

# 8. Quarks, Gluonen, Hadronen

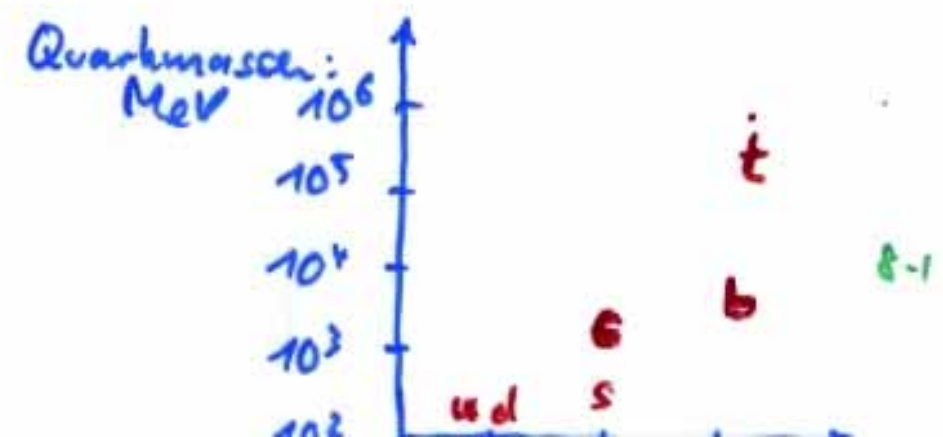
Nukleonen bestehen aus geladenen punktförmigen Teilchen mit Spin  $\frac{1}{2}$ .  
 Baue Eigenschaften der Nukleonen aus den Konstituenten auf: **QUARKS**

|             | u             | d              | p             | n              |
|-------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| Ladung $z$  | $\frac{2}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | 1             | 0              |
| Isospin $I$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$  | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$  |
| $I_3$       | $\frac{1}{2}$ | $-\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $-\frac{1}{2}$ |
| Spin $s$    | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$  | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$  |
|             | <u>uud</u>    |                | <u>udd</u>    |                |

$\Delta^{++}$  = uuu  
 $\Delta^+$  = uud  
 $\Delta^0$  = udd  
 $\Delta^-$  = ddd  
 ~~$\Delta^{--}$~~  existiert nicht  
 drittelzahlige Ladungen  
 kommt, aber noch  
 nicht eindeutig.  
 weitere Hinweise:

Spin  $\rightarrow$  erfordert mindestens 3 Quarks im Nukleon  
 Es gibt insgesamt 6 Quarks:

$z_f = +\frac{2}{3}$ : u c t  
 $z_f = -\frac{1}{3}$ : d s b



## Strukturfunktionen und Quarkladungen

$$F_2^{ep}(x) = x \cdot \left[ \frac{1}{9} (d_v^p + d_s + \bar{d}_s) + \frac{4}{9} (u_v^p + u_s + \bar{u}_s) + \frac{1}{9} (s_s + \bar{s}_s) \right]$$

$$F_2^{en}(x) = x \cdot \left[ \frac{1}{9} (d_v^n + d_s + \bar{d}_s) + \frac{4}{9} (u_v^n + u_s + \bar{u}_s) + \frac{1}{9} (s_s + \bar{s}_s) \right]$$

Isospin - Symmetrie:  $p \leftrightarrow n$  entspricht  $u \leftrightarrow d$  - Vertauschung

also:

$$u_v^p = d_v^n$$

$$d_v^p = u_v^n$$

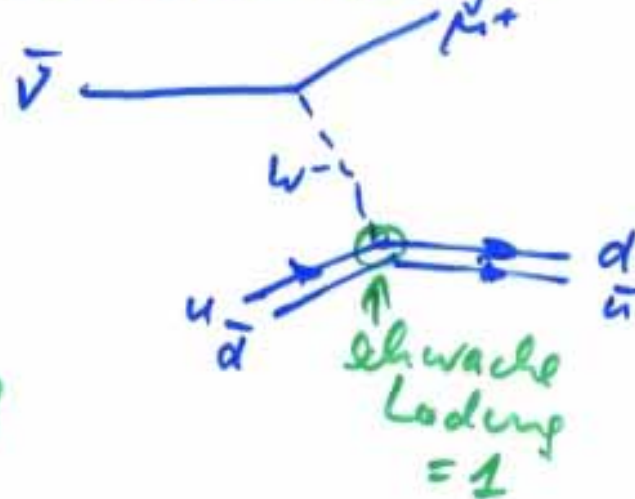
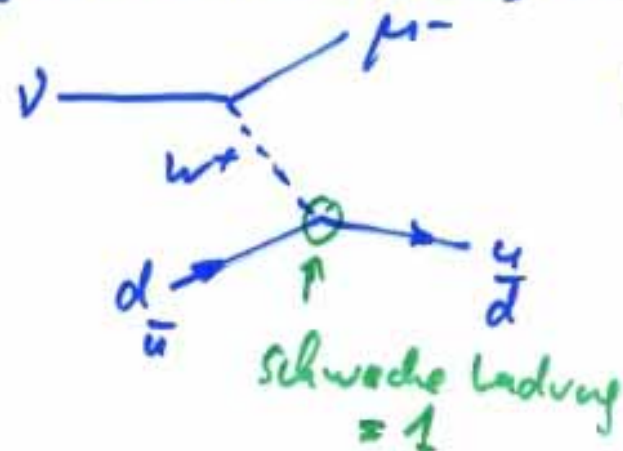
→

$$\begin{aligned} F_2^{eN}(x) &= \frac{1}{2} x \cdot \left[ \frac{1}{9} d_v^p + \frac{1}{9} d_s + \frac{1}{9} \bar{d}_s + \frac{4}{9} u_v^p + \frac{4}{9} u_s + \frac{4}{9} \bar{u}_s \right. \\ &= \frac{1}{2} (F_2^{ep} + F_2^{en}) \quad \left. + \frac{1}{9} u_v^p + \frac{1}{9} d_s + \frac{1}{9} \bar{d}_s + \frac{4}{9} d_v^p + \frac{4}{9} u_s + \frac{4}{9} \bar{u}_s + \frac{2}{9} (s_s + \bar{s}_s) \right] \\ &= \frac{1}{2} x \cdot \left[ \frac{1}{9} (d + \bar{d}) + \frac{4}{9} (u + \bar{u}) + \frac{1}{9} (u + \bar{u}) + \frac{4}{9} (u + \bar{u}) + \frac{2}{9} (s + \bar{s}) \right] \\ &= \frac{5}{18} x \cdot \left[ \underbrace{u + \bar{u} + d + \bar{d}}_{\text{Valenz + Sea-Quarks}} + \underbrace{\frac{1}{9} x (s + \bar{s})}_{\text{klein, nur Seaquarks}} \right] \end{aligned}$$

s-Quarks vernachlässigen  $\Rightarrow F_2^{eN}(x) = \boxed{\frac{5}{18}} \times \sum (q(x) + \bar{q}(x))$

$\uparrow = \langle e_f^2 \rangle \quad f = u, d$   
 $= \frac{1}{2} (e_u^2 + e_d^2) = \frac{1}{2} \left( \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(-\frac{1}{3}\right)^2 \right)$

vgl. Neutrino-Streuung + Antineutrino-Streuung:



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

$\Rightarrow$  siehe später  
Schwache WW

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

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

Seequarks:  $\langle x_s \rangle \approx 0.04$

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

d.h. weitere 50% des Nukleonimpulses wird von Teilchen getragen, die keine elektrische und ~~keine~~ keine schwache Ladung tragen.

$\Rightarrow$  Gluonen

Funktion

Bilde  $\frac{F_2^n}{F_2^p}$  und untersuche Grenzfälle:

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

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

$\Rightarrow$  Quarks spielen nicht alle die gleiche Rolle  
im Nukleon; das  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ , dass  $\begin{pmatrix} p \\ n \end{pmatrix}$   
unterscheidet, hat eine Sonderrolle (mehr Impuls)  
(noch nicht sehr gut verstanden)

# Quarks in Hadronen

Hadronen = stark wechselwirkende Teilchen

Baryonen

„schwere“

$q q q$

halbzahliger Spin

Fermionen

p, n leichteste Baryonen

Mesonen

„leichte“

$q \bar{q}$

ganzzahliger Spin

Bosonen

Experimenteller Befund:

Anzahl der Baryonen - Anzahl der Antibaryonen  
ist bei jeder Reaktion konstant

$$N_B - N_{\bar{B}} = \text{konstant}$$

Def. Baryonenzahl

$$B = \begin{cases} +1 & \text{für Baryonen} \\ +1/3 & \text{für } q \end{cases}$$

für Baryonen

$B = -1$  für Antibaryonen  
 $-1/3$  für  $\bar{q}$

Bsp: Protonenzerfall „verboten“

Protonenzerfall

$$\sum B = \text{konstant}$$

Leichteste Hadronen: Pionen = Mesonen mit  $m \approx 140 \text{ MeV}$

Isospin - Triplett ( $I=1$ ):  $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$

Zerfall nur in Leptonen oder Photonen möglich:

|         |                                                |                               |         |
|---------|------------------------------------------------|-------------------------------|---------|
| $\pi^+$ | $= u \bar{d}$                                  | $\rightarrow \mu^+ \nu$       | Schwach |
| $\pi^-$ | $= \bar{u} d$                                  | $\rightarrow \mu^- \bar{\nu}$ | Schwach |
| $\pi^0$ | $= \frac{1}{\sqrt{2}} (u \bar{u} - d \bar{d})$ | $\rightarrow \gamma \gamma$   | e.m.    |

