

Kerne und Teilchen

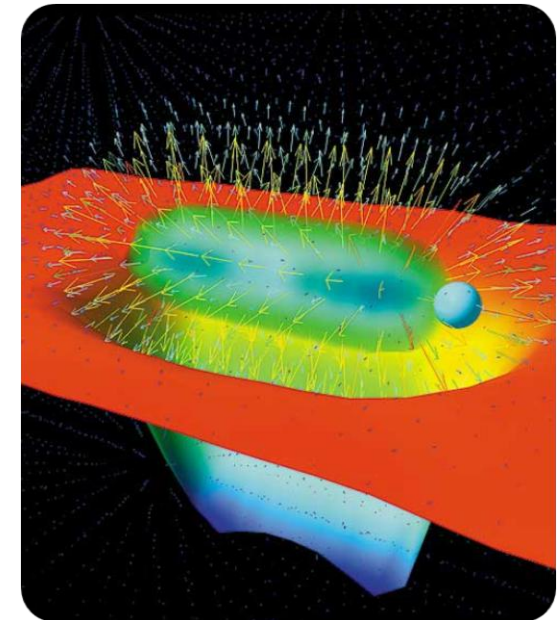
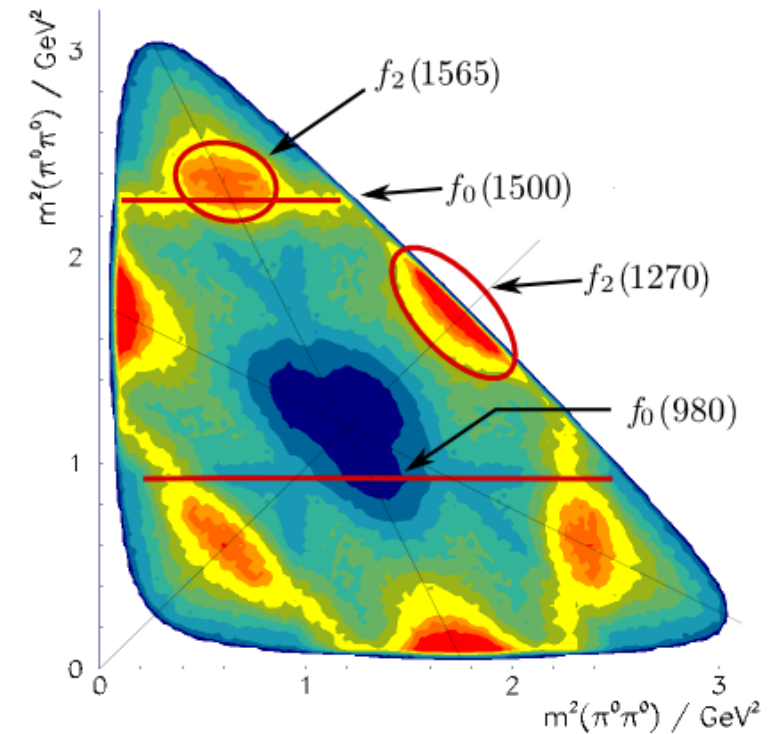
Physik VI

Vorlesung # 13 27.5.2010

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Elementarteilchen-Phänomenologie

- Gluonen: Selbstwechselwirkung
- Gluonenbälle (Glueballs)
- Confinement & asymptotische Freiheit
- starke Kopplungskonstante α_s
- intermediäre Vektorbosonen W, Z
neutrale Ströme

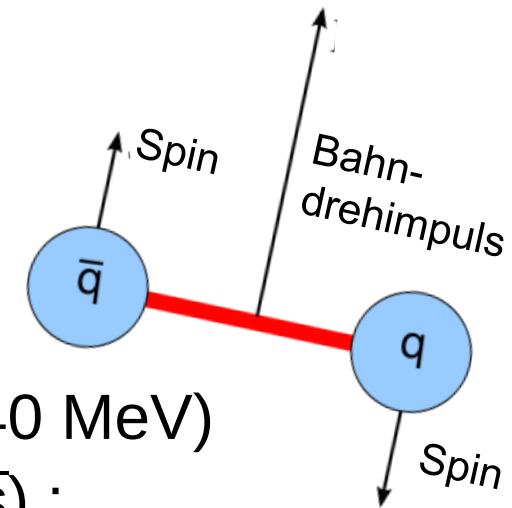


Mesonen – Klassifikation & Zerfälle

■ Spin-Singulett Mesonen ($\downarrow\uparrow$)

pseudoskalares Mesonen-Nonett: ($\ell = 0, S = 0$)

- **Pionen:** Isospin-Triplett mit π^+ , π^- , π^0 ($M = 135\text{-}140\text{ MeV}$)
- **Kaonen:** Mesonen mit 'offener' Strangeness ($s, \bar{s}$):
geladene Kaonen K^+ , K^- , neutrale Kaonen K^0 , $\bar{K}^0$ ($M \sim 500\text{ MeV}$)



■ Spin-Triplett Mesonen ($\uparrow\uparrow$)

vektorielles Mesonen-Nonett: ($\ell = 0, S = 1$)

- **ρ -Mesonen:** Isospin-Triplett mit ρ^+ , ρ^- , ρ^0 ($M = 770\text{ MeV}$)
- **Eta-Mesonen:** neutrale Mesonen mit 'verdeckter' Strangeness ($s + \bar{s}$):

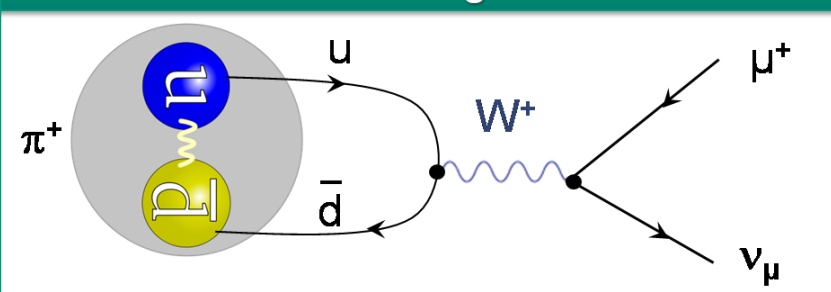
■ Meson-Zerfälle: starke/elmag./schwache Ww.

$\tau = 10^{-8} \dots 10^{-24}\text{ s}$

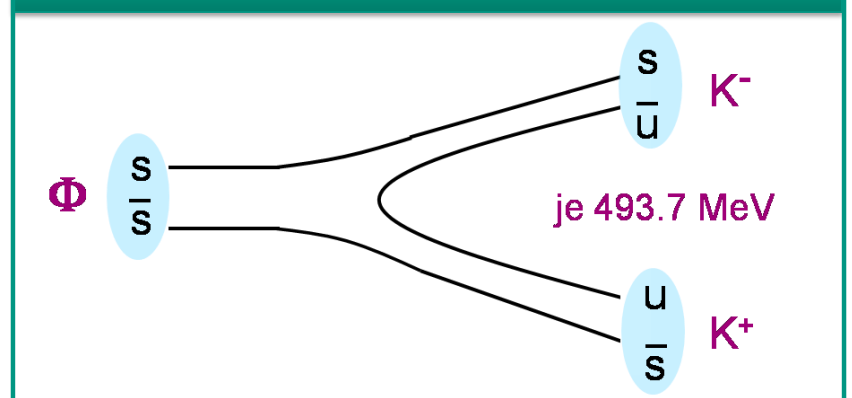
Zweig-Regel:

Quark-Linien
ununterbrochen

schwacher Zerfall von geladenen Pionen



starker Zerfall von neutralen Φ Mesonen



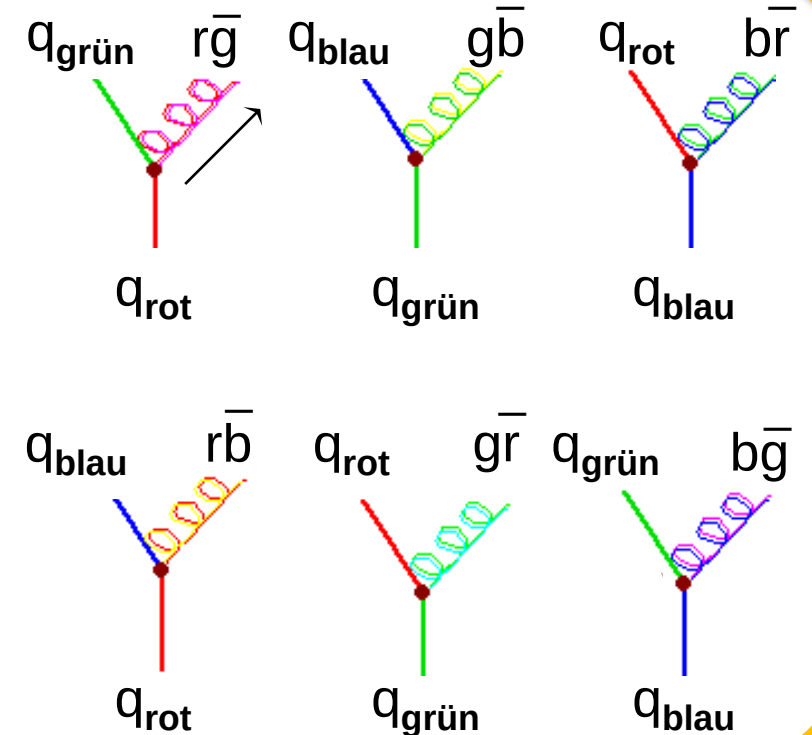
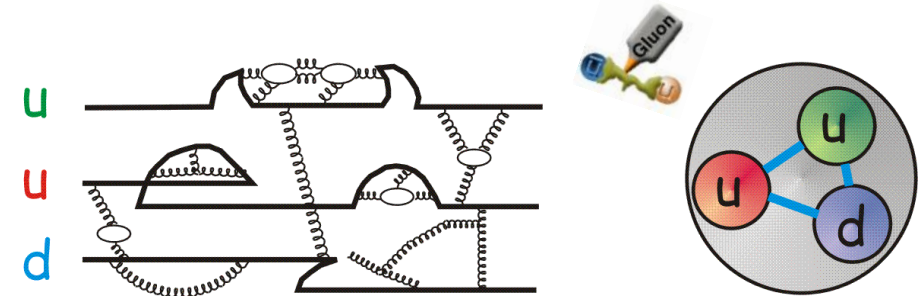
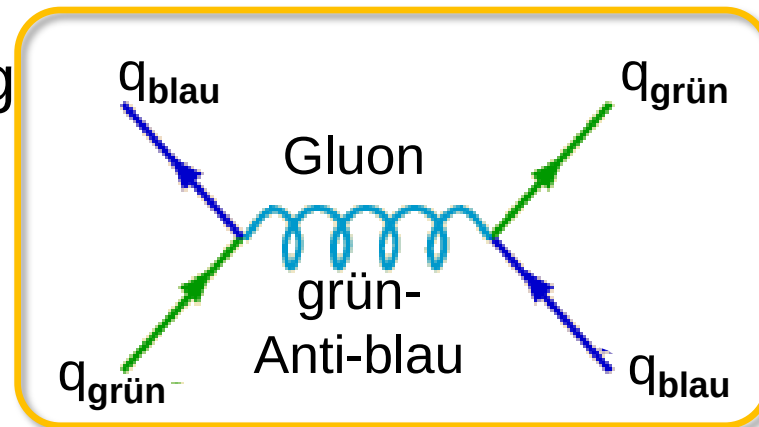
Gluonen – Grundlagen

