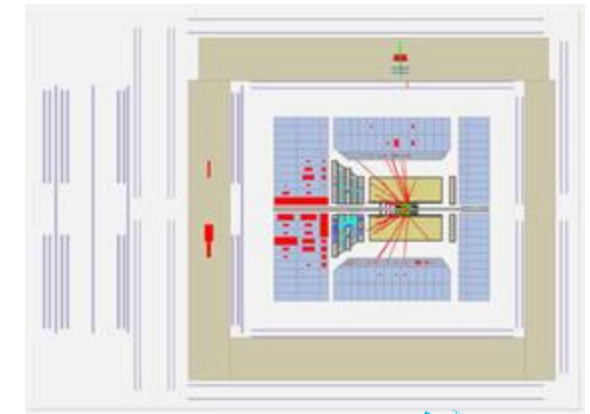
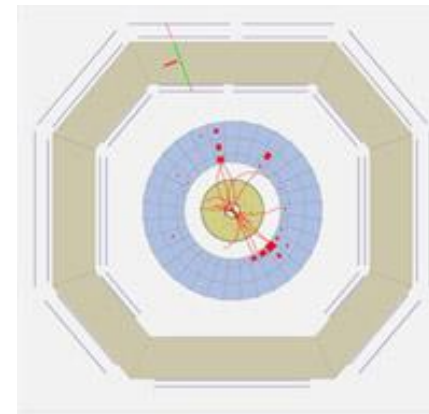
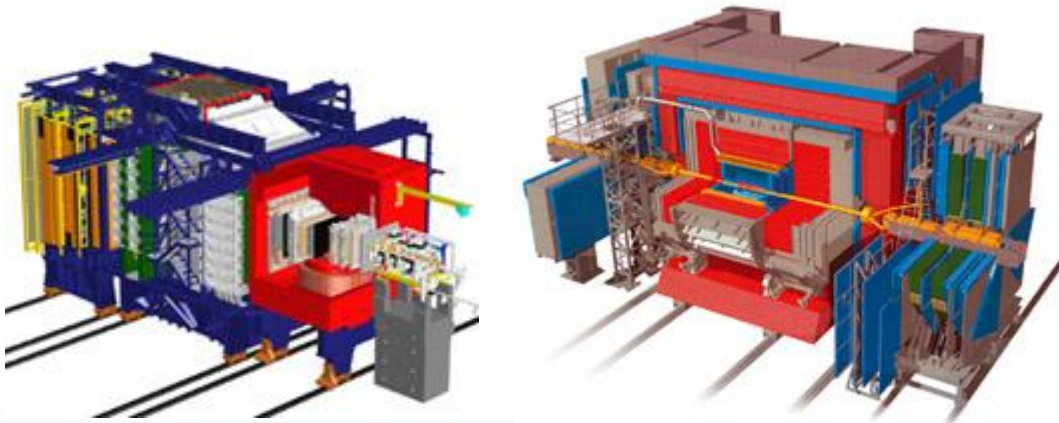
inelastische Streuung an punktförmigen Konstituenten mit Spin $s = \frac{1}{2}$



Messung der Strukturfunktionen

- - Strukturfunktionen von Proton und Neutron wurden an zahlreichen Orten gemessen (z.B. am DESY mit $E_{\text{proton}} = 800 \text{ GeV}$, $E_{\text{elektron}} = 30 \text{ GeV}$)
- da keine freien Neutronentargets existieren, benutzt man für Neutronen leichte Kerne (z.B. Deuterium) als Targets