↑  
Flavour - Wellenfunktion  
(Quark-Zusammensetzung)

Isoskalare Partner des  $\pi^0$ :  
ist ein anderes Teilchen  
(andere Masse, Lebensdauer, Zerfallsmoden etc)

$$\eta^8 = \frac{1}{\sqrt{2}} (u \bar{u} + d \bar{d})$$

Mesonen haben Baryonenzahl 0

$$B = \frac{1}{3} (\#q + \# \bar{q}) = 0$$

## Quark-Gluon-Wechselwirkung

- Betrachte Pauli-Prinzip für 3-Quark-Systeme, z.B.  $\Delta^{++}$ ,  $J^P = \frac{3}{2}^+$ ,  $m = 1235 \text{ MeV}$

Ortswellenfunktion  $\Rightarrow$  Grundzustand Bahndrehimpuls  $L=0 \Rightarrow$  leichtestes Baryon mit diesen Quantenzahlen  
symmetrisch

Spinwellenfunktion :  $\uparrow \uparrow \uparrow$  symmetrisch

Flavour-Wellenfunktion  $uuu$  symmetrisch

$\Rightarrow$  Gesamtwellenfunktion symmetrisch unter Austausch zweier Quarks? Aber  $J = 3/2$ : Verstoß gegen Pauli-Prinzip

- Betrachte WQ für Reaktion  $e^+e^- \rightarrow q_f \bar{q}_f$ , Vergleich mit  $f: u, d, s, c, \dots$  WQ ( $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ )

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \frac{\sum_f \sigma(e^+e^- \rightarrow q_f \bar{q}_f)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = n_c \sum_f z_f^2$$

außerhalb von Resonanzen alle Hadronen in  $\sum_f$  mitnehmen, die kinematisch erlaubt sind (nicht zu schwer sind)

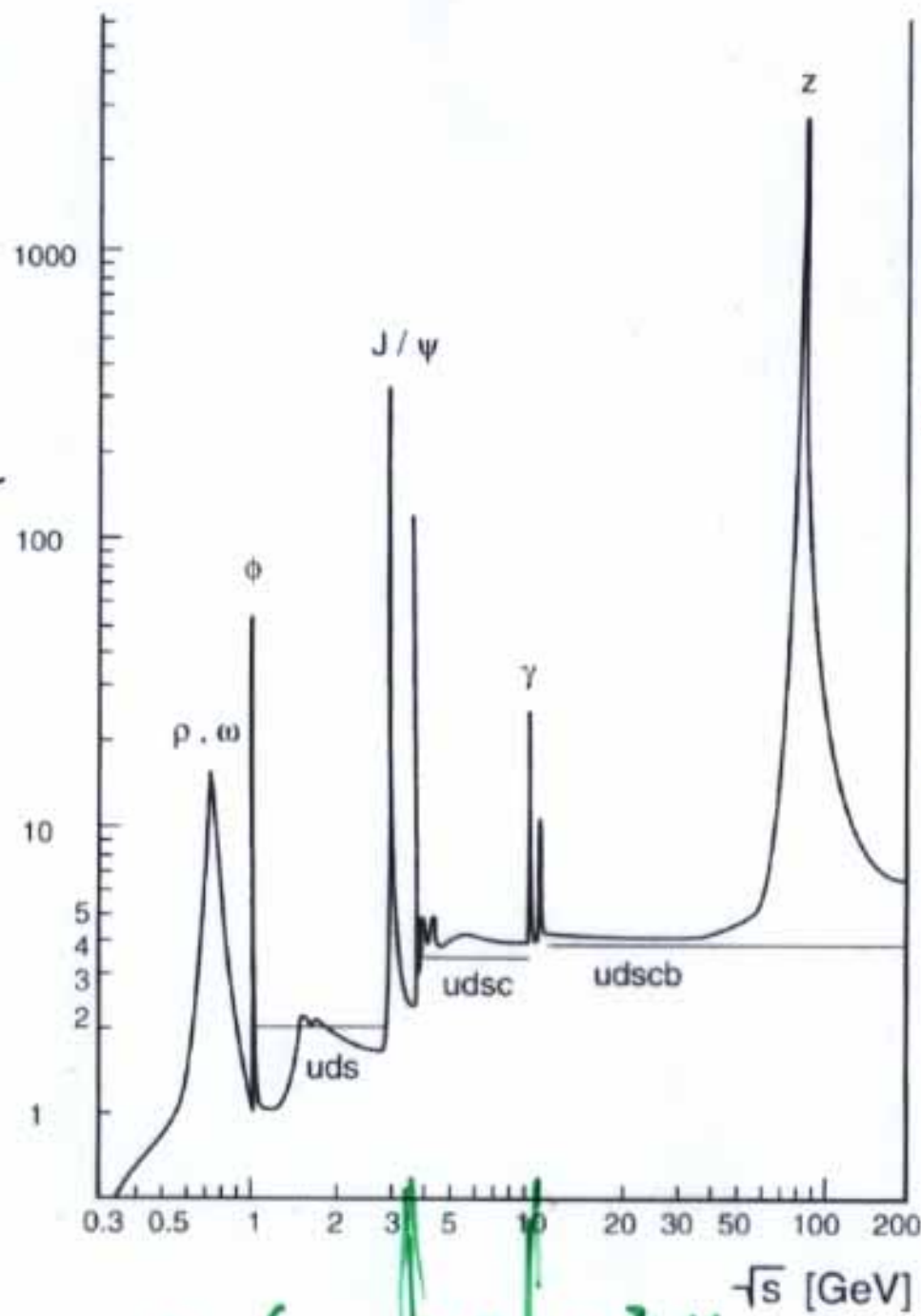
$\downarrow$   
exp:  $n_c = 3$

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} R$$

$$= n_c \cdot \sum_{f \in \text{FS}} z_f^2$$

Referenz für  
Streuung punkt-  
förmiger  
Teilchen

zugänglicher Bereich  
je nach Schwer-  
punktenergie



$e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen} =$   
inkohärente Summe  
von unterschiedlichen  
Endzuständen

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}, c\bar{c}, \bar{q}q, \bar{c}c$$

und Fragmentation  
(Hadronisation)

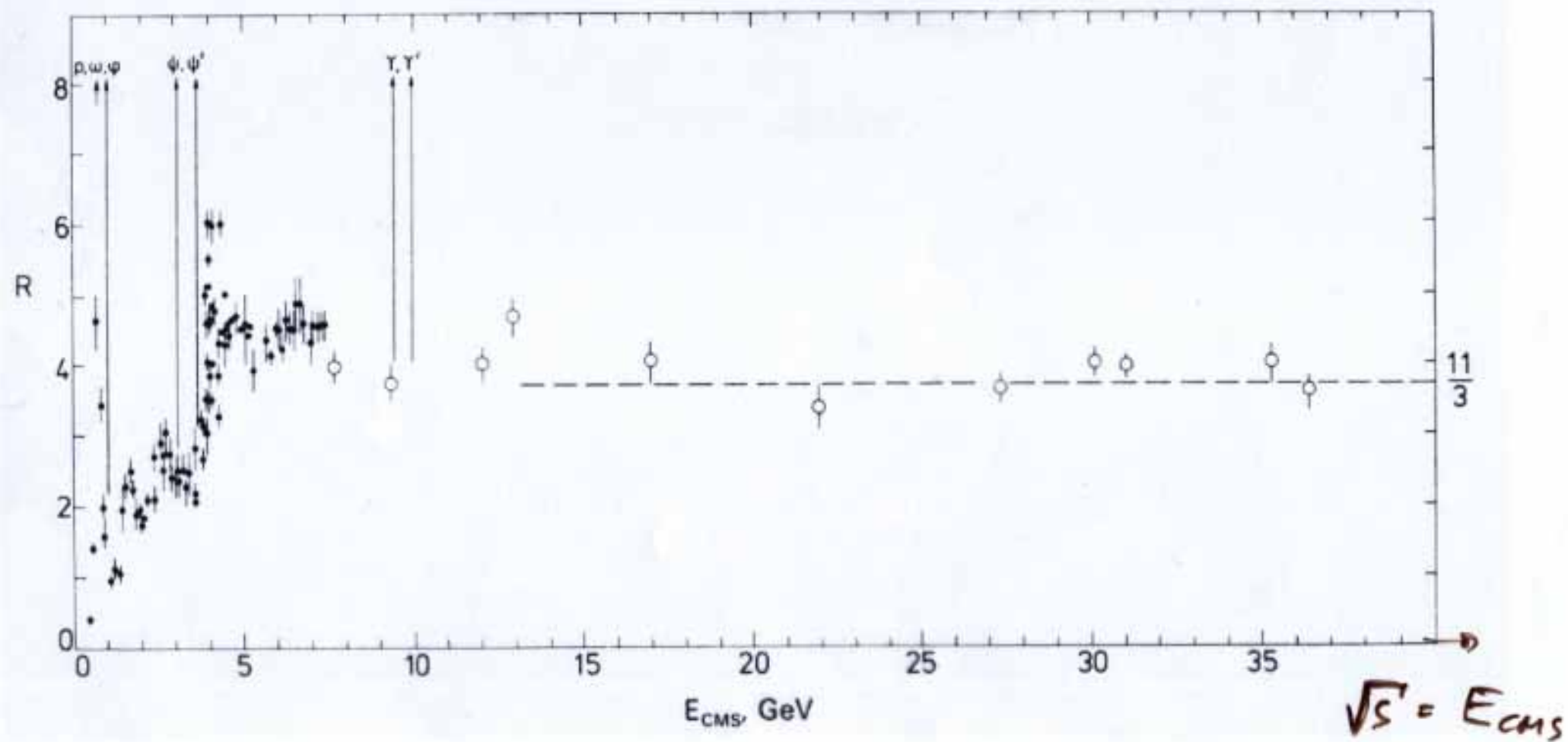
$q \rightarrow \text{Hadronen}$   
mit Wahrscheinlichkeit  
100%