- **Hadronen** (Baryonen & Mesonen) sind QCD - 'farbneutrale' Objekte in einem **Farb-Singulett-Zustand**
- Farbfreiheitsgrad wichtig für eine vollständig **antisymmetrische Wellenfunktion**

$$\Delta^{++} = \underbrace{|uuu\rangle}_{\text{Flavour}} \cdot \underbrace{|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle}_{\text{Spin}} \cdot \underbrace{|\ell=0\rangle}_{\text{Orbital-}\ell} \cdot \underbrace{\left| \frac{1}{\sqrt{6}} \varepsilon^{ijk} q_i q_j q_k \right\rangle}_{\text{Farbfreiheitsgrade}}$$

- in der QCD existieren **8 Gluonzustände** ('**Farboktett**')

- linear unabhängig
- **masseloses Spin 1 – Boson**
- **Gluon: Farbe + Anti-Farbe**



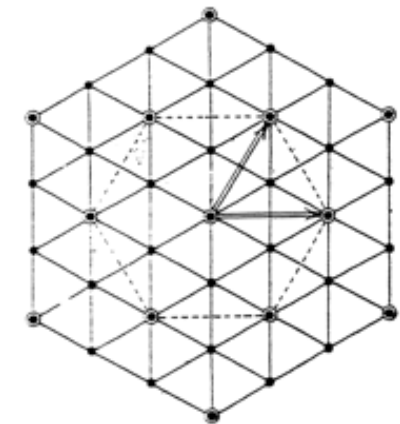
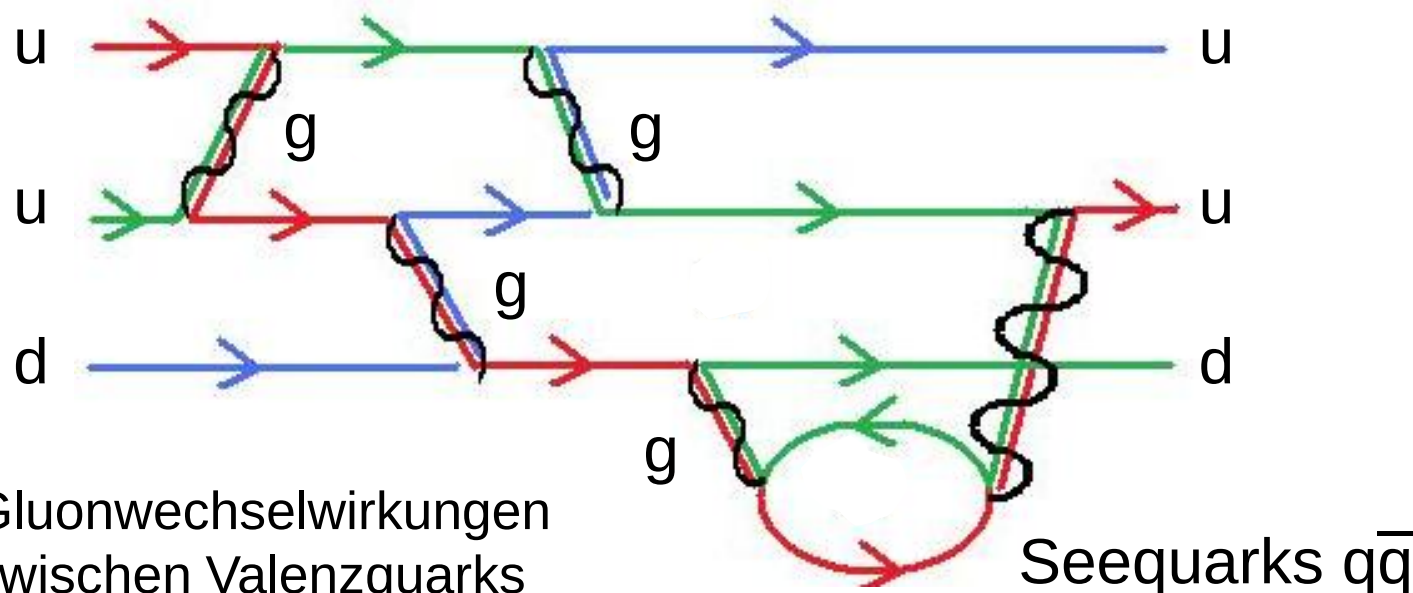
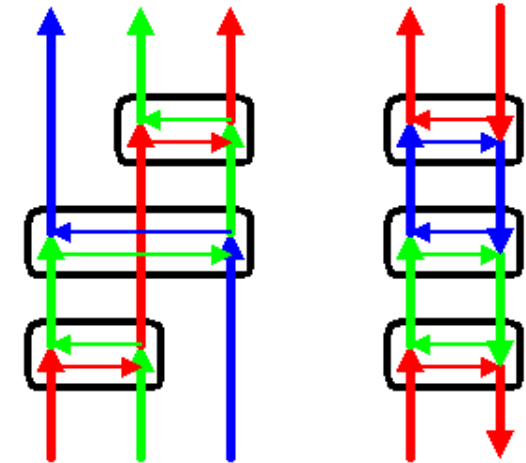
Farbe und $SU(3)_c$ Symmetriegruppe

■ Regeln der **Quantenchromodynamik**:

- gleiche Farbladungen stoßen sich ab
- Farbe & Antifarbe ziehen sich an
↳ Meson als $q\bar{q}$ – Bindungszustand),
- antisymmetrischen Zustände ziehen sich an

■ **Symmetriegruppe $SU(3)_{\text{Color}}$** :

- die Farbladungen spannen einen 3-dimensionalen Farbladungsraum auf
- die $SU(3)$ – Eichgruppe wird durch 8 Parameter beschrieben $\Leftrightarrow$ **8 Gluonen**



QCD: Spezielle Unitäre Gruppe $SU(3)$ [Lie-Gruppe]

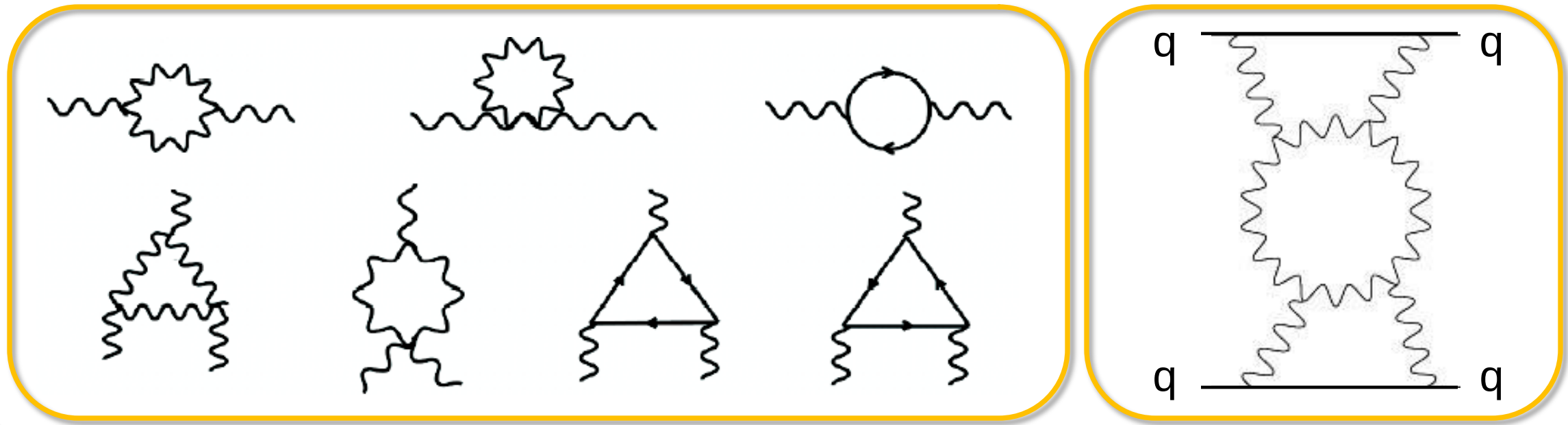
Gluonen: Selbstwechselwirkung

■ QED (Elektrodynamik):

Photonen (γ) als Eichbosonen tragen selbst keine elektrische Ladung & unterliegen als neutrale Teilchen keiner Selbstwechselwirkung

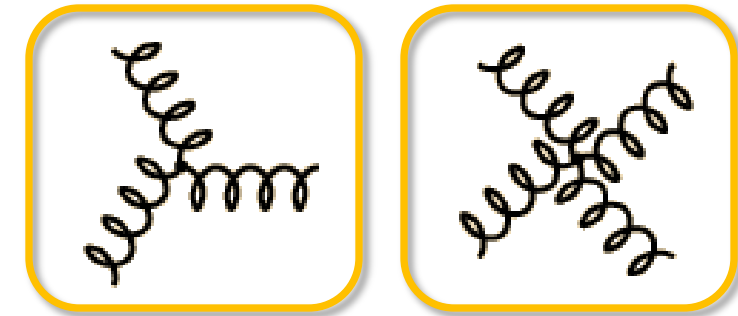
■ QCD (Chromodynamik):