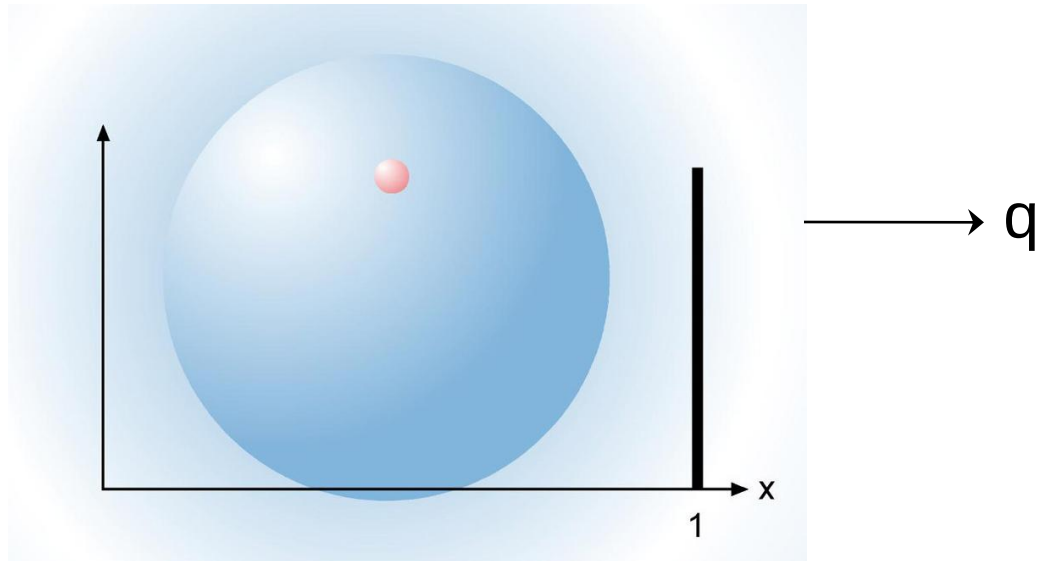
Signaturen in Detektoren



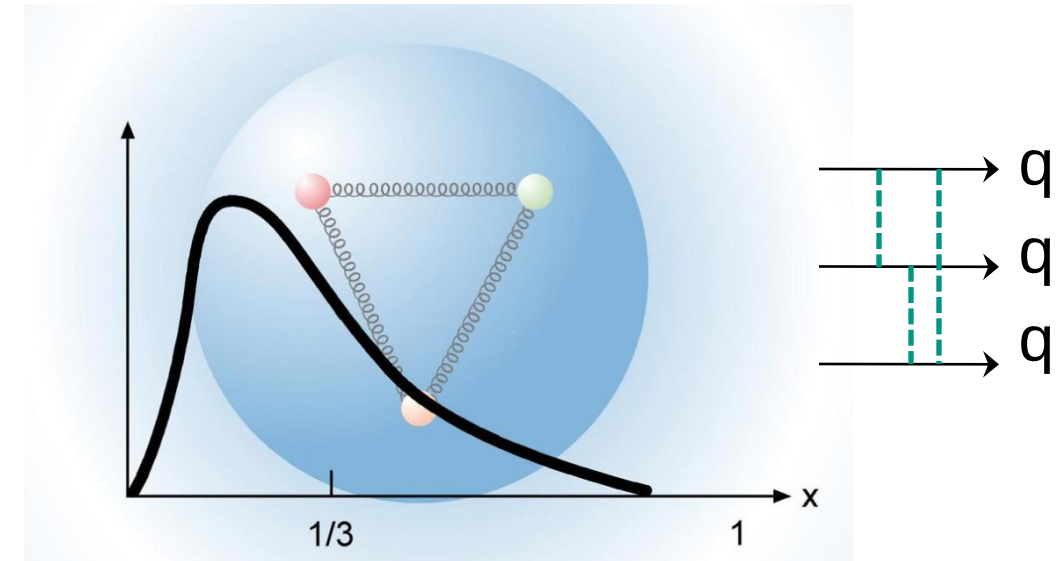
HERA-Beschleuniger



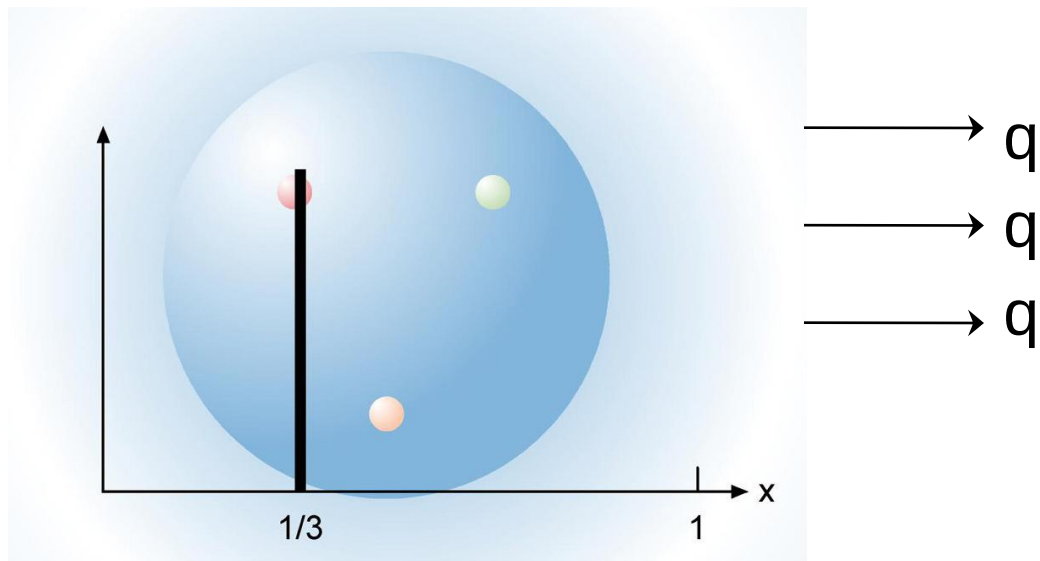
Partonverteilungen (PDFs)



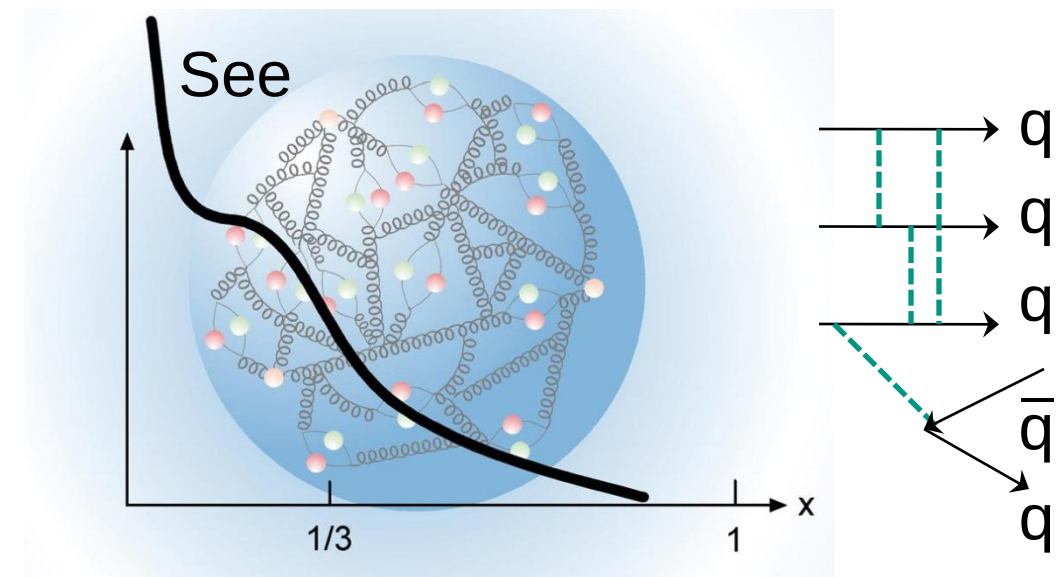
$x = 1$ für nur 1 Konstituentenquark



x mit Gluonen ($\Sigma \sim \frac{1}{2}$ des Impulses)