Anzahl der  
Farben  
(N-colour)

$R = 3 \cdot \frac{6}{9} \quad 3 \cdot \frac{10}{9} \quad 3 \cdot \frac{11}{9}$

$\Rightarrow N_c = 3$

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = n_c \cdot \sum_{f(\sqrt{s})} z_f^2$$



Mit 3 farbigen Quarks kann eine antisymmetrische Wellenfunktion konstruiert werden:

r      g      b

Quarks tragen Farbe (Triplet  $\mathbf{3}$ )

Antiquarks tragen Antifarbe (Anti-Triplet  $\bar{\mathbf{3}}$ )

Alle beobachtbaren Hadronen sind farblos (Farb-Singletts)

Mesonen:  $\mathbf{3} \times \bar{\mathbf{3}} \rightarrow \mathbf{1} + \mathbf{8}$

Baryonen:  $\mathbf{3} \times \mathbf{3} \times \mathbf{3} \rightarrow \mathbf{1} + \mathbf{8} + \mathbf{8} + \mathbf{10}$

SU(3)-Gruppentheorie

8 Gluonen tragen Farbe und Antifarbe (colour-Octett  $\mathbf{8}$ )

z.B.

$r\bar{g}$ ,  $r\bar{b}$ ,  $g\bar{b}$ ,  $g\bar{r}$ ,  $b\bar{r}$ ,  $b\bar{g}$ ,  $\frac{r\bar{r}-g\bar{g}}{\sqrt{2}}$ ,  $\frac{r\bar{r}+g\bar{g}-2b\bar{b}}{\sqrt{6}}$

Können untereinander koppeln, weil sie selbst geladen sind.

Sonst analog zum Photon: masselos,  $J^P = 1^-$  (Vektorboson)

Wechselwirkungen zwischen Quarks und Gluonen:



Gluon-Abstrahlung vom Quark

$$q \rightarrow q g$$



Gluon-Aufspaltung

$$g \rightarrow q \bar{q}$$



Gluon-3-Gluon-Vertex

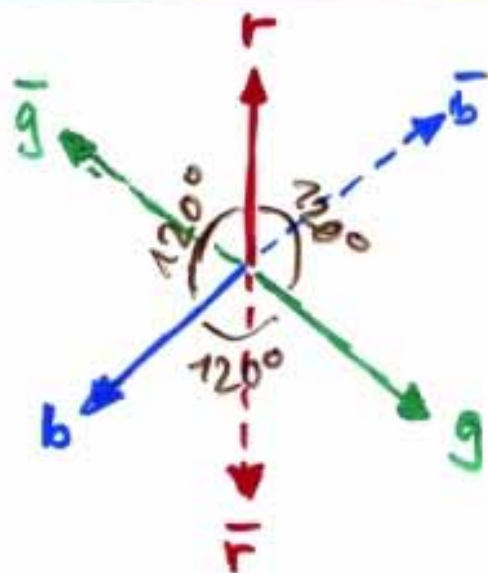
$$g \rightarrow g g$$



Gluon-Selbstkopplung 4-Gluon-Vertex

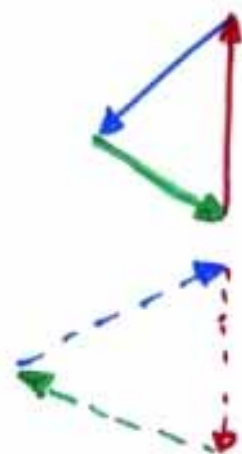
$$g g \rightarrow g g$$

Darstellung in 2D:  
(120°-Winkel)



farbloses Objekt:

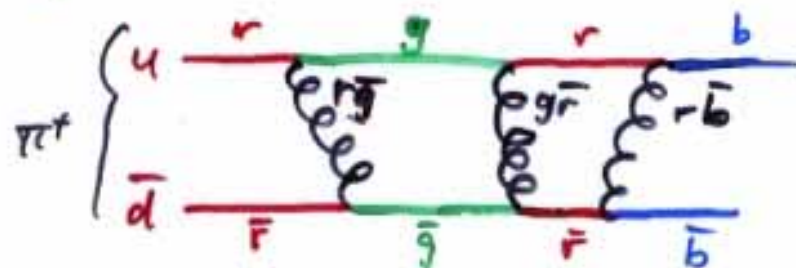
$$\text{Meson: } |\pi^+\rangle = \begin{cases} u_r \bar{d}_{\bar{r}} \\ u_g \bar{d}_{\bar{g}} \\ u_b \bar{d}_{\bar{b}} \end{cases}$$



Baryon

Anti-Baryon

$qq$   
 $qq\bar{q}$  } verboten, da nicht farbeneutral



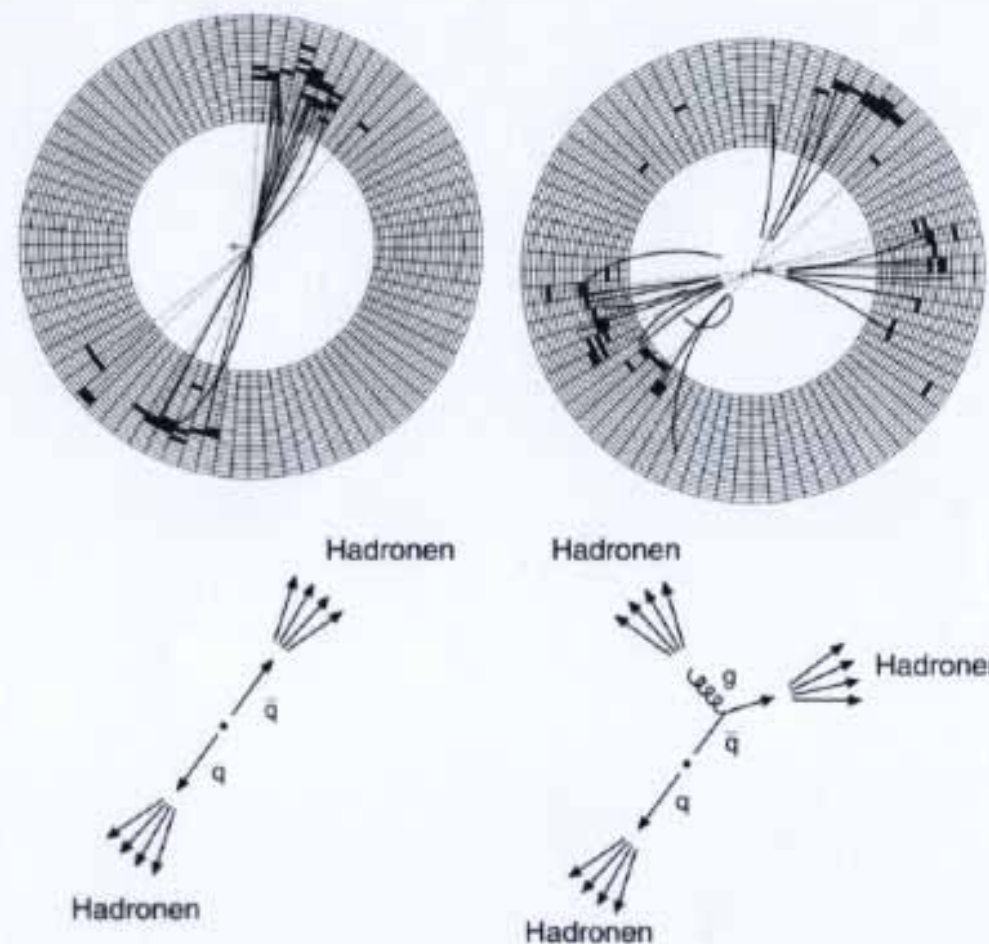
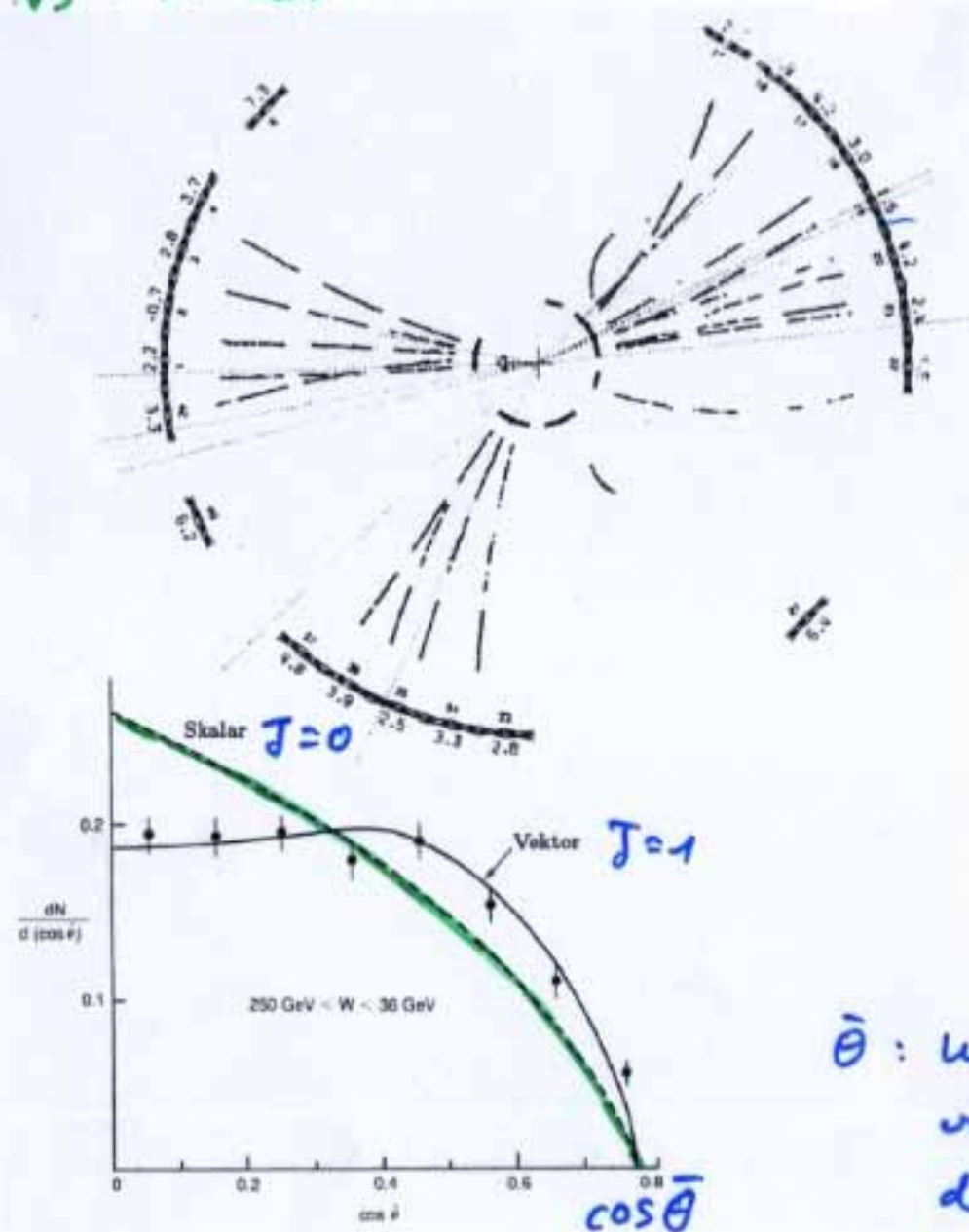
$\rightarrow c$