- Gluonen (g) tragen selbst QCD-Farbladungen und können daher nicht nur mit Quarks sondern auch untereinander in Wechselwirkung treten
- die Selbstwechselwirkung der Gluonen führt zum Auftreten von komplexeren **QCD-Vertexgraphen**

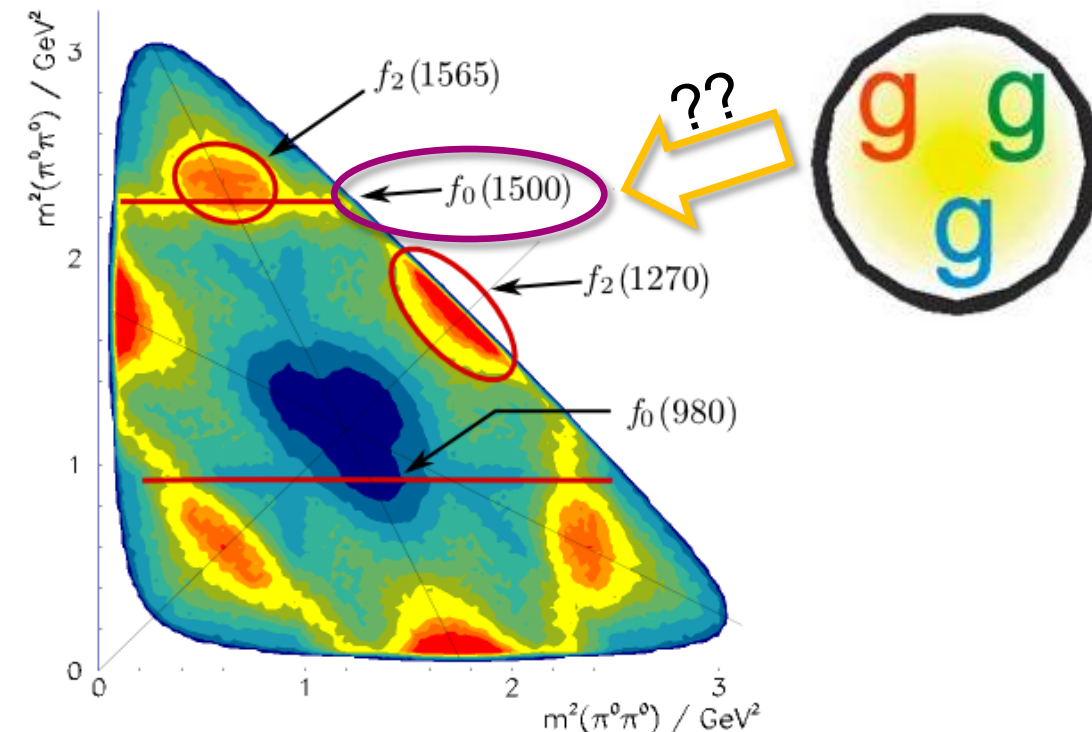


Gluonenbälle als exotische QCD-Zustände

- die **Gluon selbstwechselwirkung** kann zu gebundenen Zuständen führen, die keine Quarks enthalten: **Glueballs**
 - die hypothetischen Gluonenbälle bestehen nur aus den Strahlungsquanten der starken Wechselwirkung
 - in der QCD werden Gluonenbälle bei Massen $M = 1500 - 1700$ MeV erwartet (stark modellabhängig)
- 3-Körper-Zerfälle von schweren Mesonen: die Resonanz $f_0(1500)$ wird als ein möglicher Glueball-Kandidat angesehen (Verifikation?)
Darstellung des f_0 im **Dalitzplot** (Auftragung invarianter 2-Pionmassen)



Gluon-Selbstwechselwirkung



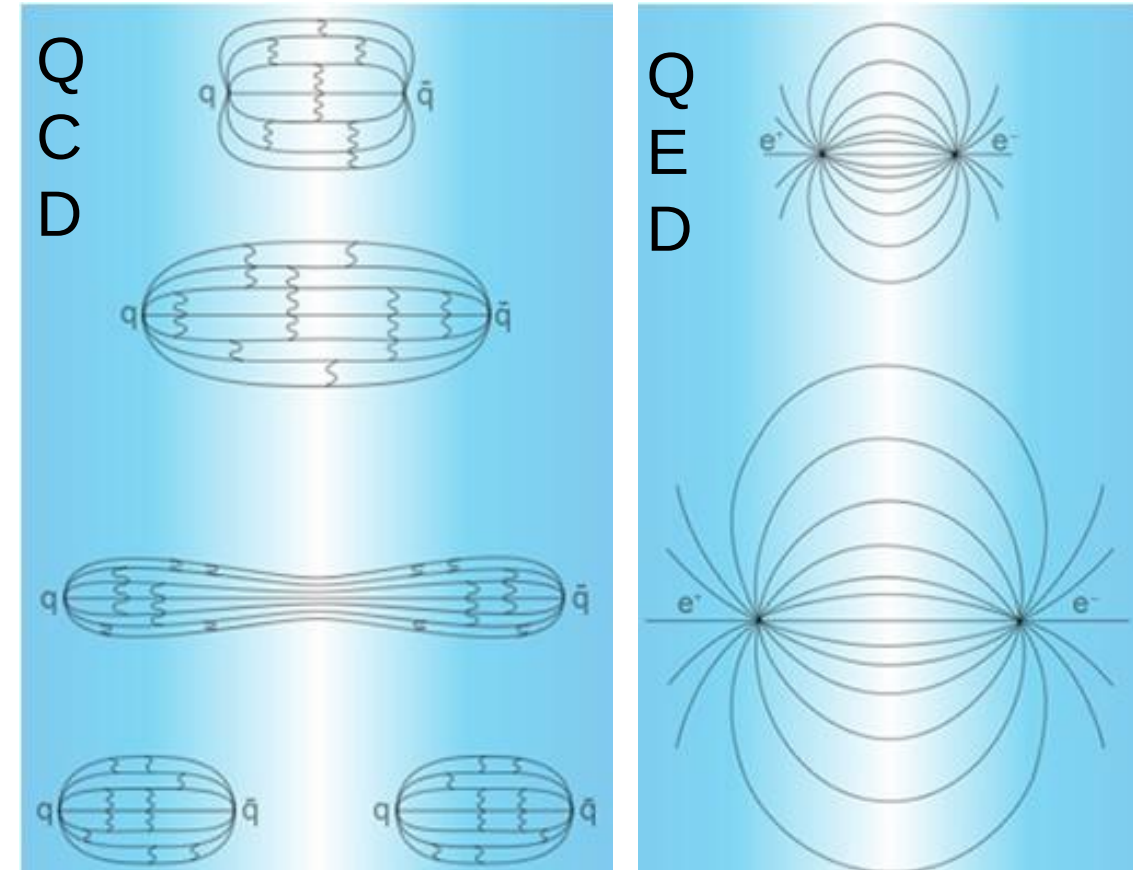
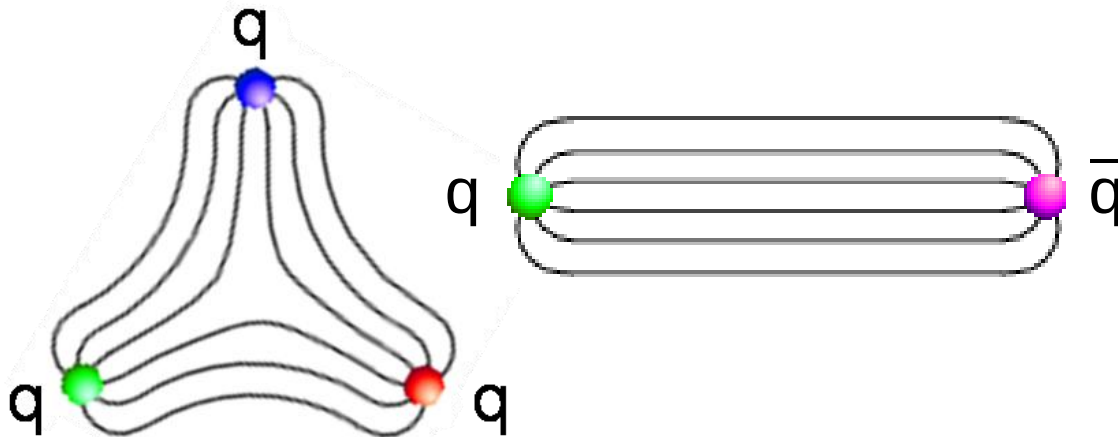
Gluonen: Fluss-Schläuche & Confinement

- die Gluon-Gluon-Selbstwechselwirkung erzeugt bei einer räumlichen Trennung von Quarks zylindrische **Farb-Flussschläuche** mit einer konstanten Feldstärke über Länge der Fluss-Röhre
- Quark-Antiquark-Potenzialansatz mit: ❶ $1/r$ 'Coulombansatz' ❷ linearer Term

$$V(r) = -\frac{4}{3} \cdot \alpha_s \cdot \frac{\hbar c}{r} + \kappa \cdot r$$

$$\alpha_s \sim 0.3 \quad \kappa = 14 \text{ t}$$

E_{pot} nimmt für große r stark zu!
 ↪ **Quark-Confinement in $\sim 1 \text{ fm}$**

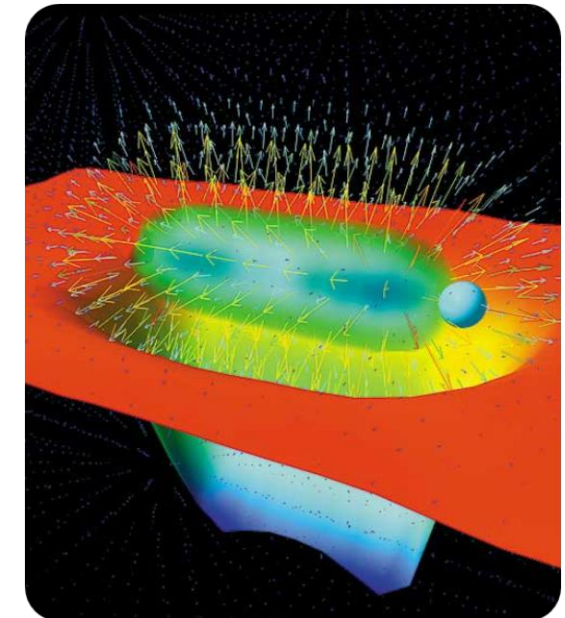
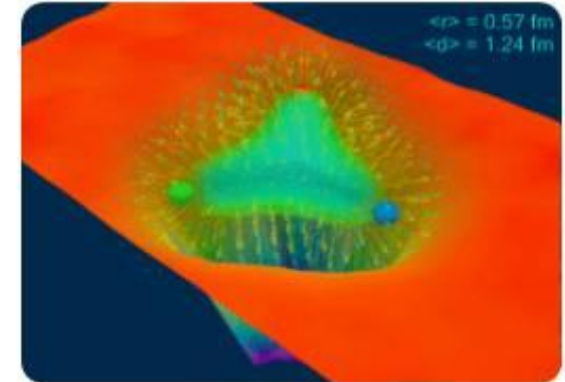