$x = \frac{1}{3}$ für 3 unabhängige Quarks



kleine x : Gluonen, Quarks & Antiquarks

Partonverteilungen - Nukleonimpuls

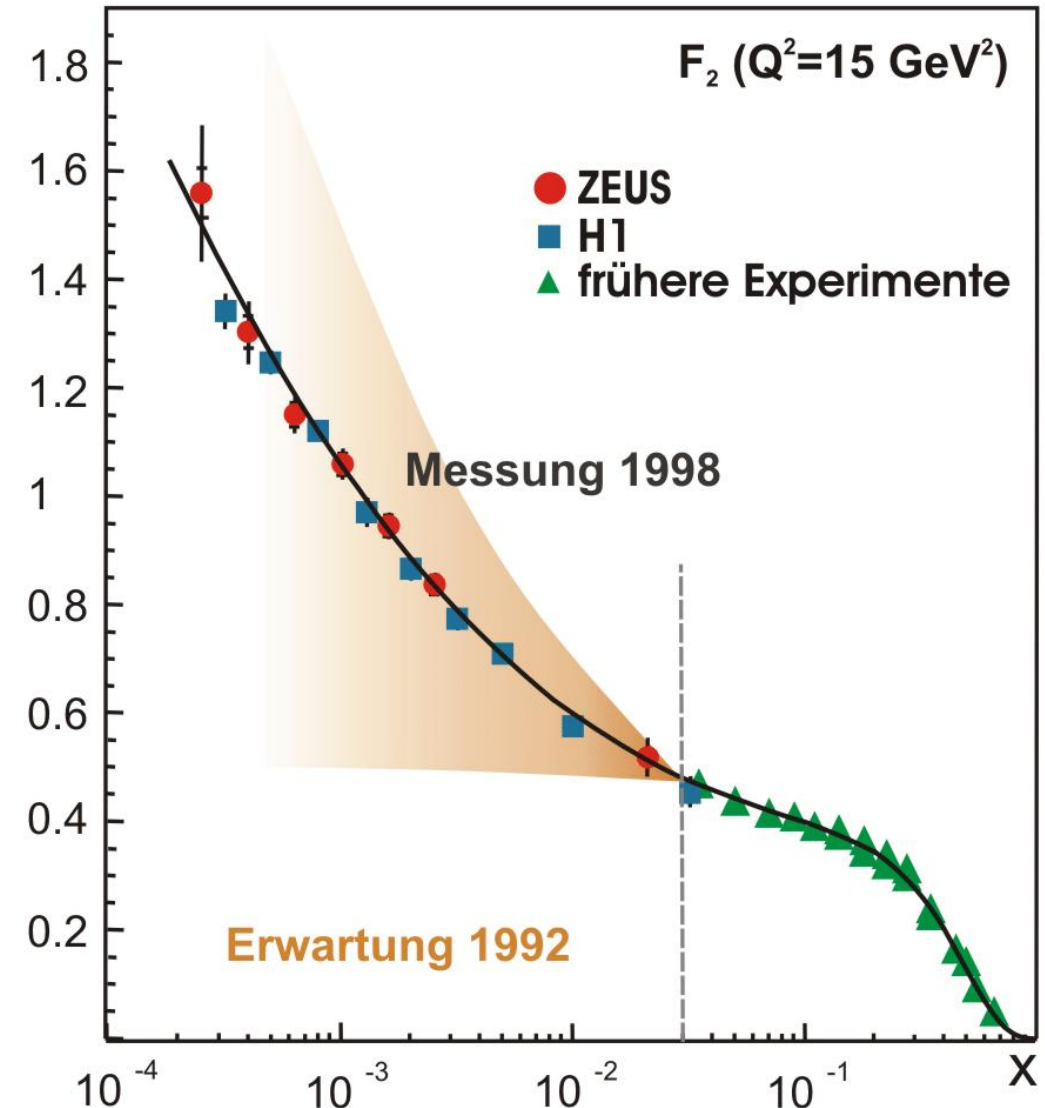
- bei der Integration über alle mit den Verteilungsfunktionen gewichteten Quarkimpulsen sollte gelten:

$$\int_0^1 F_2^{\nu, N}(x) \cdot dx \equiv 1$$

- experimentelle Beobachtung:

$$\int_0^1 F_2^{\nu, N}(x) dx \approx \frac{18}{5} \int_0^1 F_2^{e, N}(x) dx \approx 0,5$$

Quarks tragen nur ~ die Hälfte des Impulses, die andere Hälfte des Impulses kommt von den **Gluonen** (d.h. Teilchen die keine elektromagnet. bzw. schwache Ww. ausüben)



Partonverteilungen - Nukleonimpuls

- bei der Integration über alle mit den Verteilungsfunktionen gewichteten Quarkimpulsen sollte gelten:

$$\int_0^1 F_2^{\nu, N}(x) \cdot dx \equiv 1$$

- experimentelle Beobachtung:

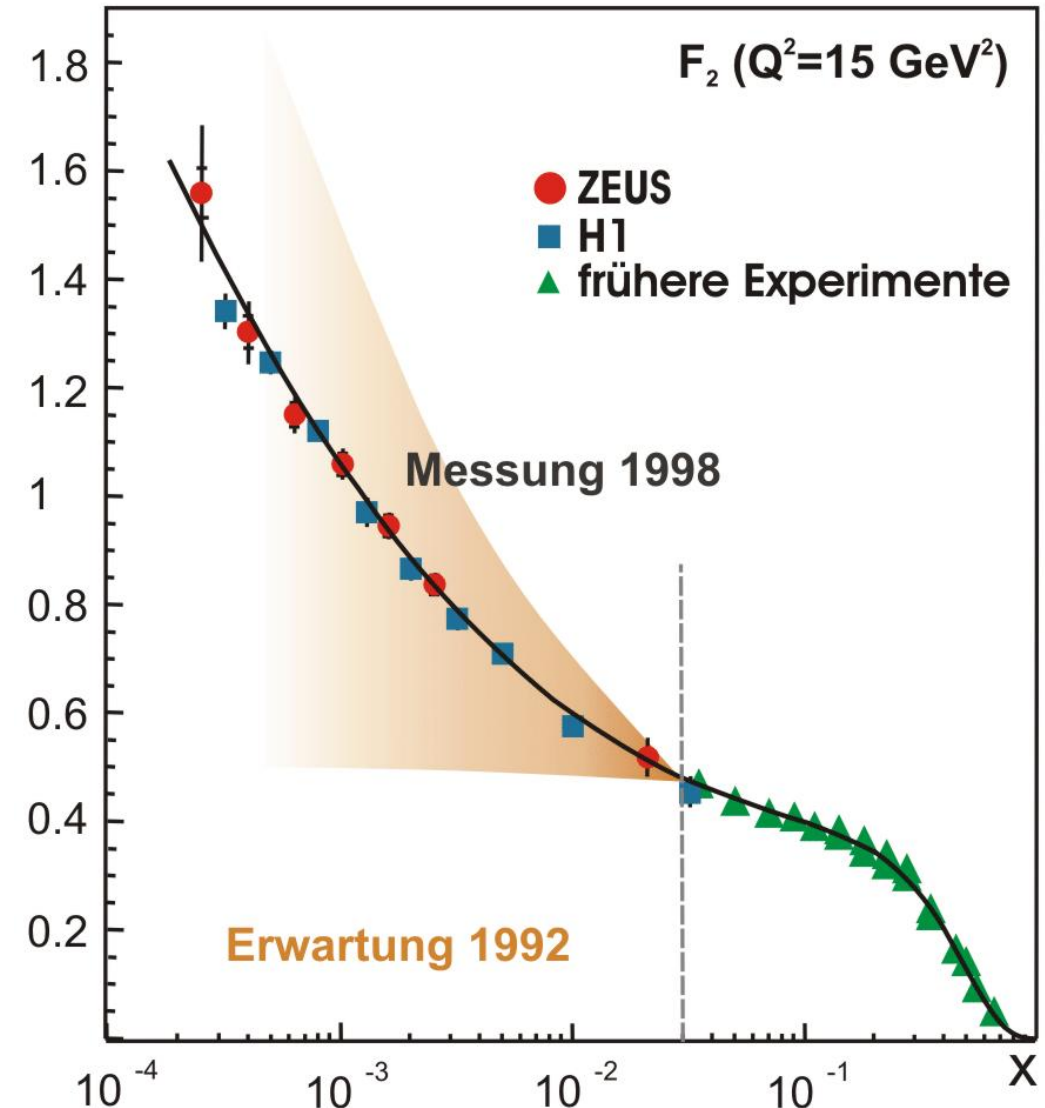
$$\int_0^1 F_2^{\nu, N}(x) dx \approx \frac{18}{5} \int_0^1 F_2^{e, N}(x) dx \approx 0,5$$