(aber  $gg$ ,  $q\bar{q}g$ ,  $qq\bar{q}\bar{q}$ ,  $qqqq\bar{q}$   
Gluonball Hybrid 4-Quark Pentaquark

können farbeneutral sein!)  
← exotisch: einige Kandidaten

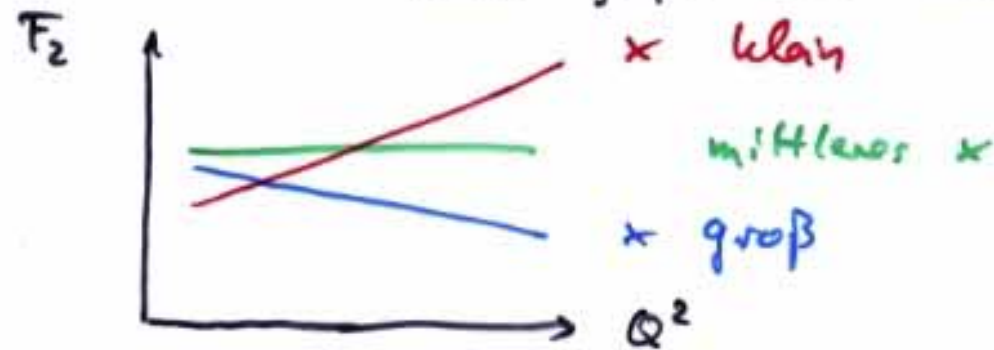
JADE bei PETRA  
 $\sqrt{s} = 31 \text{ GeV}$

2- und 3-Jet-Ereignisse



$\bar{\theta}$  : Winkel zwischen höchstenergetischem Jet  
 und Fluglinie der anderen beiden in  
 deren CMS :  
 Gluonen haben Spin 1

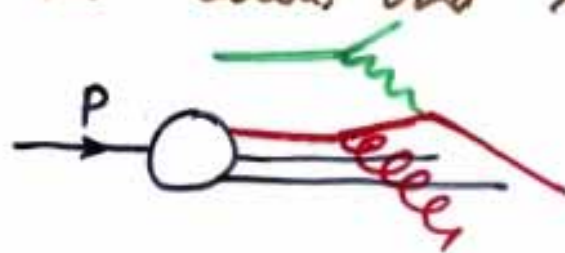
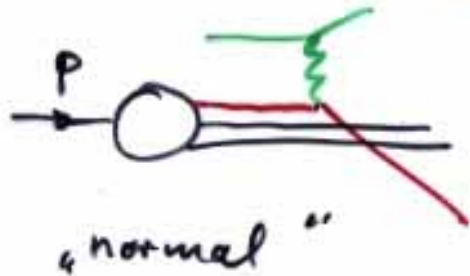
Skalenbrechung:  $F_2$  hängt bei hohen  $Q^2$  doch von  $Q^2$  ab  
(für große und kleine  $x$ )



↓  
doch endliche Ausdehnung?  
der Quarks

NEIN: Auflösung von  
virtuellen Substrukturen  
im Quarkverband

(ein Quark „besteht“ aus Quarks und Gluonen  
ein Gluon „besteht“ aus Quarks und Antiquarks)



