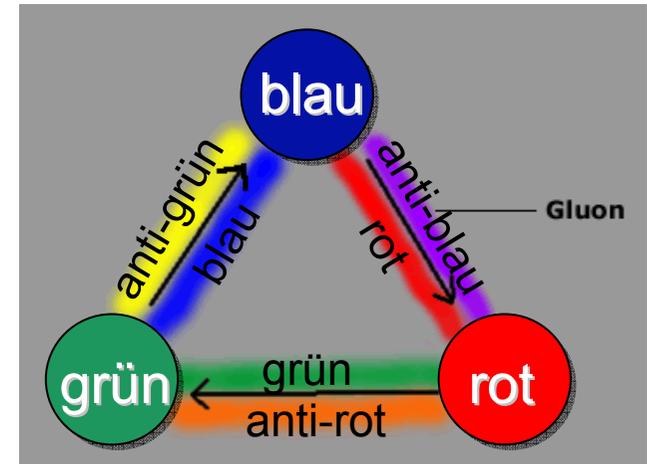


Kerne und Teilchen

Moderne Physik III

Vorlesung # 16



7. Grundlagen der Elementarteilchen-Physik

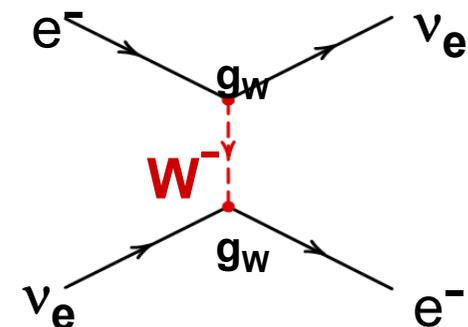
7.1 Der Teilchenzoo

7.2 Hadronen und Leptonen

7.3 Wechselwirkungen im Standardmodell

- starke Wechselwirkung

- elektromagnetische und schwache Wechselwirkung



Mesonen – Zerfälle durch Starke WW:

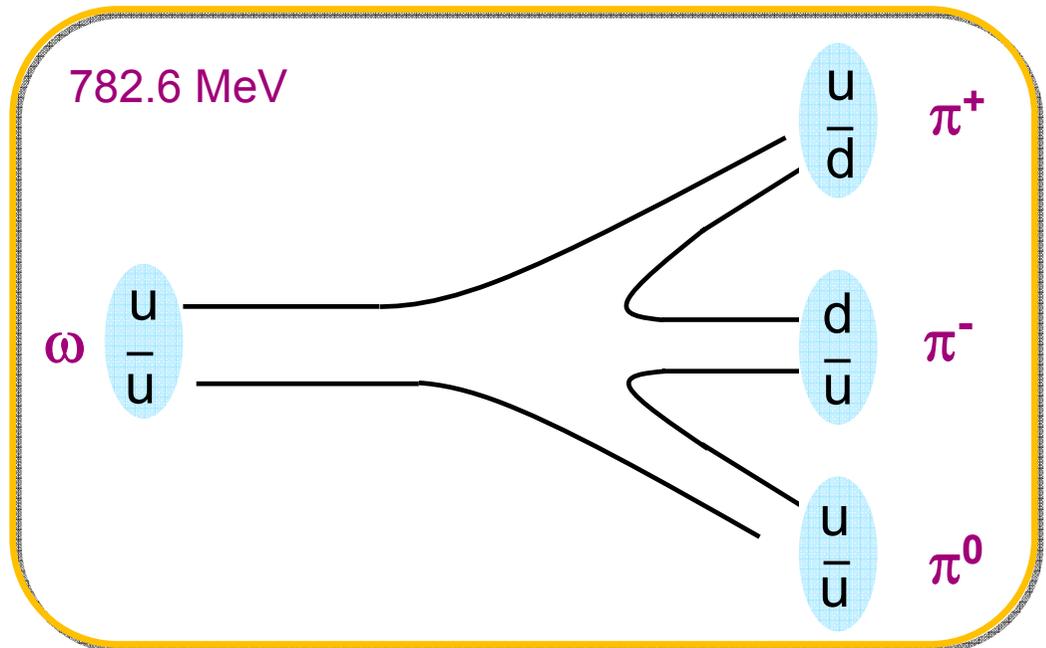
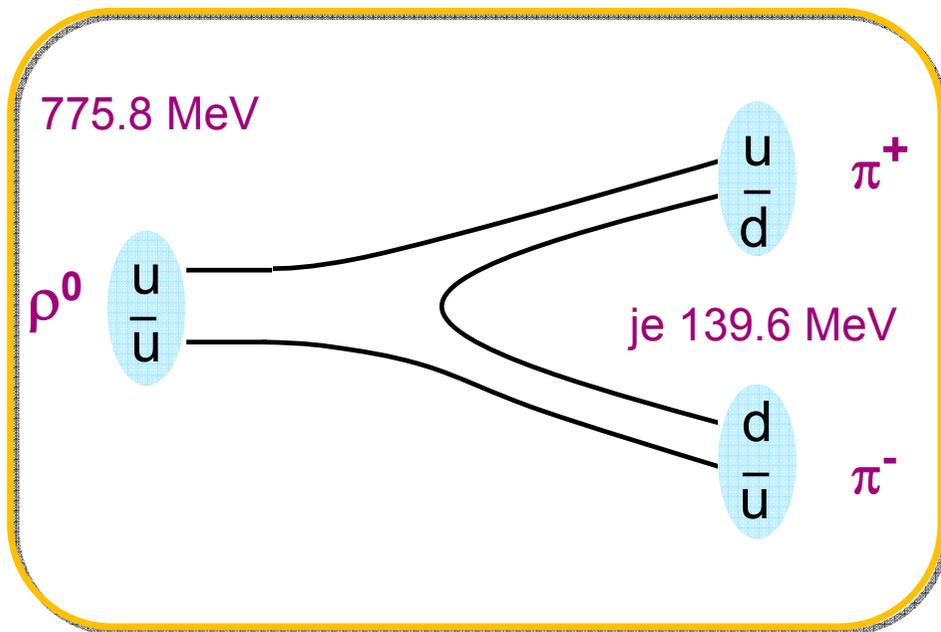
- Zerfälle durch die starke Wechselwirkung am Beispiel der ρ^0 - und ω Mesonen