$$\int_0^1 x \cdot d(x) dx \approx 0.18$$

down-Quarks

$$\int_0^1 x \cdot u(x) dx \approx 0.36$$

up-Quarks



Partonverteilungen - Nukleonaufbau

- Strukturfunktionen zeigen bei hohem Q^2 einen deutlichen Effekt der See-Quarks: zahlreiche Quarks mit extrem kleinem Impulsanteil x

- **große x :**

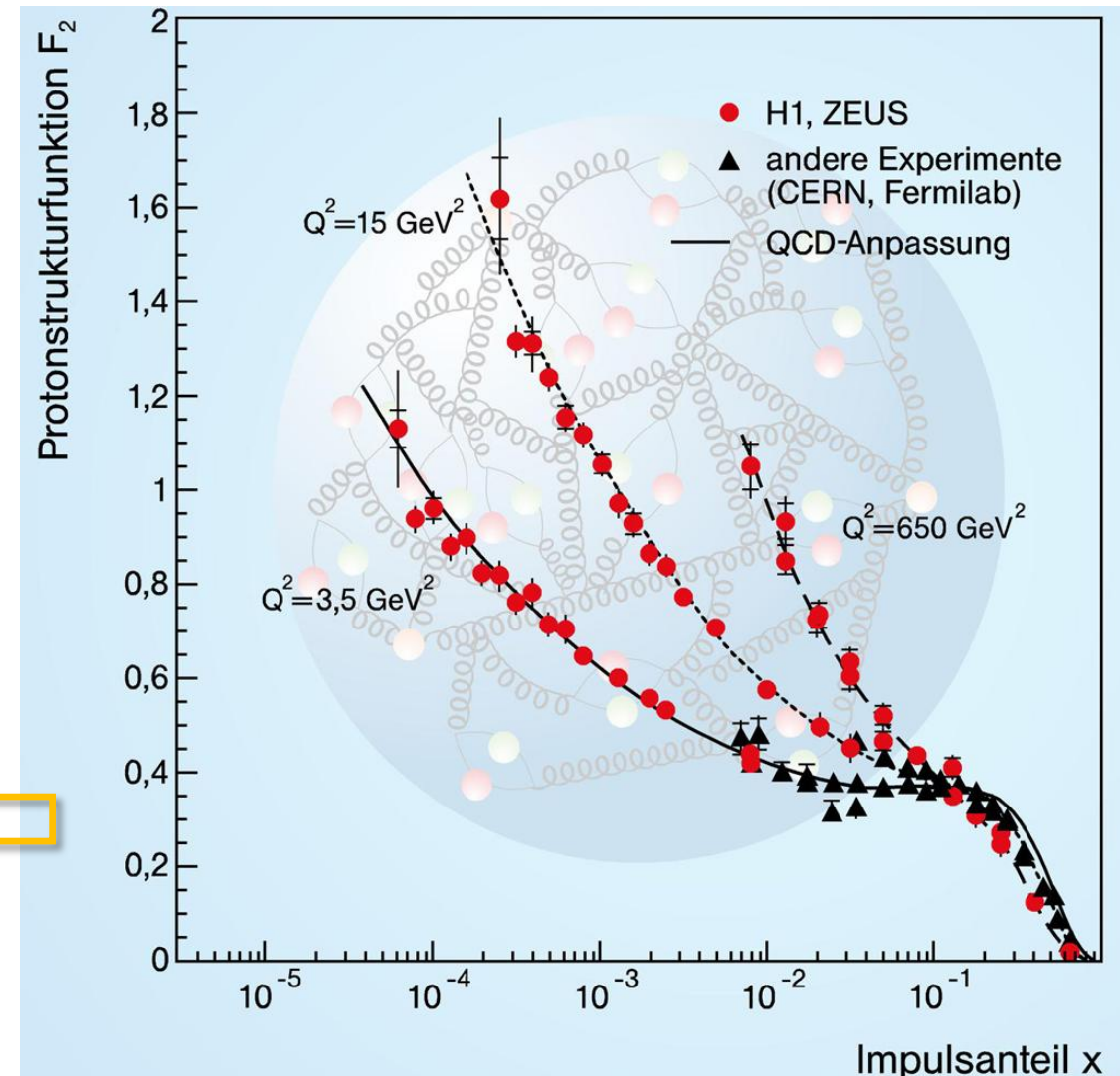
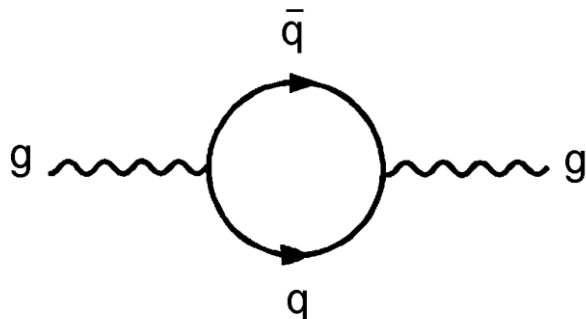
Hauptbeitrag durch Valenzquarks

- kleine x :**

Hauptbeitrag durch Gluonen
und durch die von ihnen erzeugten
Seequarks (Abstrahlung)