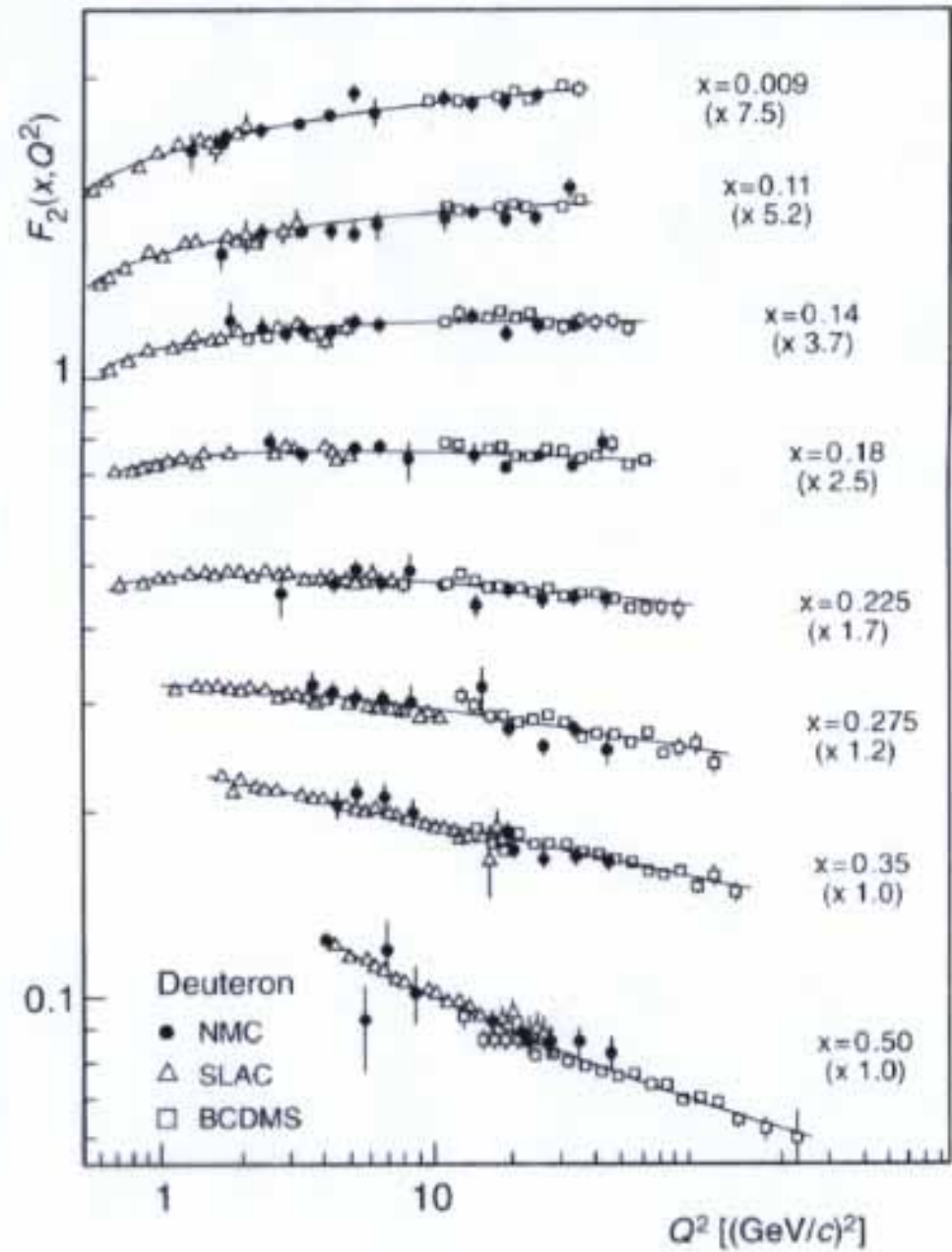
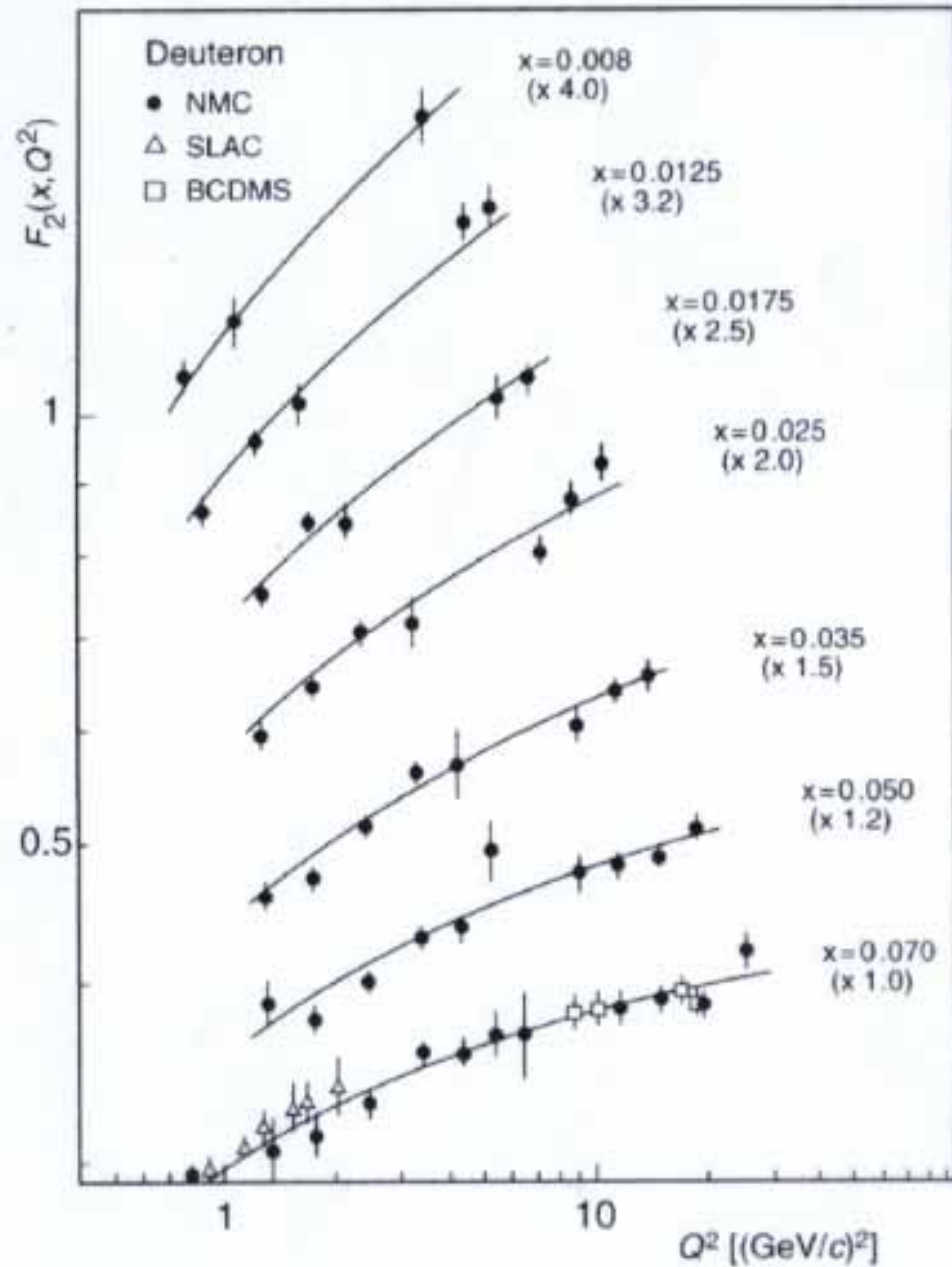
Quark mit Impuls  $y \cdot P$   
strahlt Gluon ab und  
trägt danach Impuls  $x \cdot P$   
(kleiner!)



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 Diff. / Integralgleichungen)

# Skalenbrechung : Impulsverteilungen im Nukleon $\Rightarrow \alpha_s, \Lambda_{QCD}$

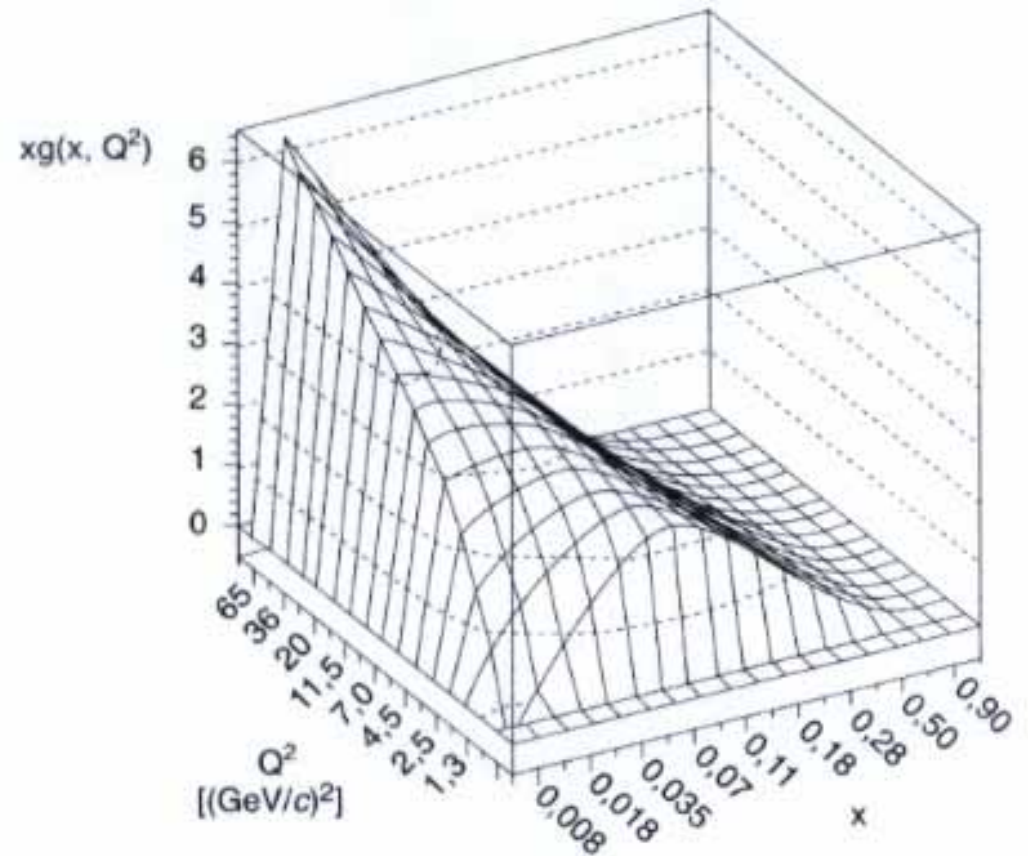
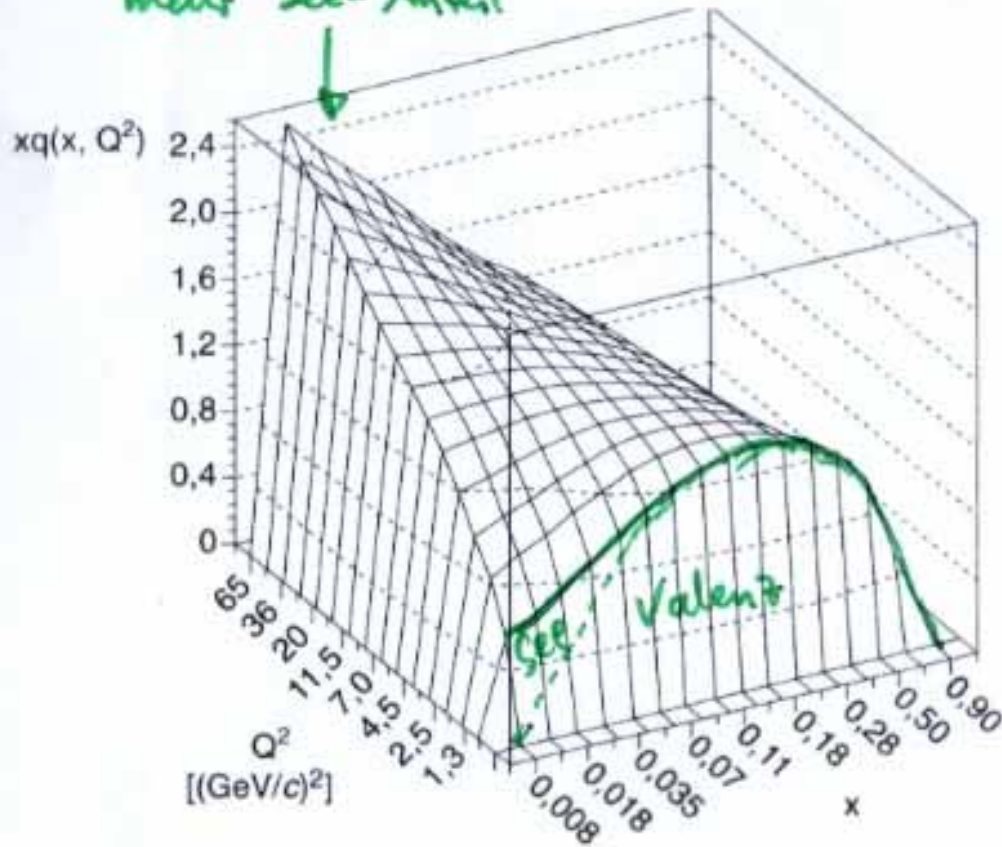