Asymptotische Freiheit in der QCD

- bei extrem kurzen Abständen sollten sich die Quarks entsprechend der QCD (Wilzeck, Gross, Politzer) wie nahezu freie Teilchen verhalten

↪ **asymptotische Freiheit**

- dieser Effekt der QCD ermöglicht die Anwendung des Quark-Parton Modells zur Interpretation der tiefinelastischen eN-Streuung (vgl. Kap. 3.2)



Frank Wilczek David J. Gross H. David Politzer

Nobelpreis 2004



KUNGL.
VETENSKAPSAKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



"for the discovery of asymptotic freedom in the theory of the strong interaction"

Confinement & Jetstrukturen

- bei einem harten Stoßprozess wird das $q\bar{q}$ -Paar räumlich voneinander getrennt & die Energie im farbelektrischen Flussschlauch wird so groß, dass ein weiteres **Quark-Antiquark Paar** erzeugt wird, man erhält damit 2 Mesonen

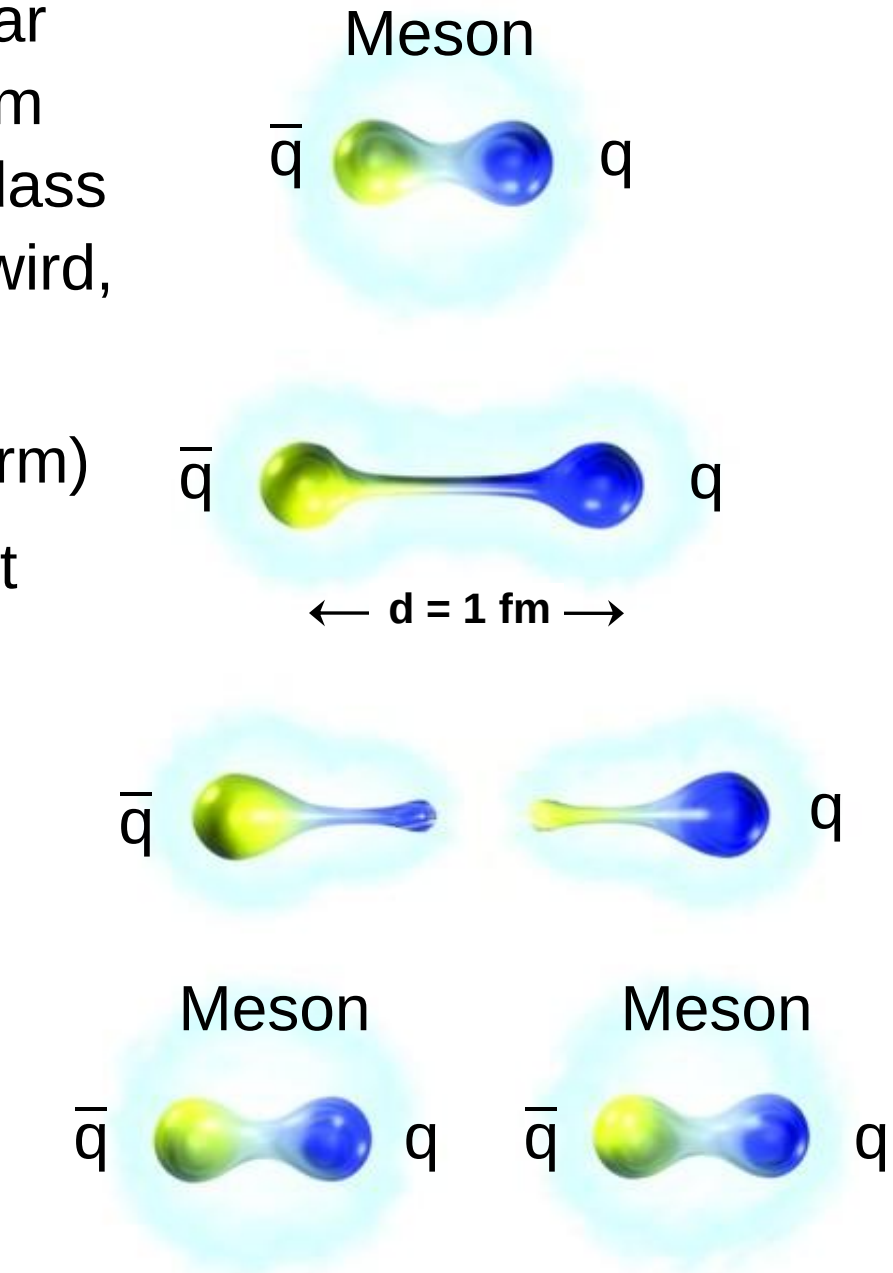
- Energie-Abschätzung bei $d = 1 \text{ fm}$ (linearer Term)

$$V \cong 9.81 \times 14 \cdot 10^3 \times 10^{-15} \text{ J}$$
$$= 1.4 \cdot 10^{-10} \text{ J} \cong 0.9 \text{ GeV}$$

$$\kappa = 14 \text{ t}$$

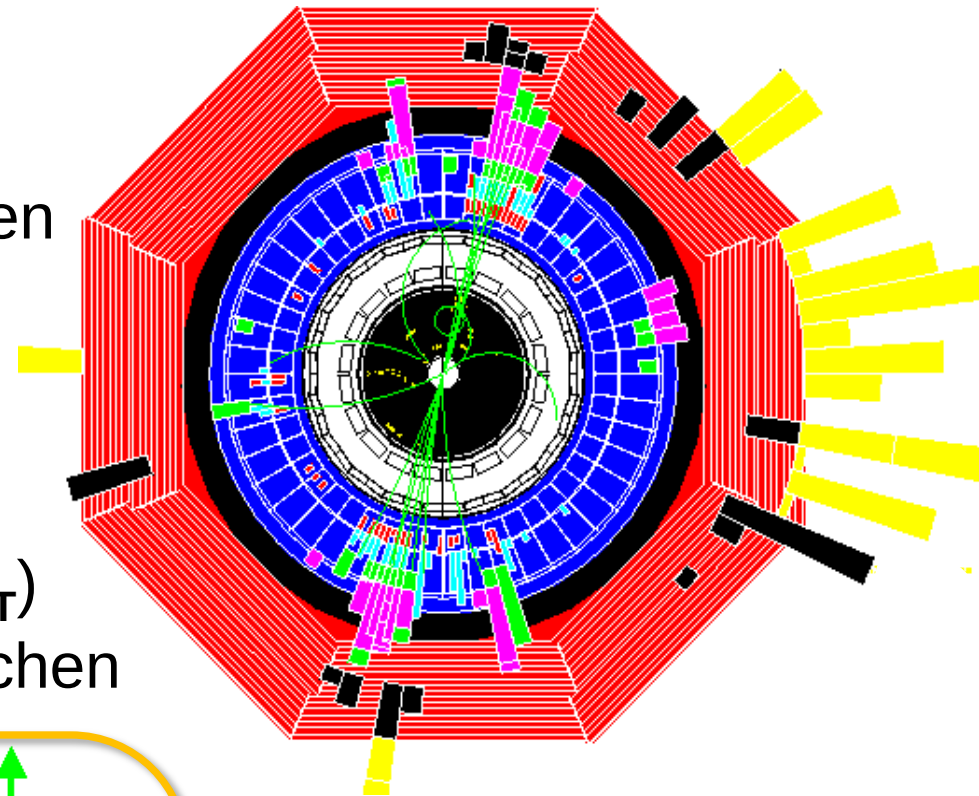
Energie ist ausreichend für neues $q\bar{q}$ -Paar

- - dieser Prozess kann sich mehrmals wiederholen: Bildung von zahlreichen Quark-Antiquark Paaren
↳ Ausbildung eines **hadronischen Jets**