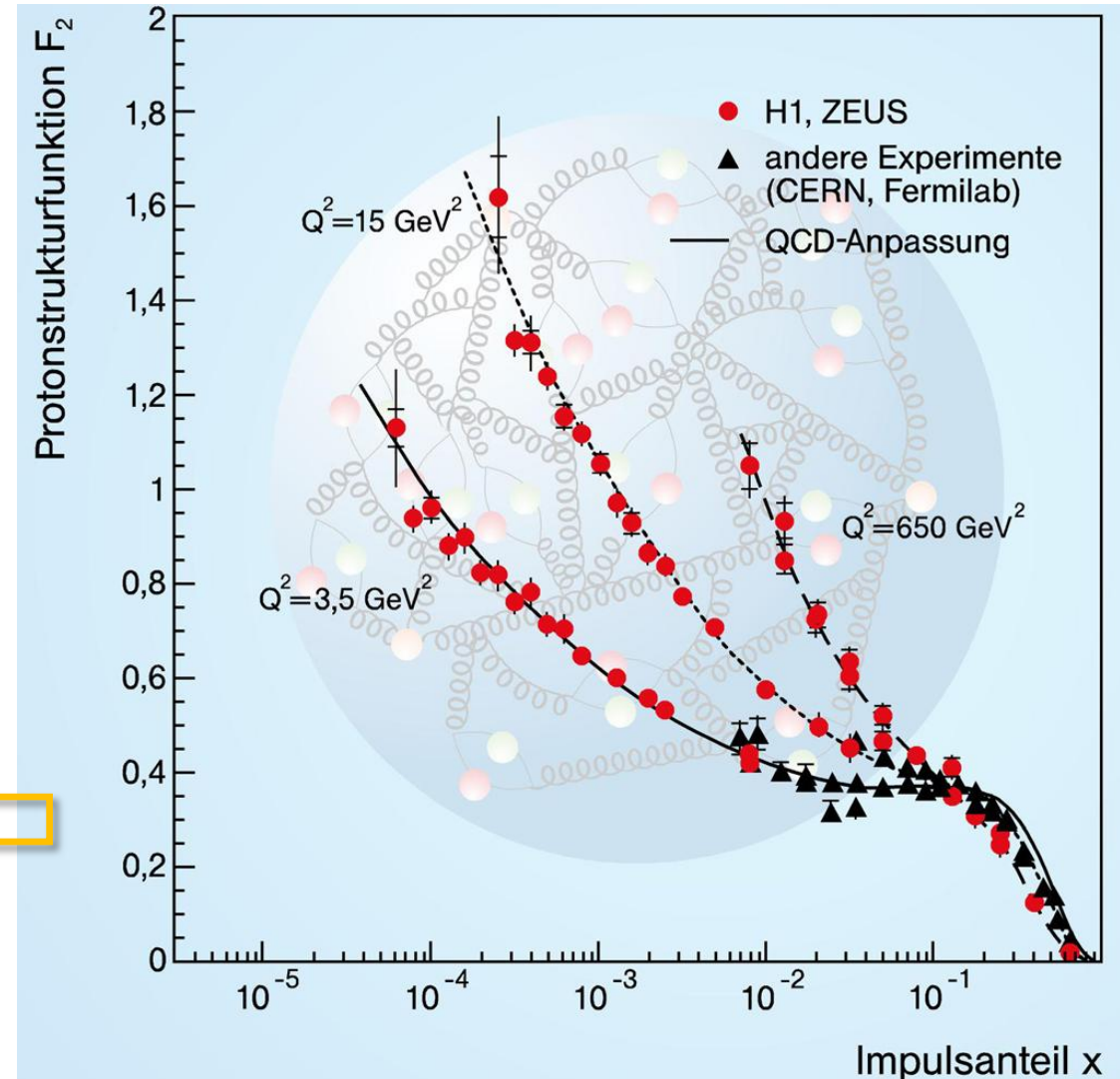
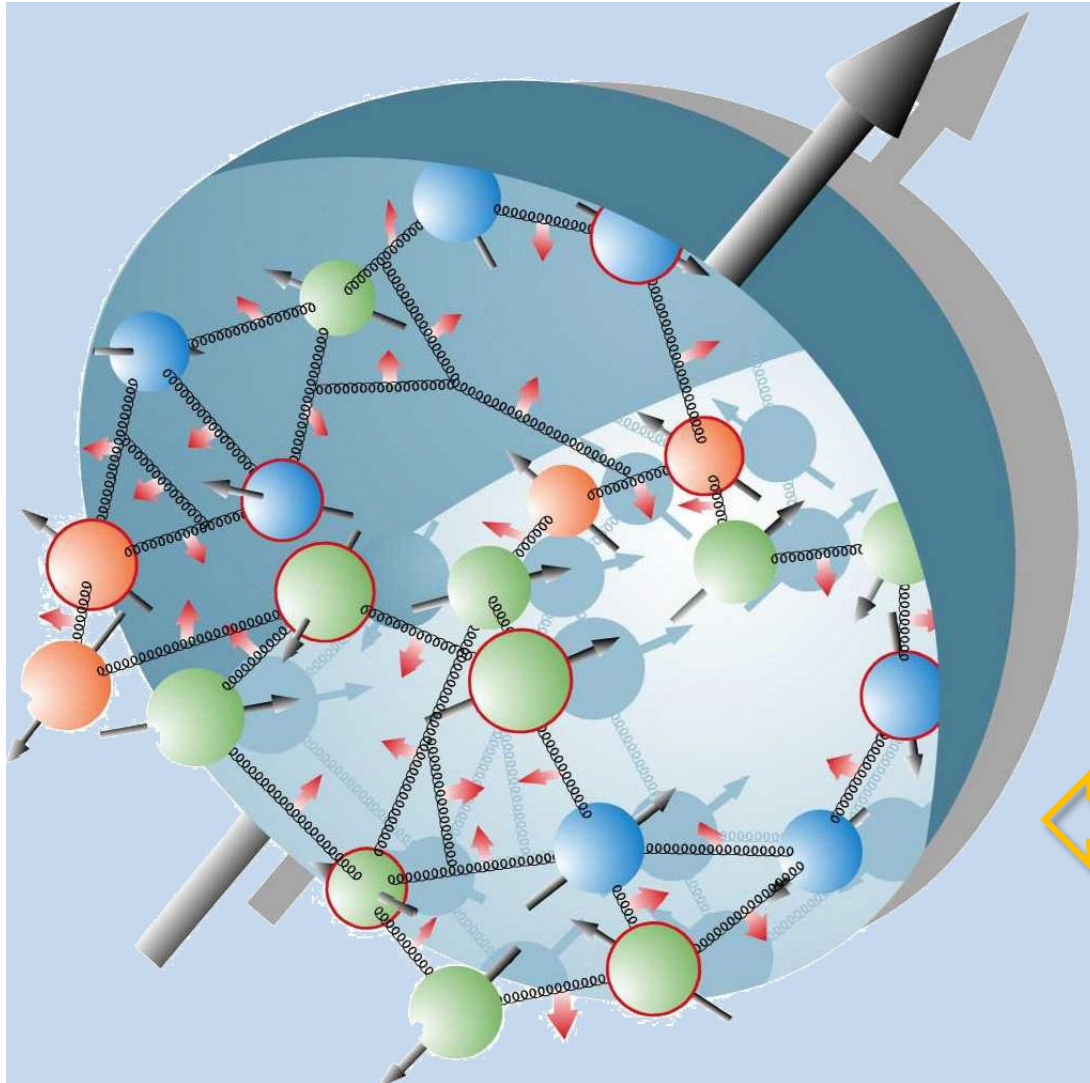
**führt zu einem steilen Anstieg
der PDF bei kleinem x**