# $Q^2$ -Evolution von Quark- und Gluon-Verteilungen

hohes  $Q^2$ :

weniger Valenzanteil  
mehr See-Anteil

viele Quarks  
bei kleinem  $x$



$$x \cdot q(x) = \sum_f x \cdot (q_f(x) + \bar{q}_f(x))$$

$$\approx \frac{1}{5} F_2^d$$

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

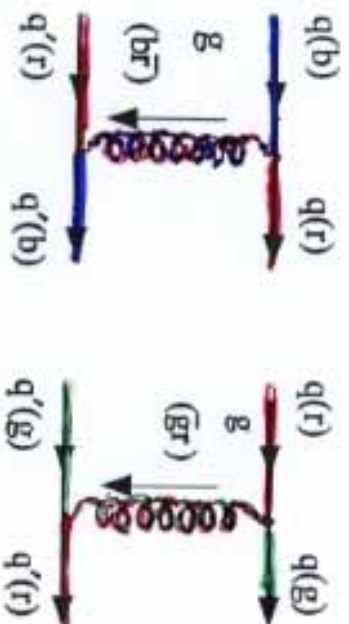


Abb. II.28: Starke Wechselwirkung durch Gluonenaustausch ( $q, q' = \text{Quarks}, g = \text{Gluon}; (r), (g), (b)$  steht für die Farbladungen rot, grün und blau); symbolische Darstellung in Anlehnung an *Feynman*-Graphen

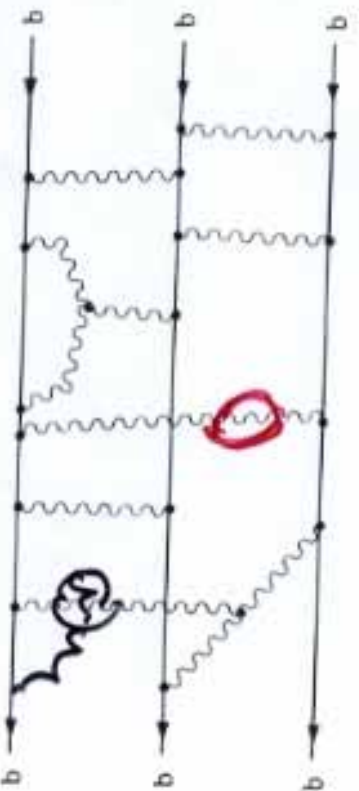
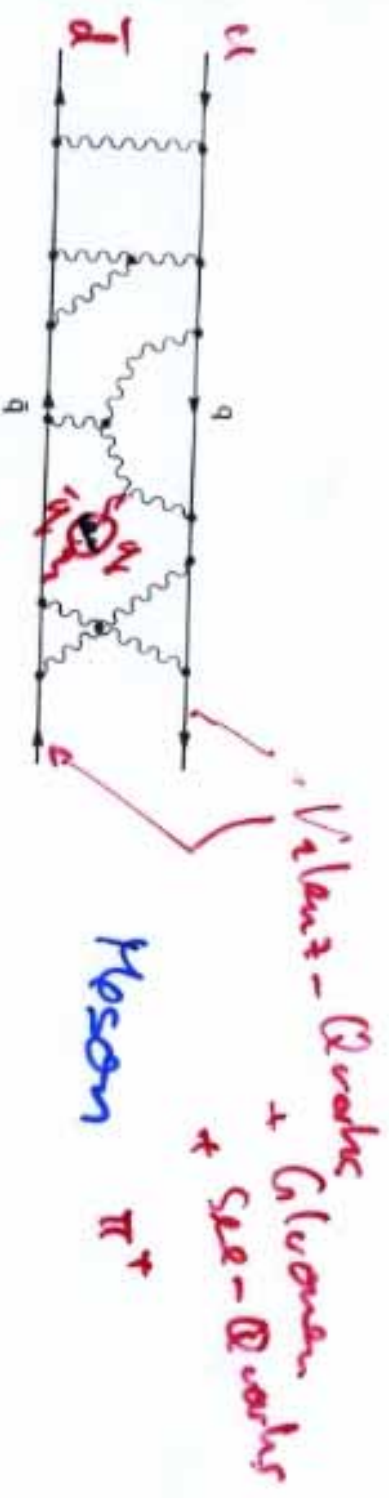
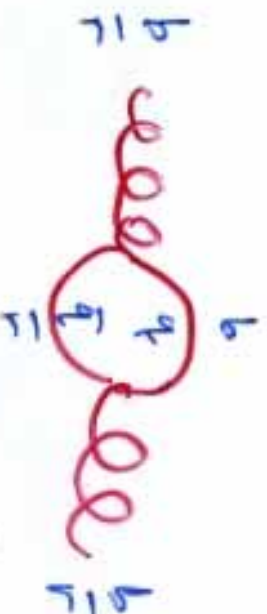


Bild 32.5 Die Quarks im Hadron sind durch fortwährenden Austausch von Gluonen aneinander gebunden.

Baryon



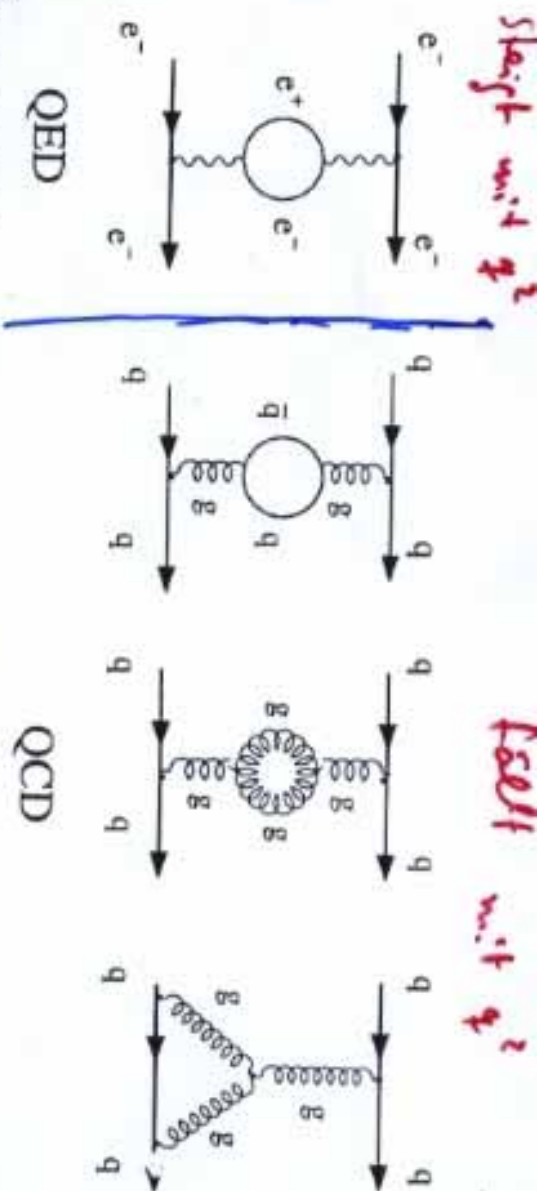
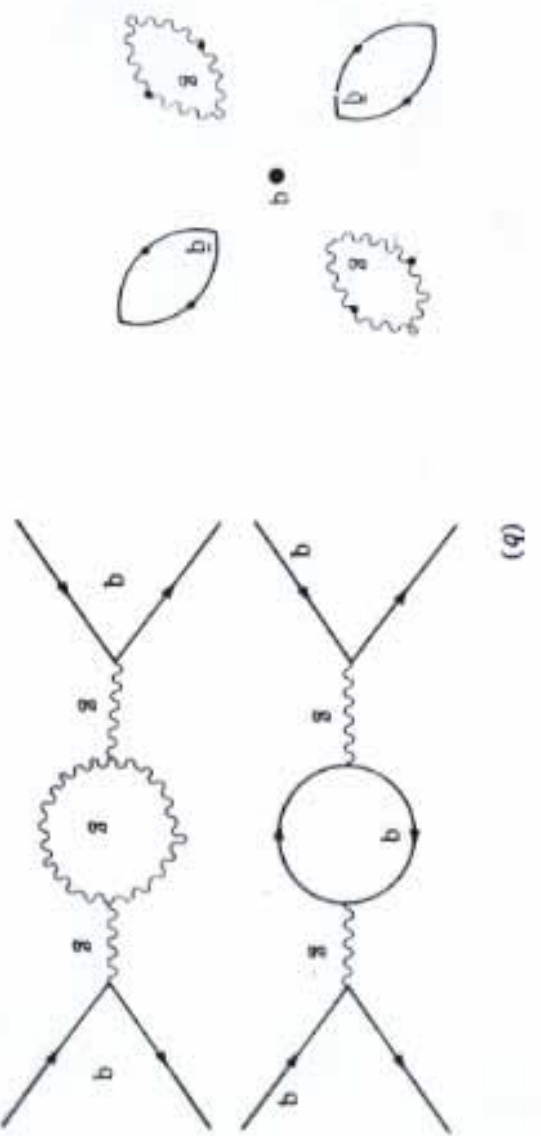


Abb. II.29: Vakumpolarisationsdiagramme der QED und QCD



ild 33.3 (a) Virtuelle Quark-Antiquark-Paare und Gluonen *verstärken* die Farbladung eines Quarks. Dieser Effekt wird durch Feynman-Diagramme wie in (b) beschrieben.