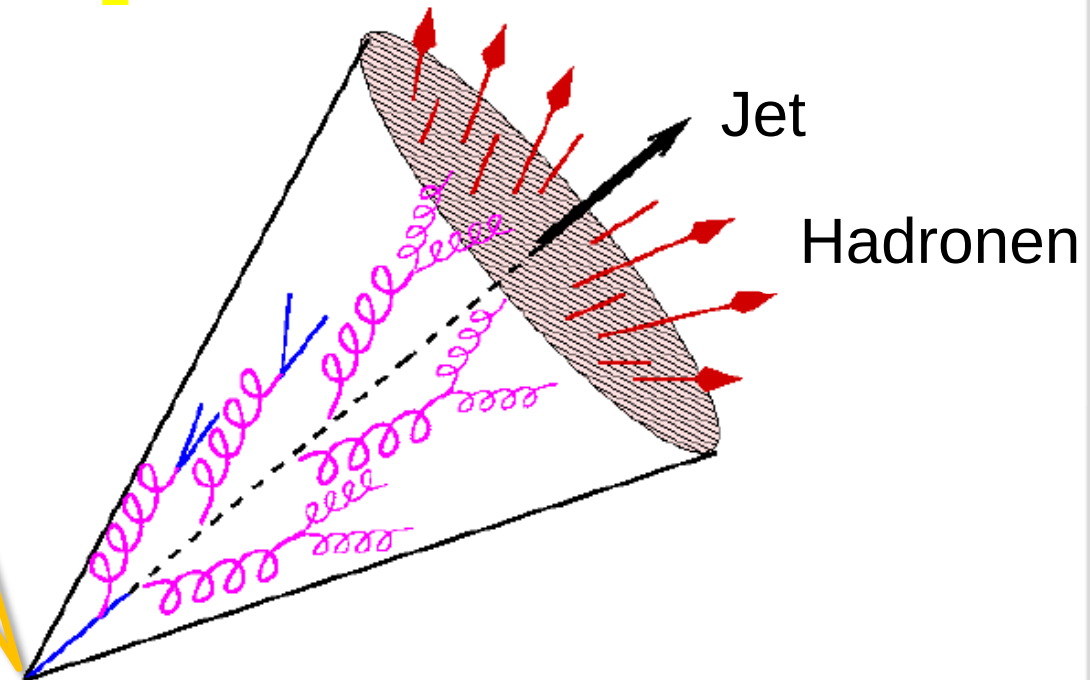
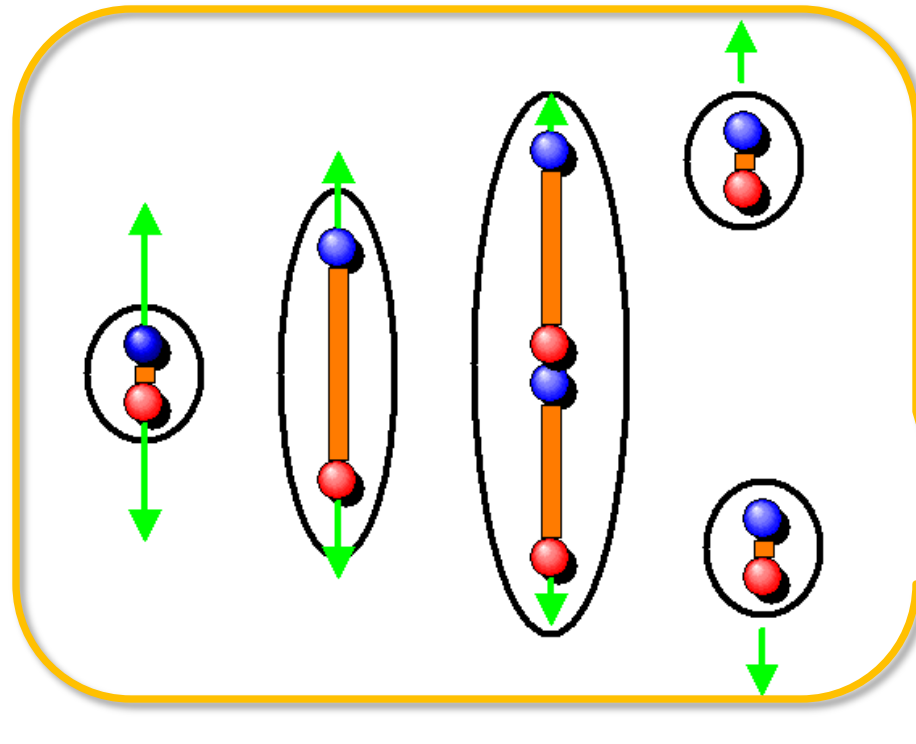


Jetstrukturen

- Ausbildung eines beobachtbaren **hadronischen Jets**:
Pionen, schwere Mesonen, Nukleonen, Hyperonen,...
- aus den Jet-Parametern (E_T , p_T)
Rückschluss auf die Primärteilchen



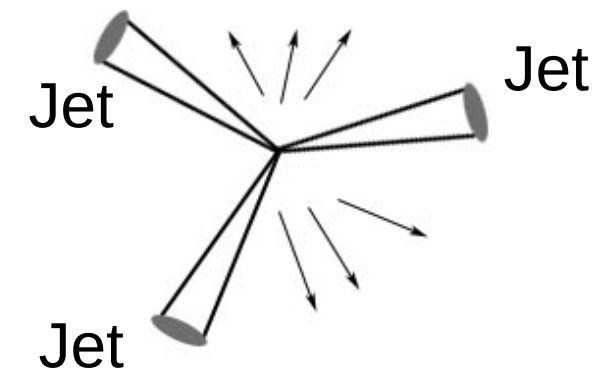
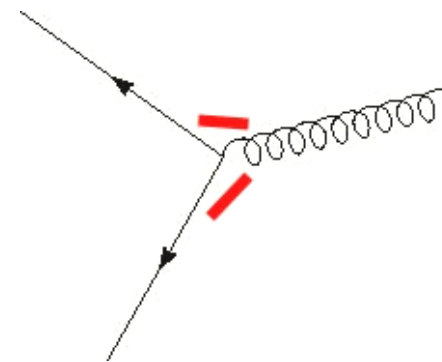
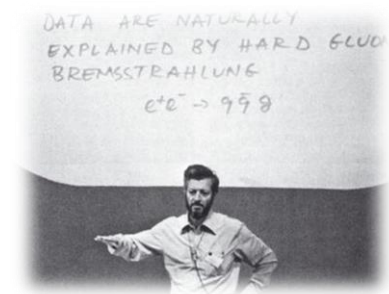
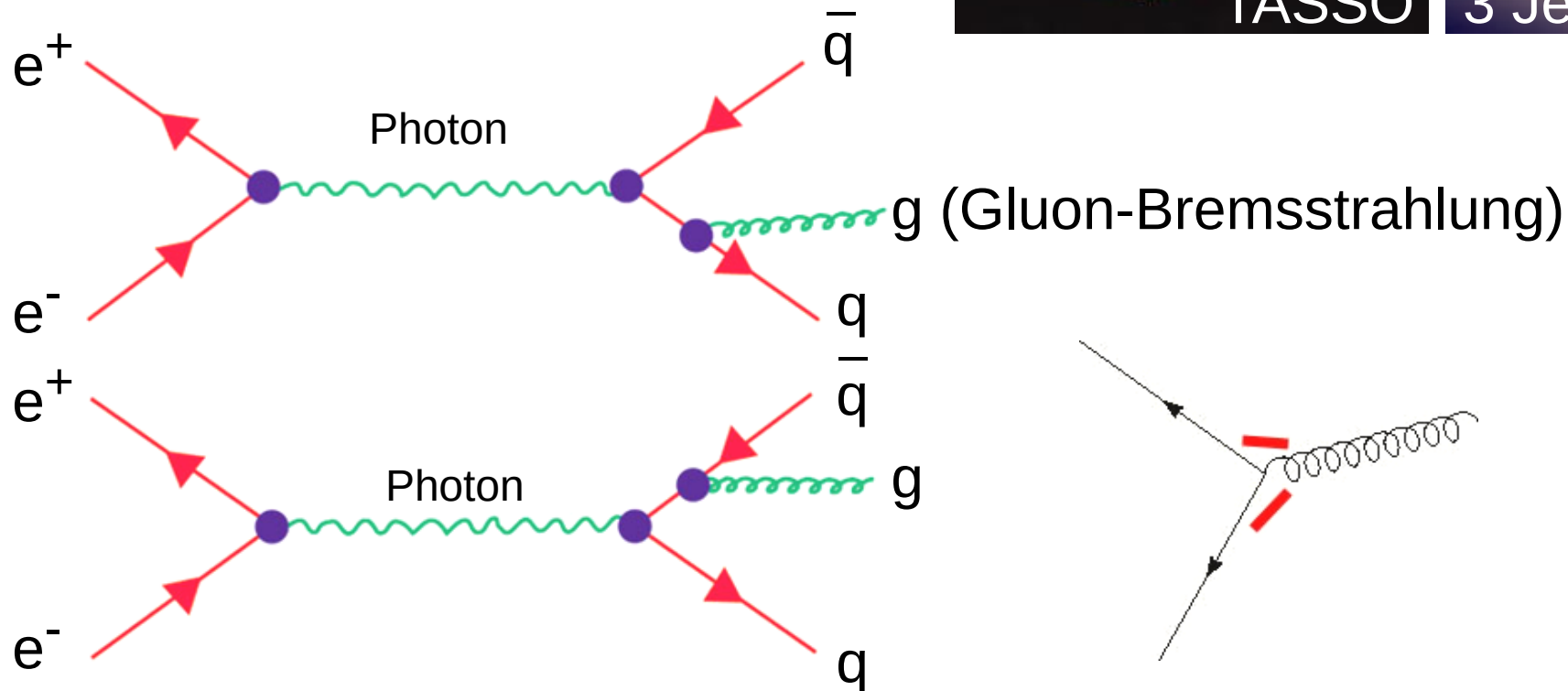
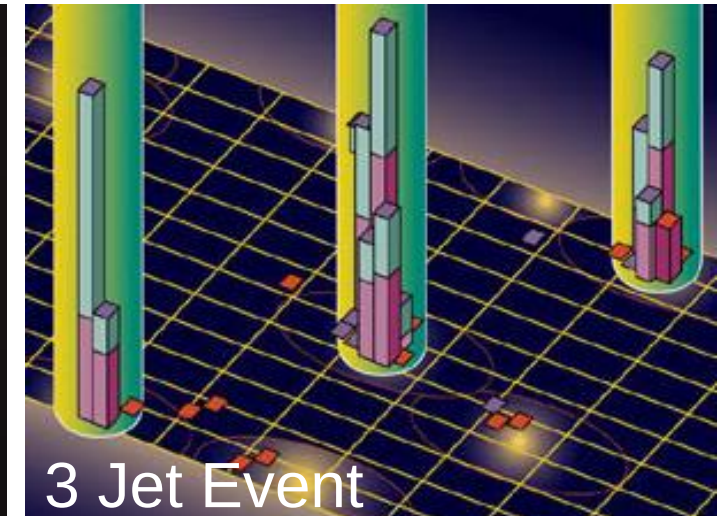
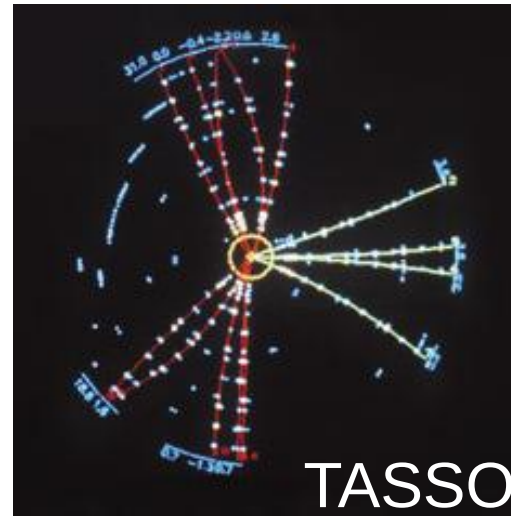
2-Jet
Ereignis
in einem
Detektor



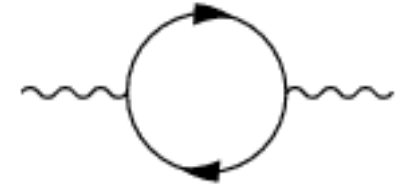
Gluonen: Nachweis in 3 Jet Ereignissen

■ Gluonnachweis am DESY:

TASSO Detektor am
PETRA e^+e^- Speicherring
Quark – Antiquark Jets und
Abstrahlung eines harten
Gluons $\Rightarrow$ **3 Jet Struktur**



Vakuumpolarisation in QED und QCD



- die Stärke einer Wechselwirkung (**Kopplungskonstanten α , α_s**) variiert mit dem Impulsübertrag Q^2 zwischen den beteiligten Teilchen
Grund: der Vakuumzustand einer Quantenfeldtheorie (QED, QCD) ist ein sehr komplexer Zustand (polarisierbares Medium)

- Vakuumfluktuationen erzeugen ständig **virtuelle Teilchen-Antiteilchenpaare**

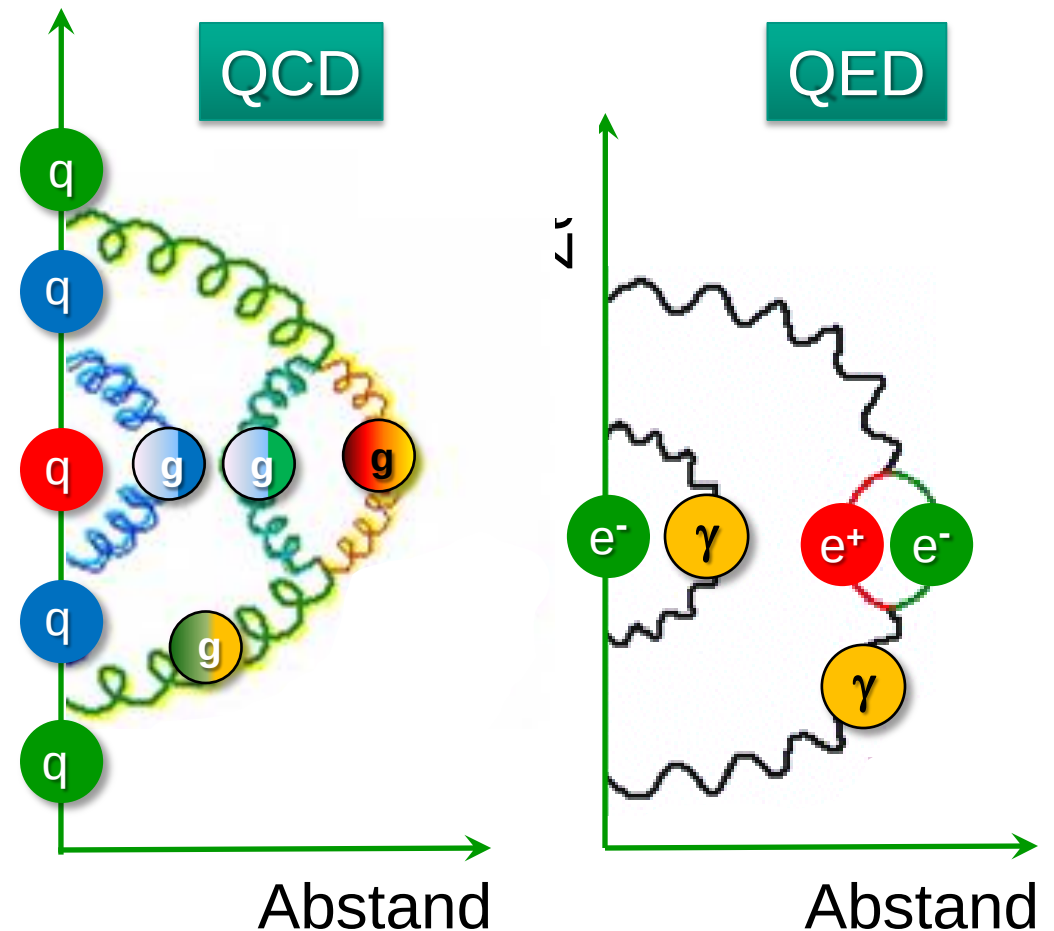
Renormierung der nackten Ladung

QED:

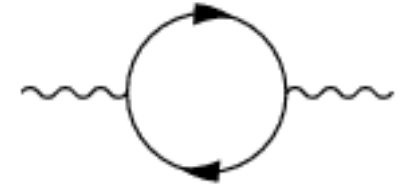
Photonen erzeugen e^+/e^- Paare

QCD:

Gluonen erzeugen Paare von Quarks/Antiquarks & Gluonen



Vakuumpolarisation in der QED



■ Quantenelektrodynamik:

„nacktes“ Elektron ist von Elektron-Positron-Paaren umgeben, dies führt zu einer **Abschirmung der Ladung**

- mit wachsendem Abstand d wird effektive Ladung e_{eff} des Elektrons kleiner
- bei kürzeren Abständen (höhere Energie): größere „nackte“ Ladung des Elektrons wird sichtbar

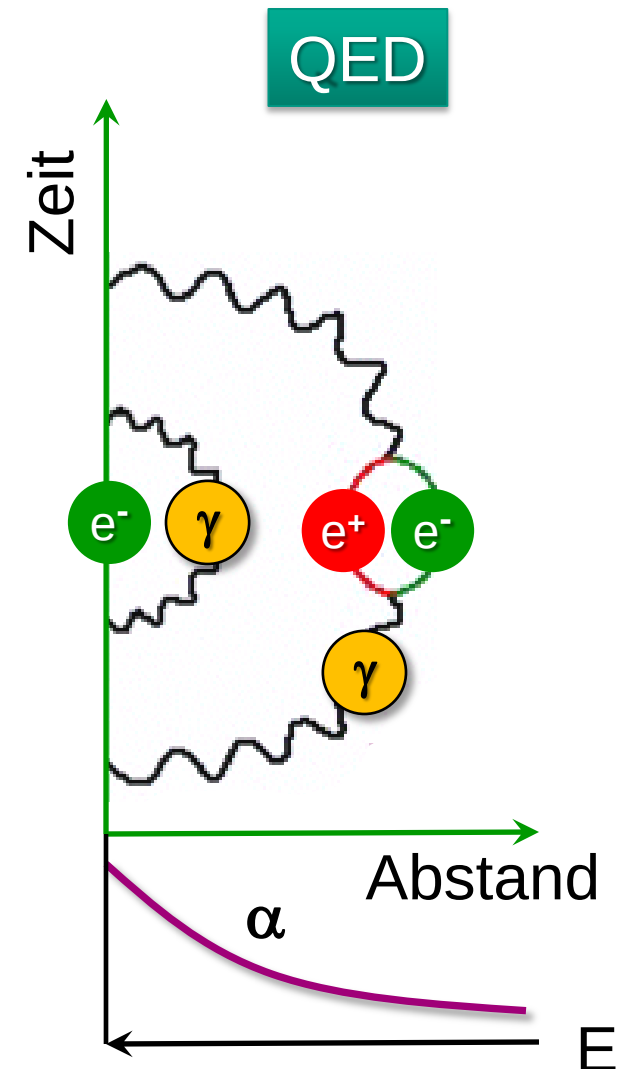
■ Verlauf der Feinstrukturkonstanten α :

die Stärke $e^2 = \alpha$ (Feinstrukturkonstante) der elektromagnet. Wechselwirkung steigt mit der Energie an

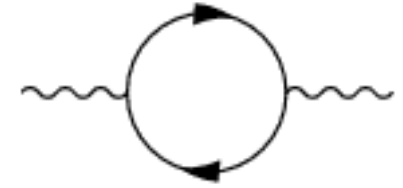
$$\alpha(Q) = \frac{\alpha(\mu)}{1 - \frac{\alpha(\mu)}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)}$$

μ : Impulsübertrag

$$\alpha = 1/137 \text{ bei } \mu = 1 \text{ MeV} \Rightarrow \alpha = 1/129 \text{ bei } \mu = 90 \text{ GeV}$$



Vakuumpolarisation in der QCD



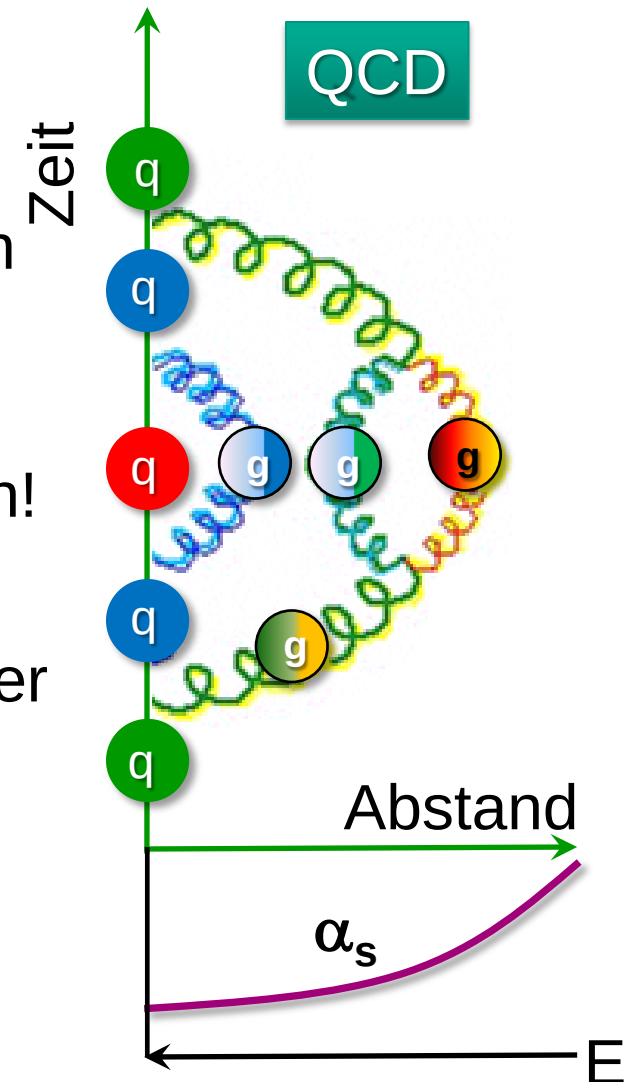
■ Quantenchromodynamik

- **Abschirmung der Farbladung** des „nackten“ Quarks durch die erzeugten virtuellen **Quark/Antiquark Paare** (wie bei der QED), die $q\bar{q}$ -Paare tragen aber keine Netto-Farbladung
- **Anti-Abschirmung der Ladung** durch die vom Quark emittierten **virtuellen Gluonen**, da diese Farbladungen mitnehmen, dies führt zu einer Verschmierung der QCD Ladung auf ein größeres Volumen
- bei kleinen Abständen dominiert der Effekt der Gluonen!