- Seequarks durch Gluonen:



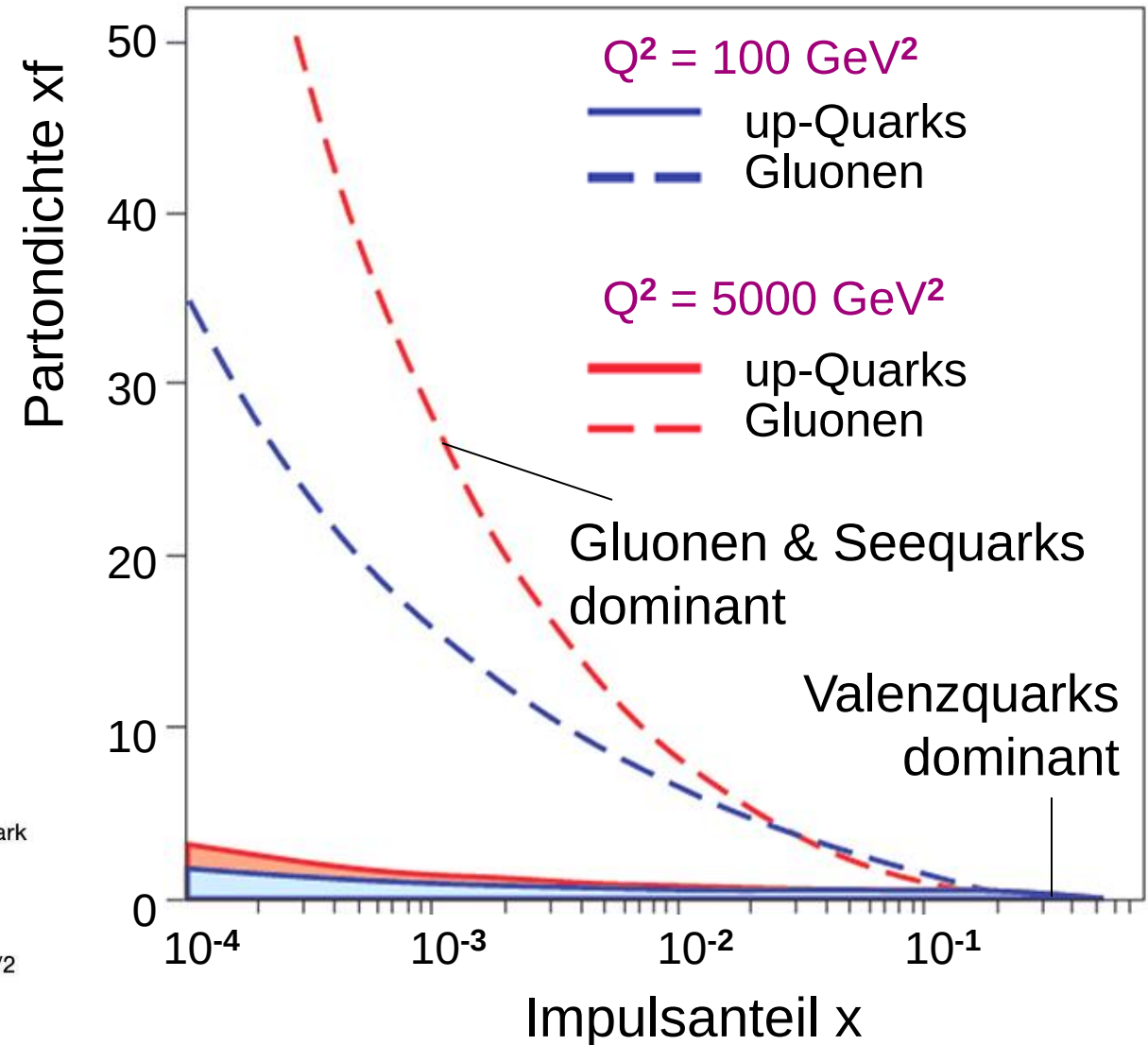
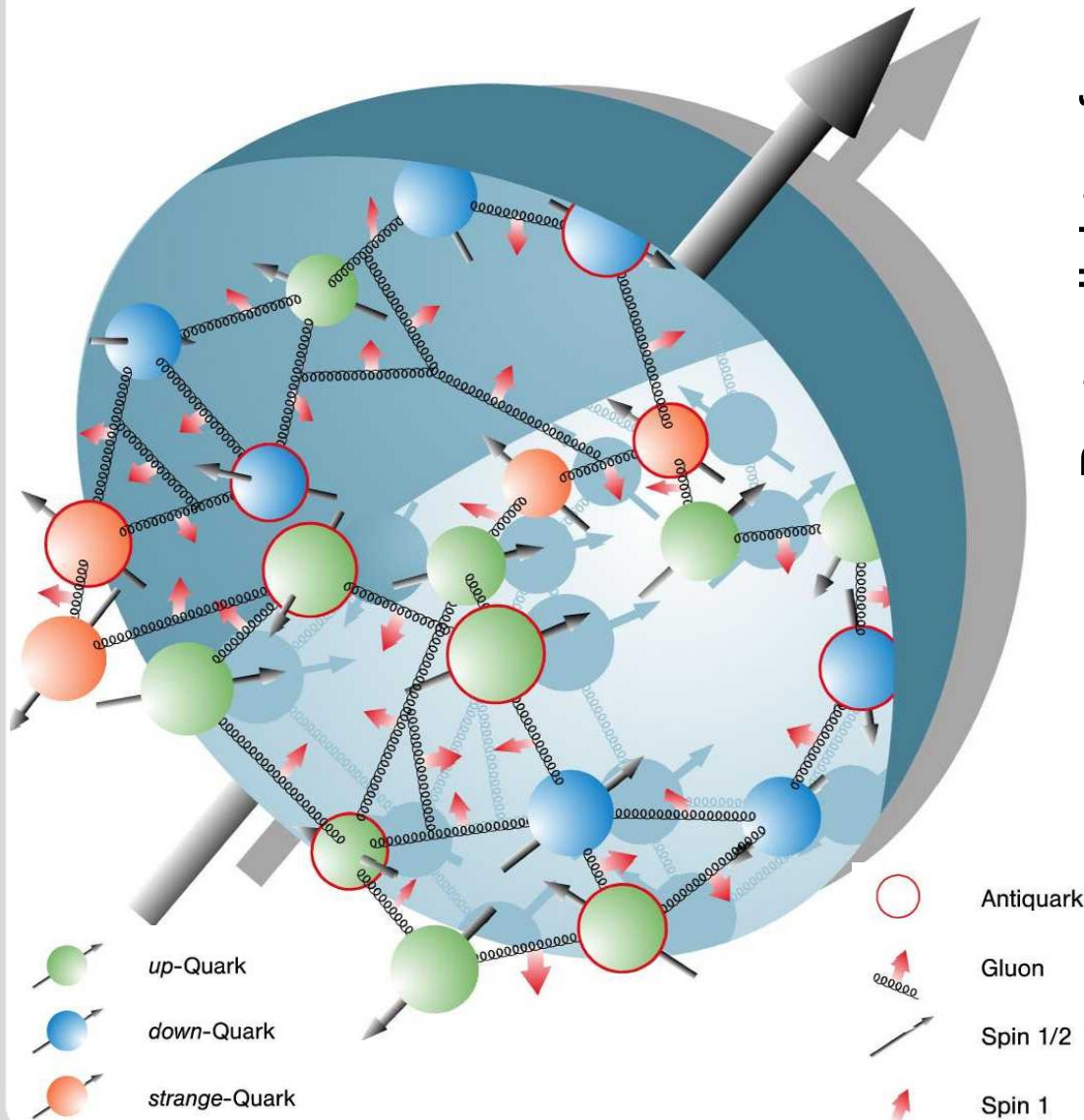
Partonverteilungen - Nukleonaufbau