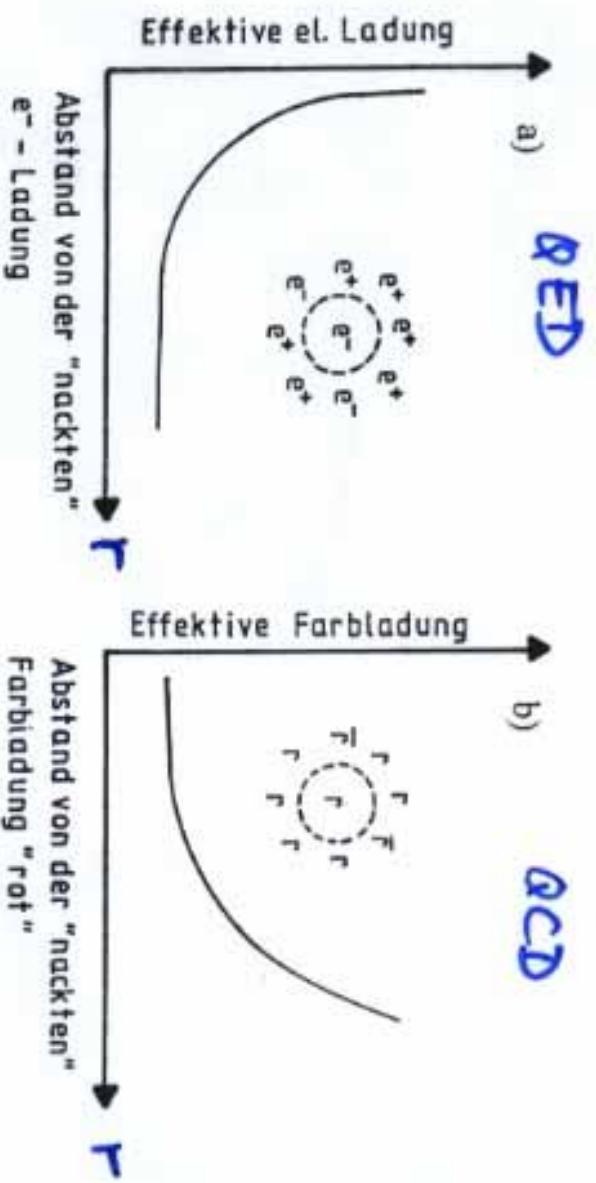


Abb. II.31: Auswirkungen

- (a) der Vakumpolarisation auf die effektive elektrische Ladung
- (b) der Vakumpolarisation und der Gluonen auf die effektive Farbladung

# "Running $\alpha_s$ "

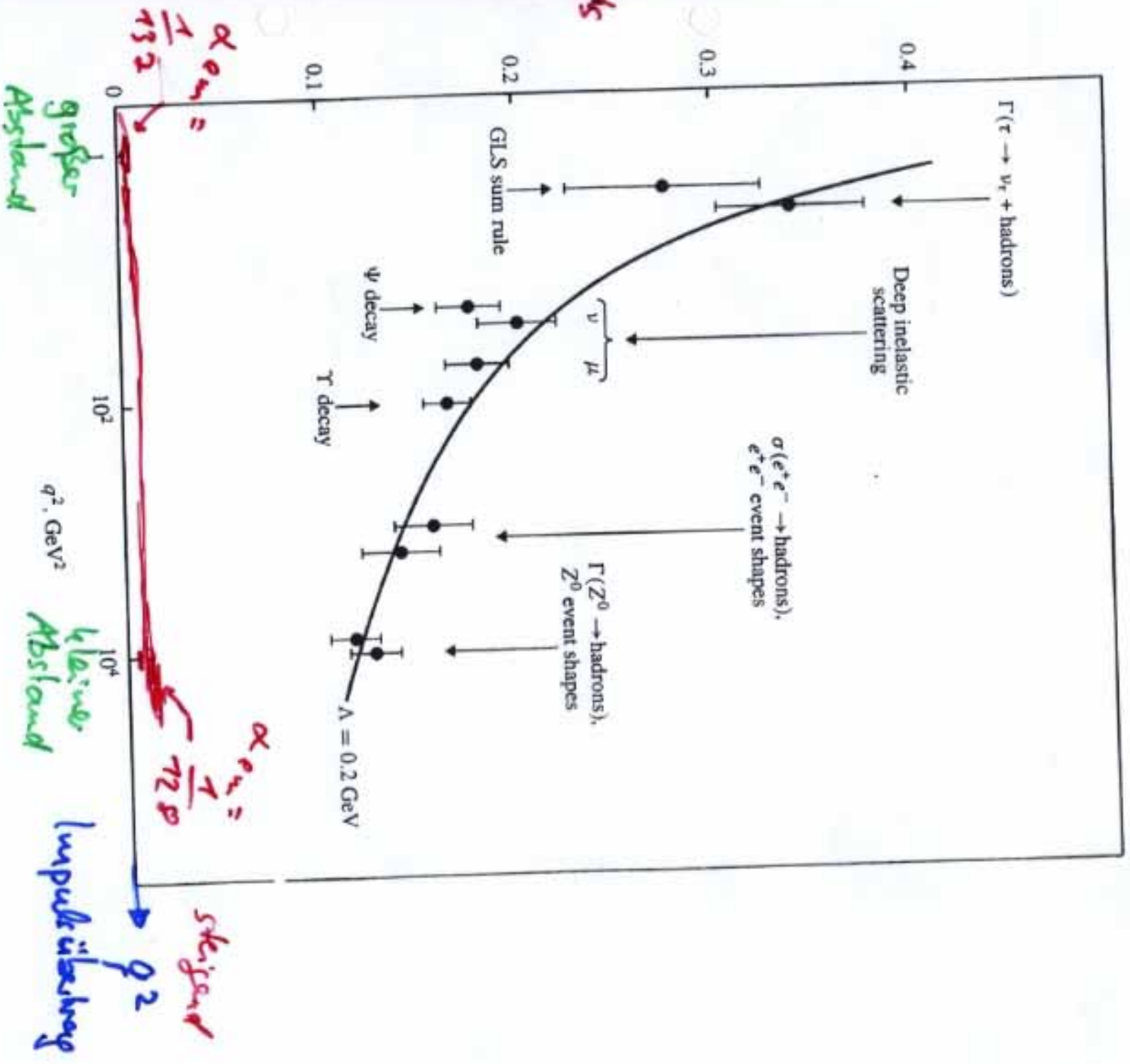
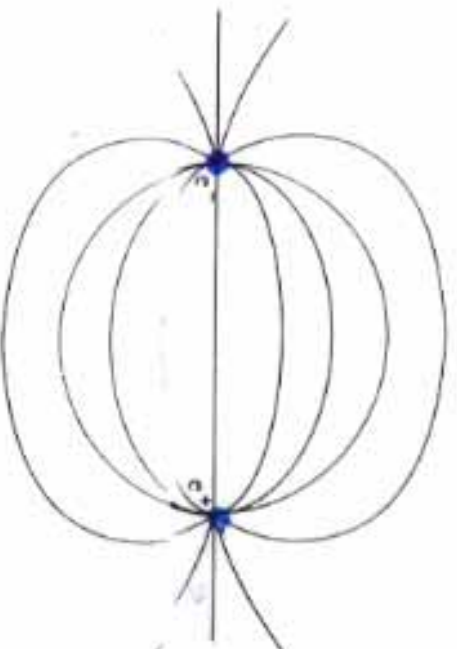
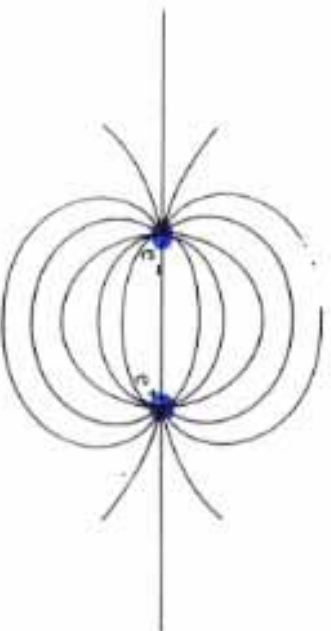


Fig. 6.12. Variation of the QCD coupling parameter  $\alpha_s$  with  $q^2$ . The data come from various sources, as described in the text. The curve is the prediction (6.23) for  $\Lambda \simeq 200 \text{ MeV}$ .