■ Verlauf der Feinstrukturkonstanten α :

die Kopplungskonstante α_s der QCD wird mit steigender Energie (d.h. bei kleineren Abständen d) durch die schwächere gluonische Anti-Abschirmung kleiner

α_s wird mit wachsendem Impulsübertrag kleiner



starke Kopplungskonstante & Abstand

- die starke Kopplungs´konstante´ α_s hängt ab vom den Parametern:
 - Impulstransfer μ
 - Zahl N_f der Quark-Flavourarten



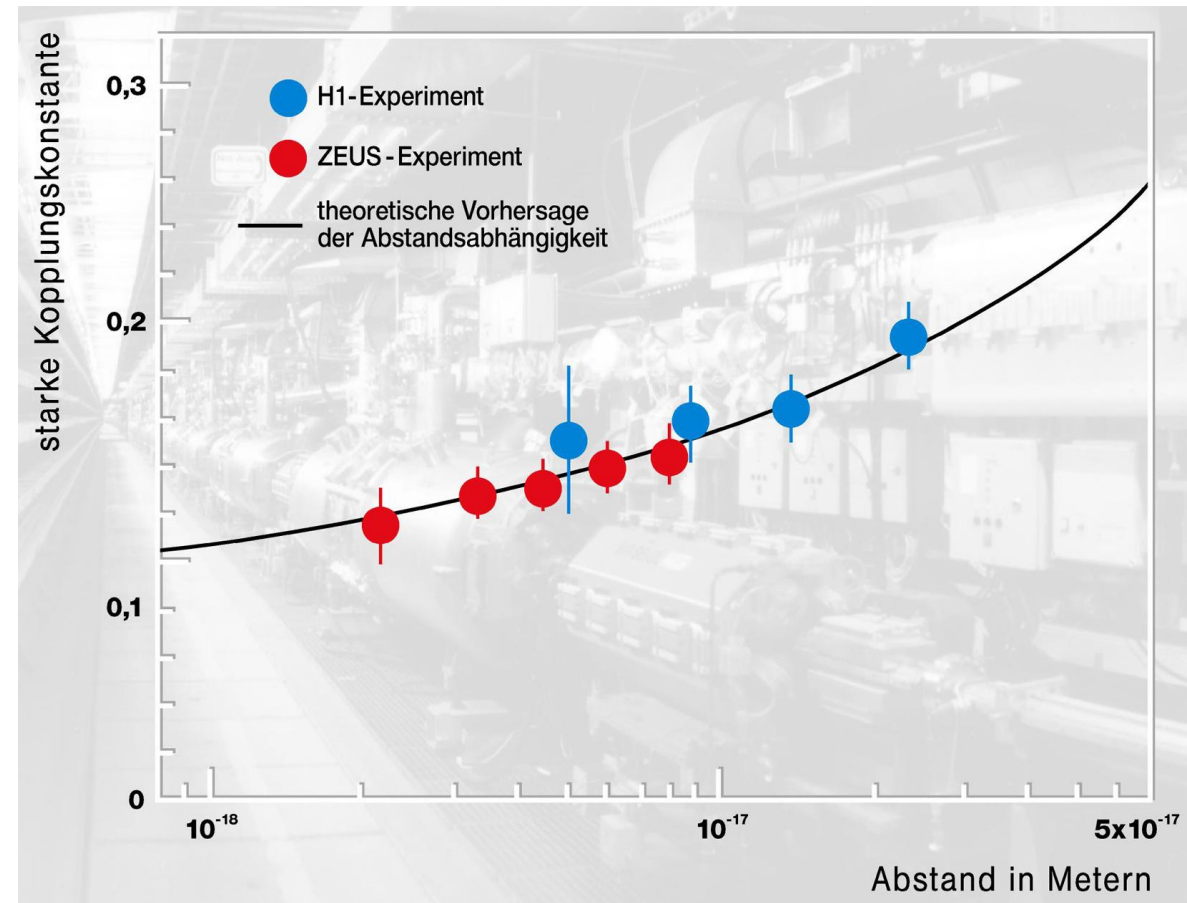
$$\alpha_s(Q) = \frac{\alpha_s(\mu)}{1 + \frac{33 - 2 \cdot n_f}{12\pi} \cdot \alpha_s(\mu) \cdot \ln\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)}$$

- zwei sehr eng benachbarte Quarks fühlen eine schwächere Kraft ➡ **asymptotische Freiheit**

$$\alpha_s(Q^2) \xrightarrow{Q^2 \rightarrow \infty} 0$$

- zwei weit entfernte Quarks fühlen eine deutlich stärkere Kraft
➡ **Confinement in Hadronen**
 - für kleine Werte von Q gilt

$$\alpha_s \sim 100 \cdot \alpha$$



starke Kopplungskonstante $\alpha_s(Q)$

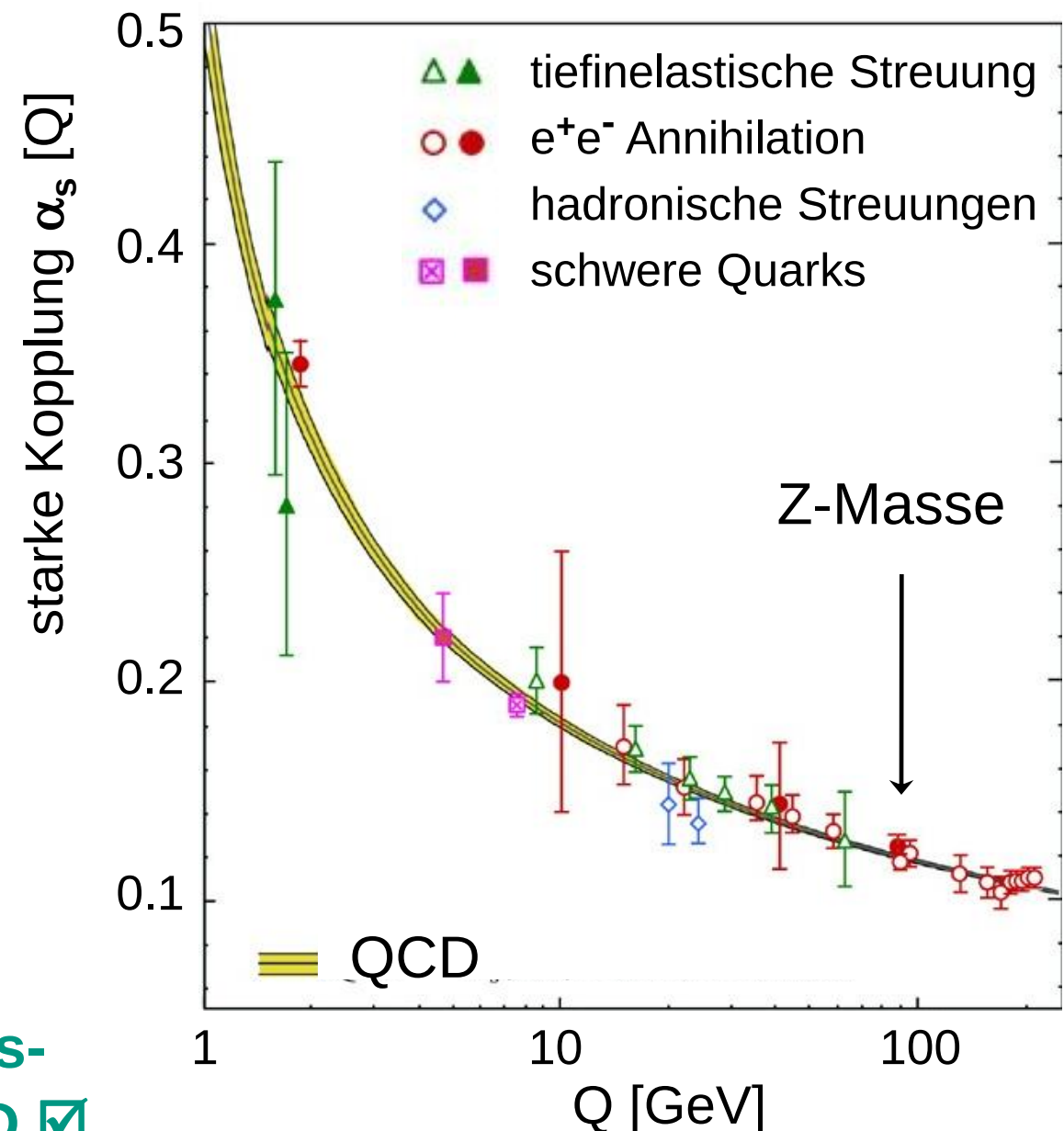
- - Zusammenfassung der bei verschiedenem Q-Werten gemessenen Kopplungs-Parameter & Vergleich mit QCD
- Energie-Bezugspunkt ist die Ruhemasse des Z-Bosons M_Z :