- Strukturfunktionen zeigen bei hohem Q^2 einen deutlichen Effekt der See-Quarks: zahlreiche Quarks mit extrem kleinem Impulsanteil x

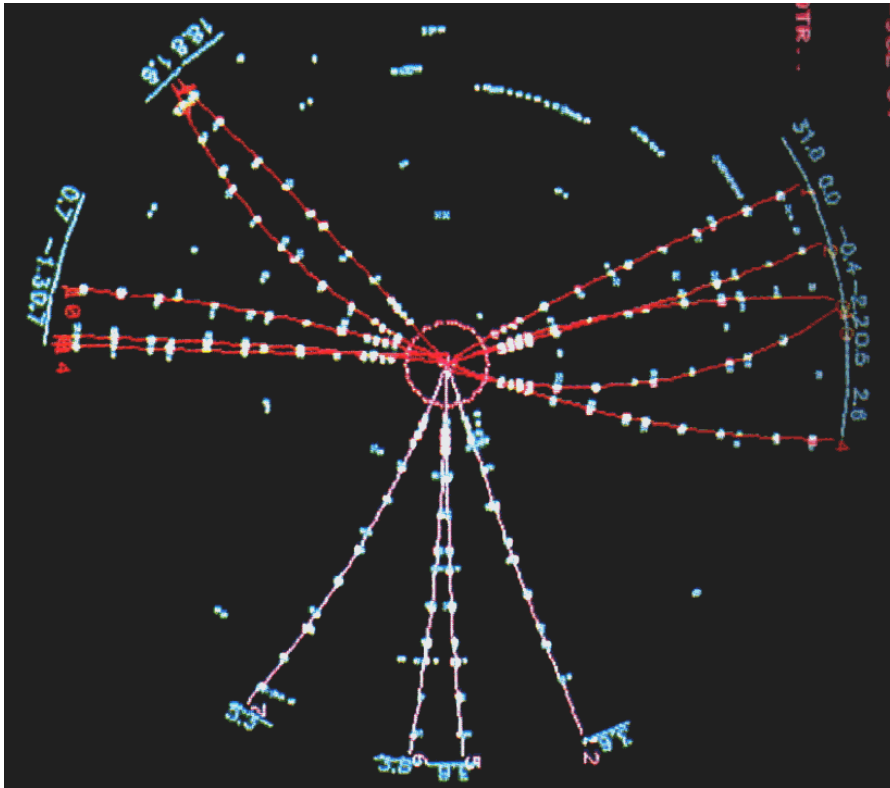


Partonverteilungen - Nukleonaufbau

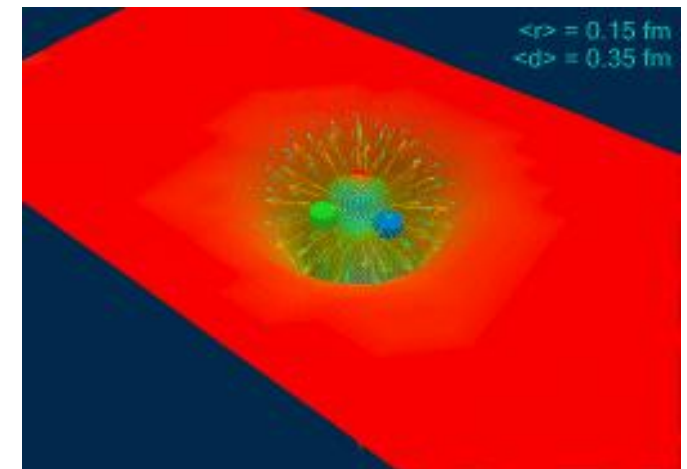
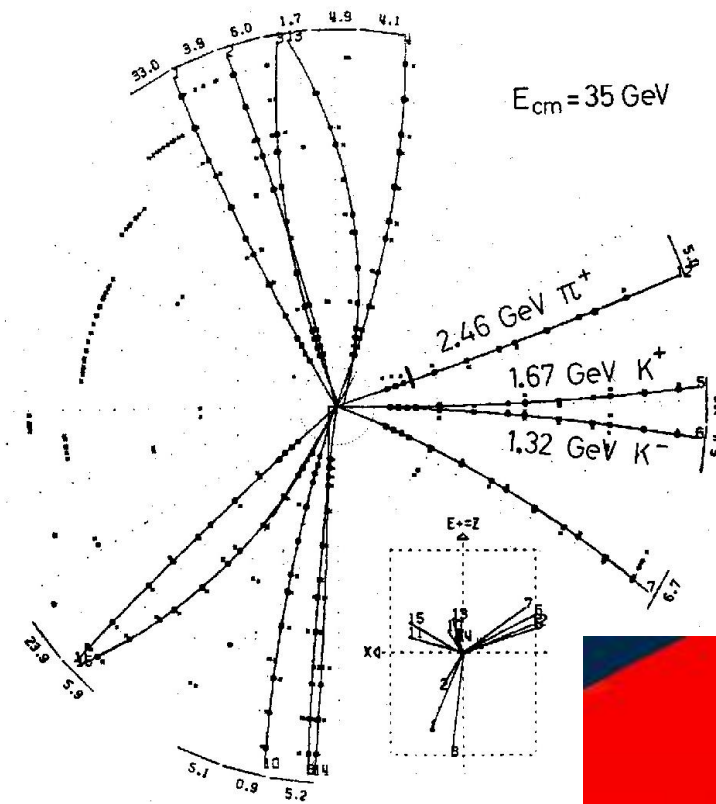
■ Partondichte-Verteilungen (**pdf** – **p**arton **d**ensity **f**unction)



- **Gluonen** spielen eine wichtige Rolle im Aufbau des Nukleons, sie tragen $\sim 50\%$ des Impulses



Gluonen wurden zuerst am