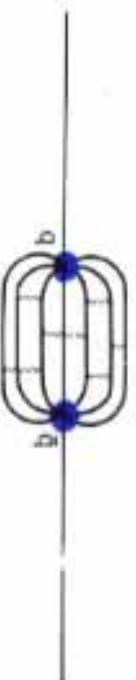
QED

Feldlinien



QCD

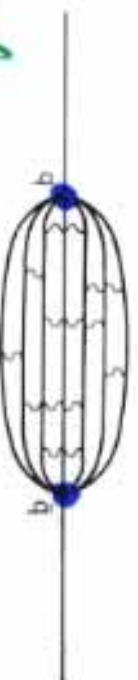
Feldlinien



"Schlauch"



"String"



quasi-eindimensional

Feldenergie wird größer

$$E > m(q) + m(\bar{q}) \Rightarrow$$

$q\bar{q}$ -Paar aus Vakuum  $\Rightarrow$

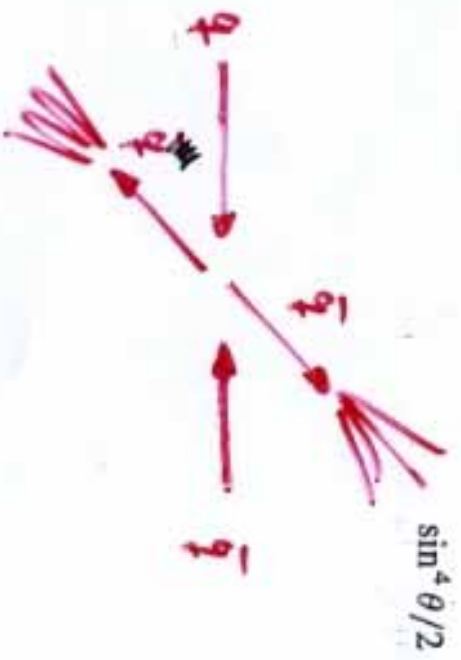
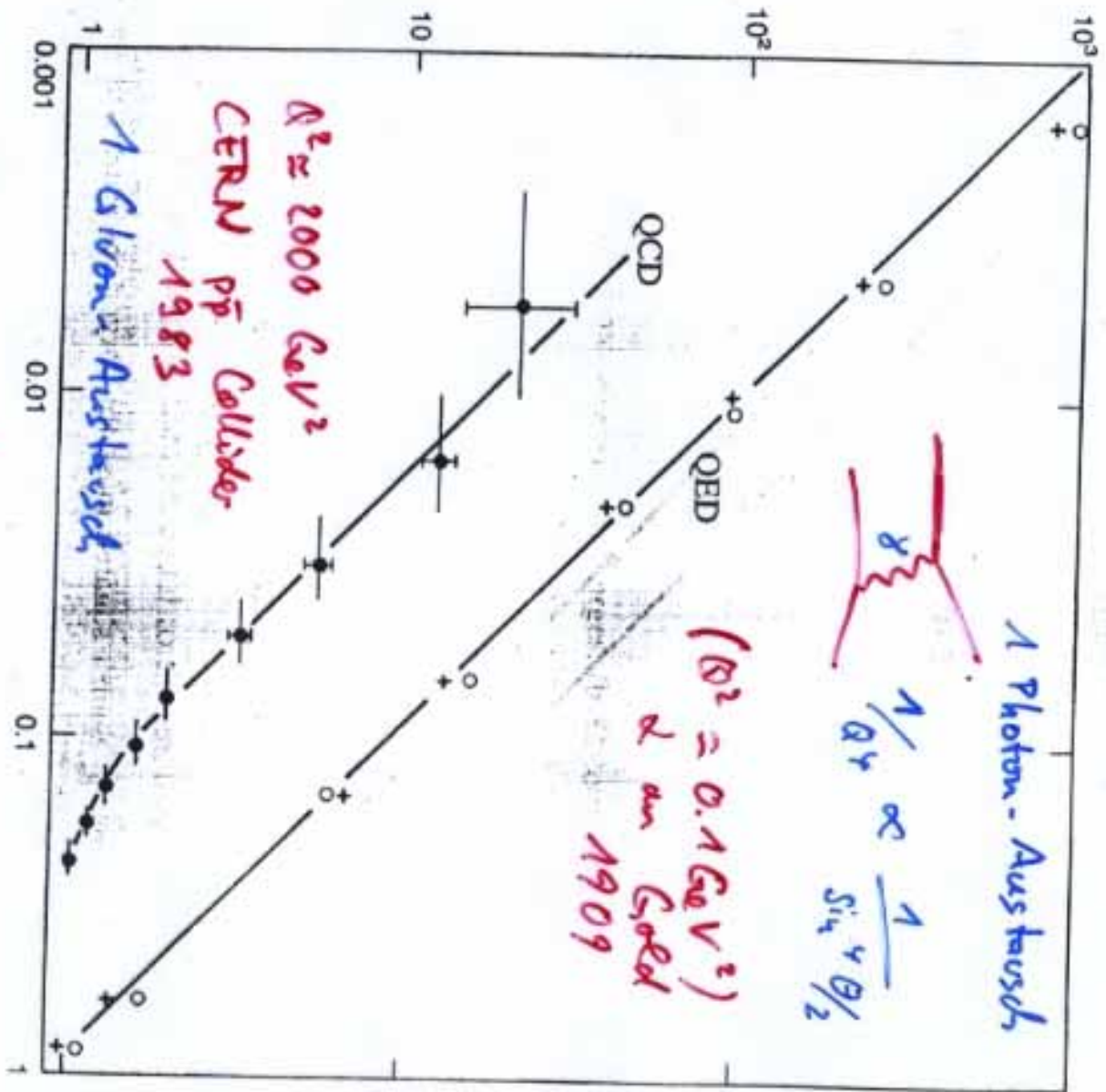


$q\bar{q}$



2 Mesonen

Asymptotische Freiheit:  
 bei hohem  $Q^2$  ist das klein;  
 Quarks & frei; 1 Gluon-Austausch



2 Jet-Produktion

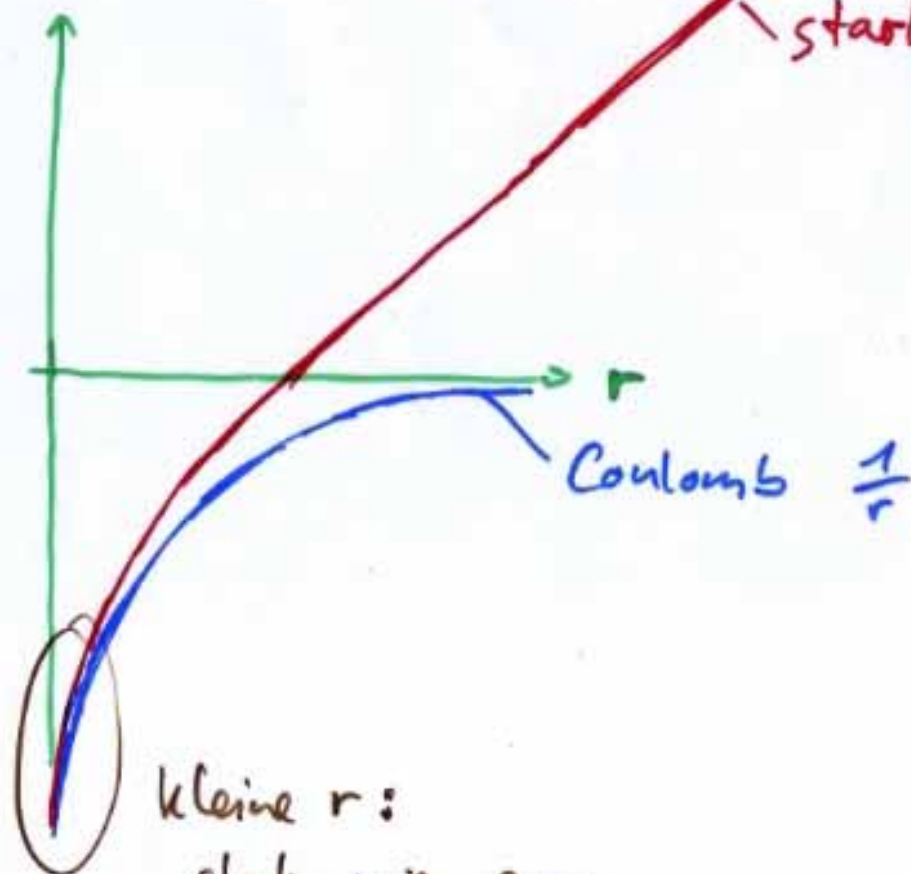
Gluonpropagator auch  $1/Q^2$

Fragmentation mit Wahrscheinlichkeit 100%.

Confinement

(Farbeinschluss)

" $q\bar{q}$ -Potential"



kleine  $r$ :

stark wie e.m.

$\Rightarrow$  "asymptotische Freiheit"  
tief im Hadron

stark:  $V \propto \frac{1}{r} + \alpha \cdot r$

linear ansteigendes  
Potential bei  
großen Abständen

$\Rightarrow$

"lonisation" nicht  
möglich



wenn man ein  
Quark aus einem  
Hadron entfernt,  
wird die Energie  
so groß, dass es  
günstiger ist, ein  
 $q\bar{q}$ -Paar aus dem  
Vakuum zu erzeugen  
und zwei Hadronen  
mit kleinerem  $q\bar{q}$ -Ab-  
stand

Hadronisation,  
Jetbildung