$$\alpha_s(M_Z) = 0.1189 \pm 0.0010$$

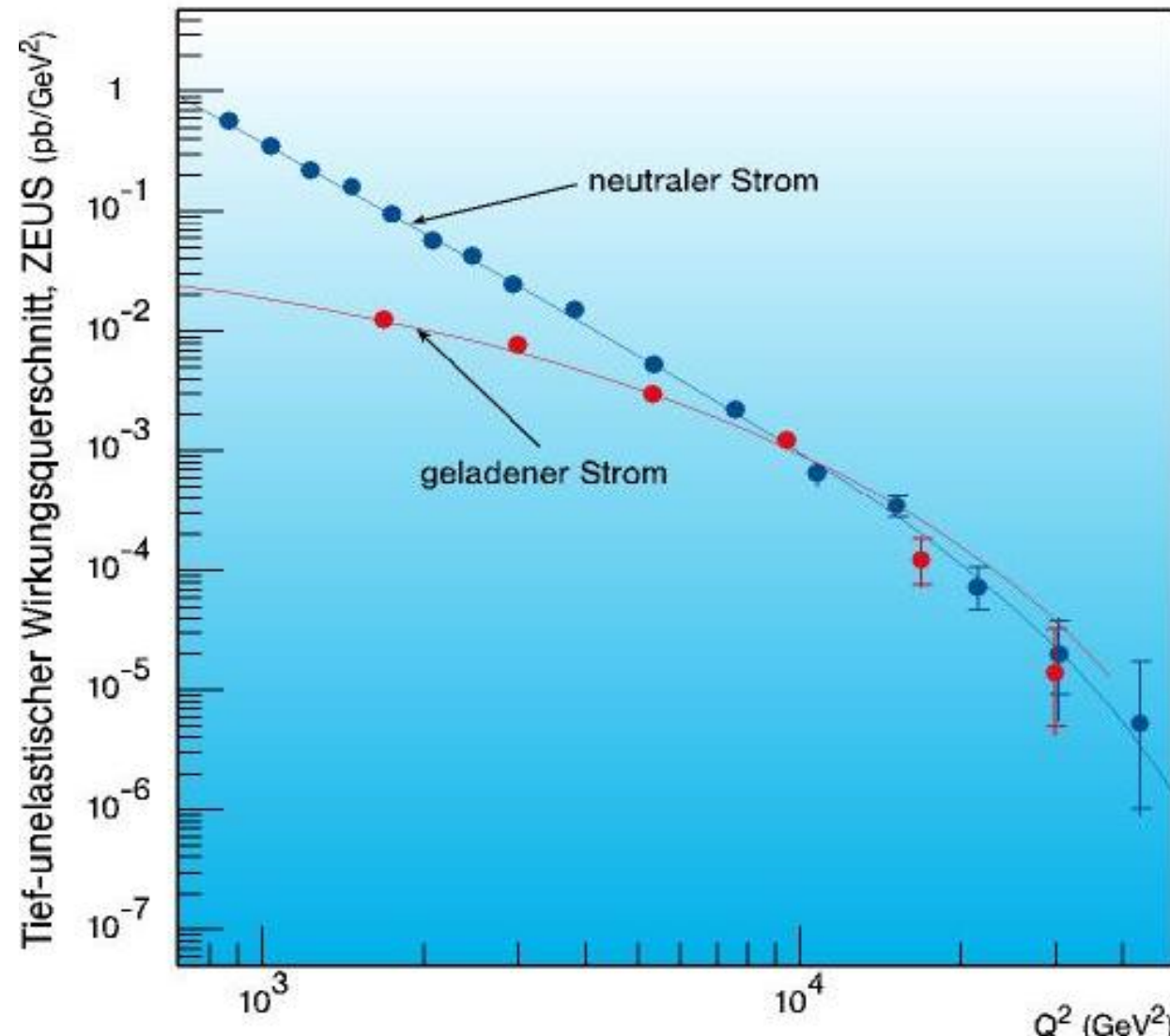
- - da α_s implizit auch von der Zahl der **Farbfreiheitsgrade N_c** abhängig ist, kann aus den experimentellen Daten nach einer Anpassung der Wert von N_c bestimmt werden:

$$N_f = 3.03 \pm 0.12$$

**3 Farbfreiheits-
grade der QCD** ✓

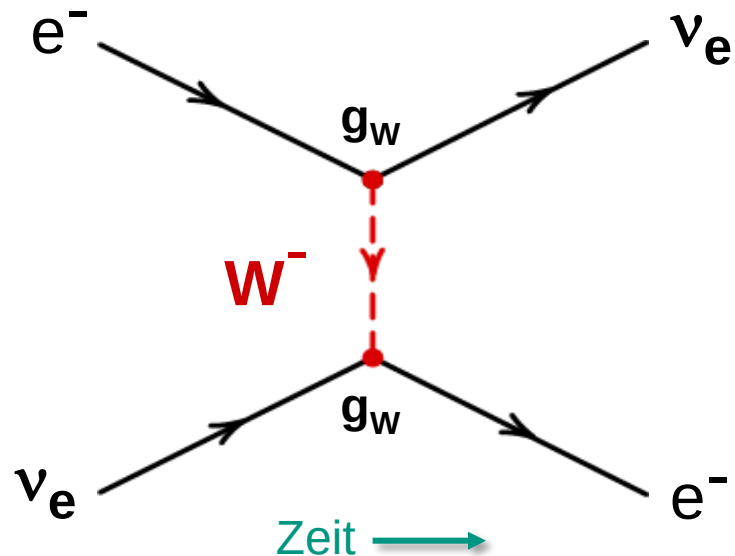


- eine zentrale Säule des Standardmodells (SM) ist die Vereinheitlichung von elektromagnet. & schwacher Ww. zur **elektroschwachen Wechselwirkung**



- eine wichtige Vorhersage des Glashow-Weinberg-Salam Modells war die Existenz von **schwachen neutralen Strömen (weak neutral currents, NC)**
NCs werden durch den Austausch von **massiven Z^0 -Bosonen** vermittelt
- bei hohen Energien (HERA) lässt sich experimentell direkt die Vereinheitlichung der Stärke der beiden Wechselwirkungen beobachten

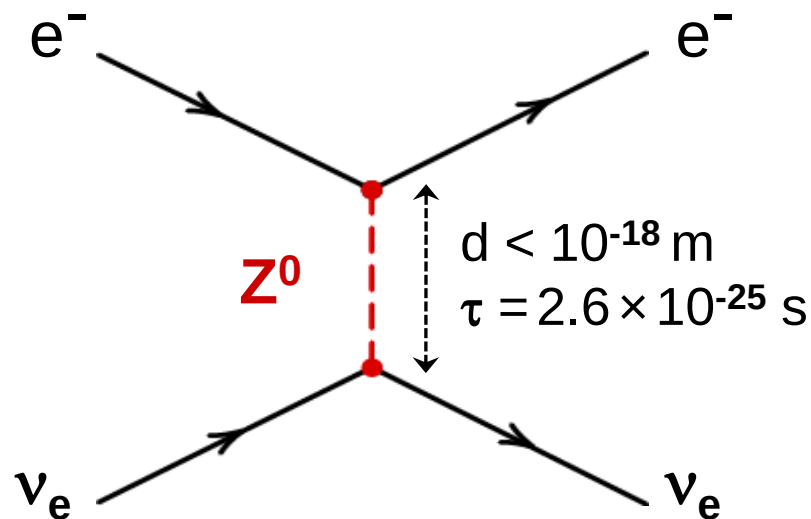
Intermediäre Vektorbosonen $J^P = 1^-$



Geladene Ströme

‘**charged current**’ (CC) Reaktionen

- Ladungstransfer durch Austausch von geladenen $W^+ W^-$ Bosonen ($M = 80.42 \text{ GeV}$)
- vermittelt Übergänge in einem schwachen Isospindublett ($u \leftrightarrow d'$) ($e^- \leftrightarrow \nu_e$)



Neutrale Ströme

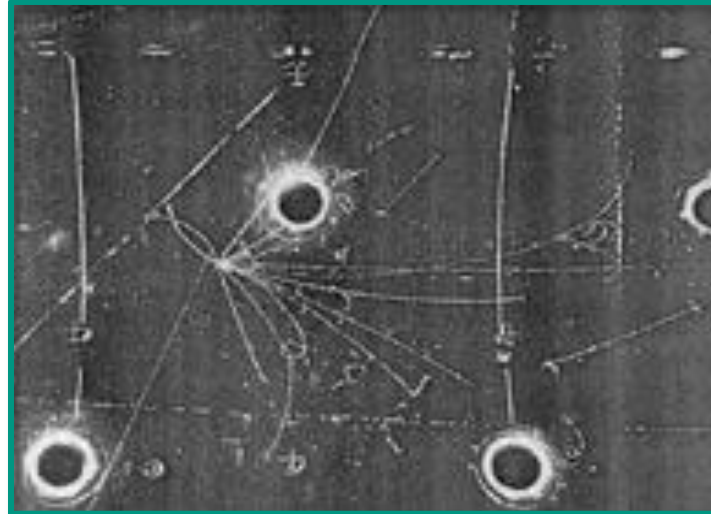
‘**neutral current**’ (NC) Reaktionen

- kein Ladungstransfer, Austausch von neutralen Z^0 Bosonen ($M = 91.19 \text{ GeV}$)
- Flavour-Universalität des NC: identische Kopplung ν_e, ν_μ, ν_τ an Z^0

geladene & neutrale schwache Ströme

- 1973: erster Nachweis von neutralen Ströme am CERN mit Gargamelle

Gargamelle Blasenkammer (Target: 20 t Freon, $\ell = 4.8$ m, $\varnothing = 1.9$ m)

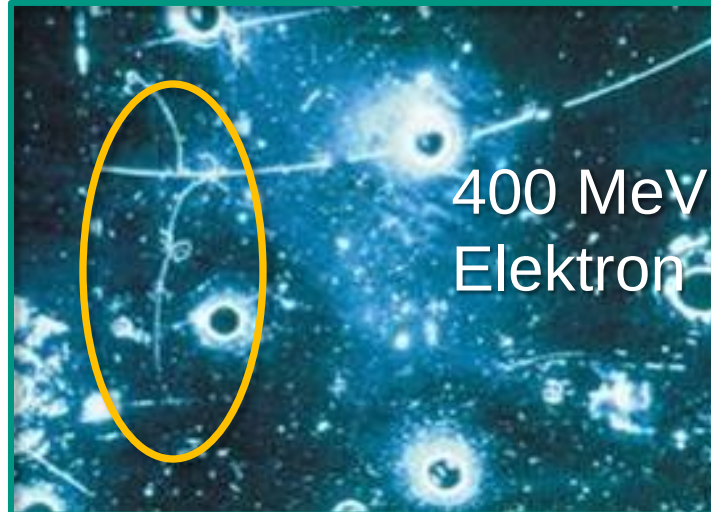


geladener Strom: W^+ , W^-

Untersuchung tiefinelastischer Reaktionen an Kernen

$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + \text{Hadronen}$

CC Ereignis: Identifikation durch auslaufendes Myon μ



400 MeV
Elektron

neutraler Strom: Z^0

Untersuchung von Streuungen Von Neutrinos an Elektronen

$\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$

NC Ereignis: Identifikation durch auslaufendes Elektron e

neutrale schwache Ströme

- parallel zur Suche nach neutralen Strömen bei tiefinelastischen Neutrino-Reaktionen an Kernen wurden NC Ereignisse $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$ beobachtet

Analysegruppe in Aachen: visueller Scan von Teilen der ~700.000 aufgenommenen Gargamelle Bilder