DESY nachgewiesen (1979):
3-Jet events bei PETRA



Nukleonaufbau: woher kommt M_N ?



$\Omega_{\text{baryonisch}}$

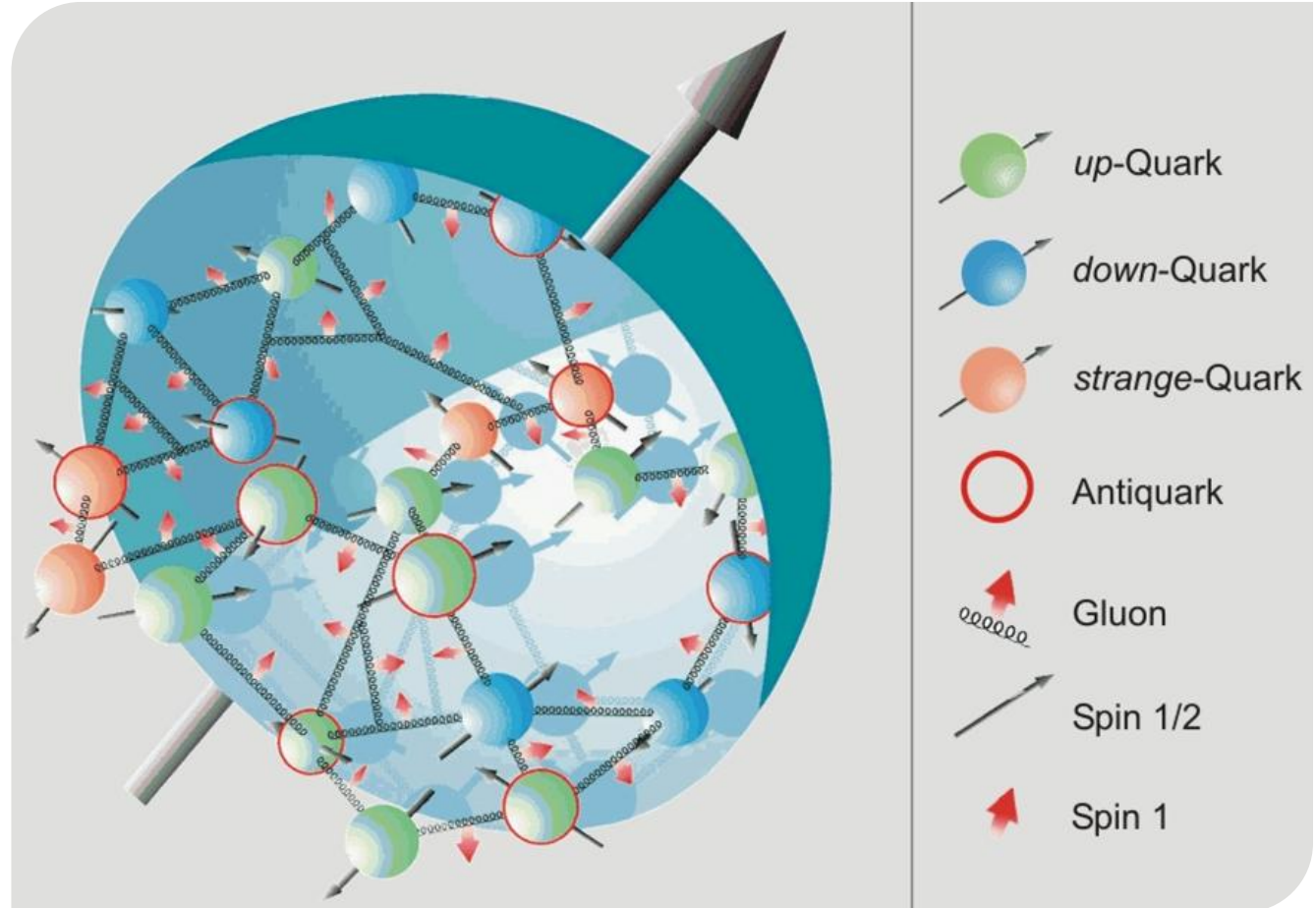
Masse der Nukleonen p,n

Masse des Protons (uud)

Proton	938.27 MeV
up-Quark	$\sim 1.5\text{-}3$ MeV
down-Quark	$\sim 3\text{-}7$ MeV

Masse des Protons (QCD)

Proton	~ 940 MeV
Quarks - Energie	~ 270 MeV
Quarks - Masse	~ 160 MeV
Gluonen - Energie	~ 320 MeV
Anomalie-Term	~ 190 MeV



2008: baryonische Masse resultiert zu $\sim 95\%$ durch QCD-Vakuum-Effekte