$$\rho^0(770) = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\bar{d} - u\bar{u}\rangle$$

$$\omega(782) = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\bar{d} + u\bar{u}\rangle$$

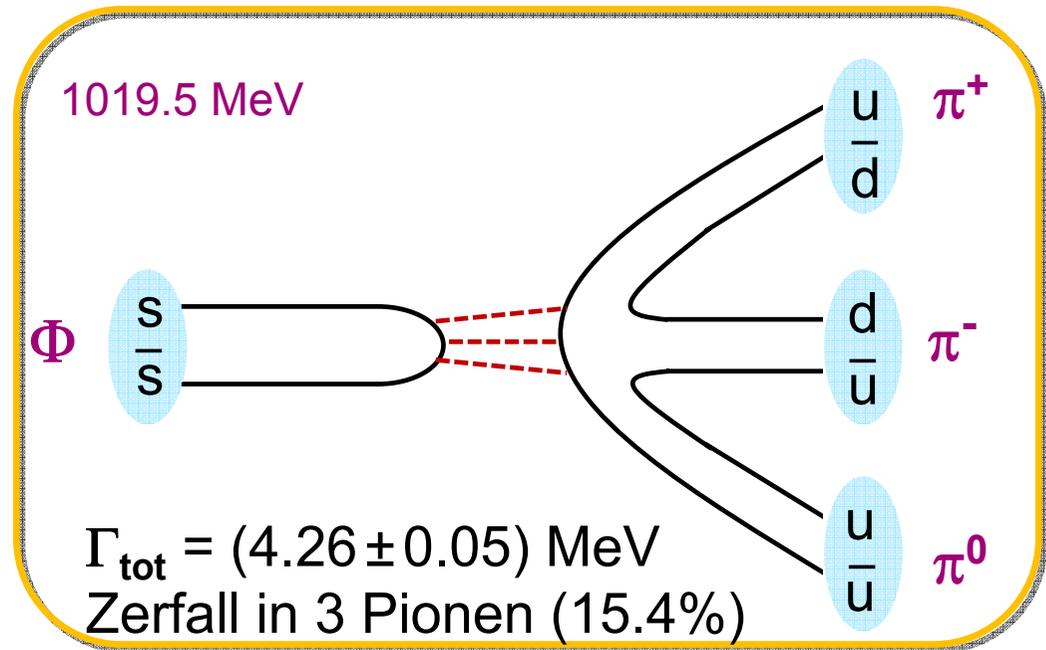
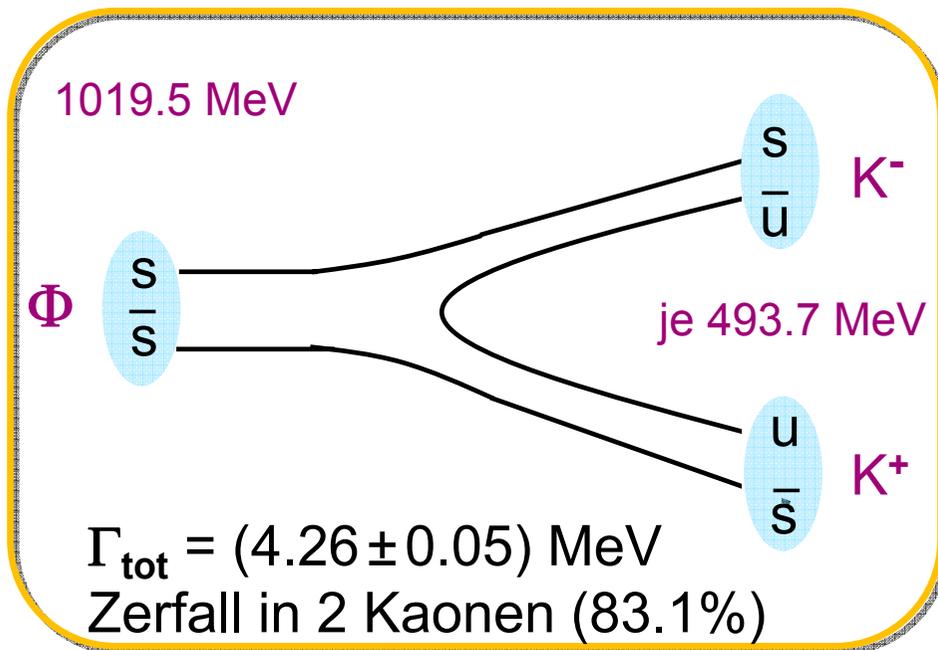
$\tau = 4.3 \cdot 10^{-24}$ s $\Gamma = (150.3 \pm 1.6)$ MeV
Zerfall in 2 Pionen (fast 100%)

$\tau = 7.8 \cdot 10^{-23}$ s $\Gamma = (8.5 \pm 0.1)$ MeV
Zerfall in 3 Pionen (89.1%)



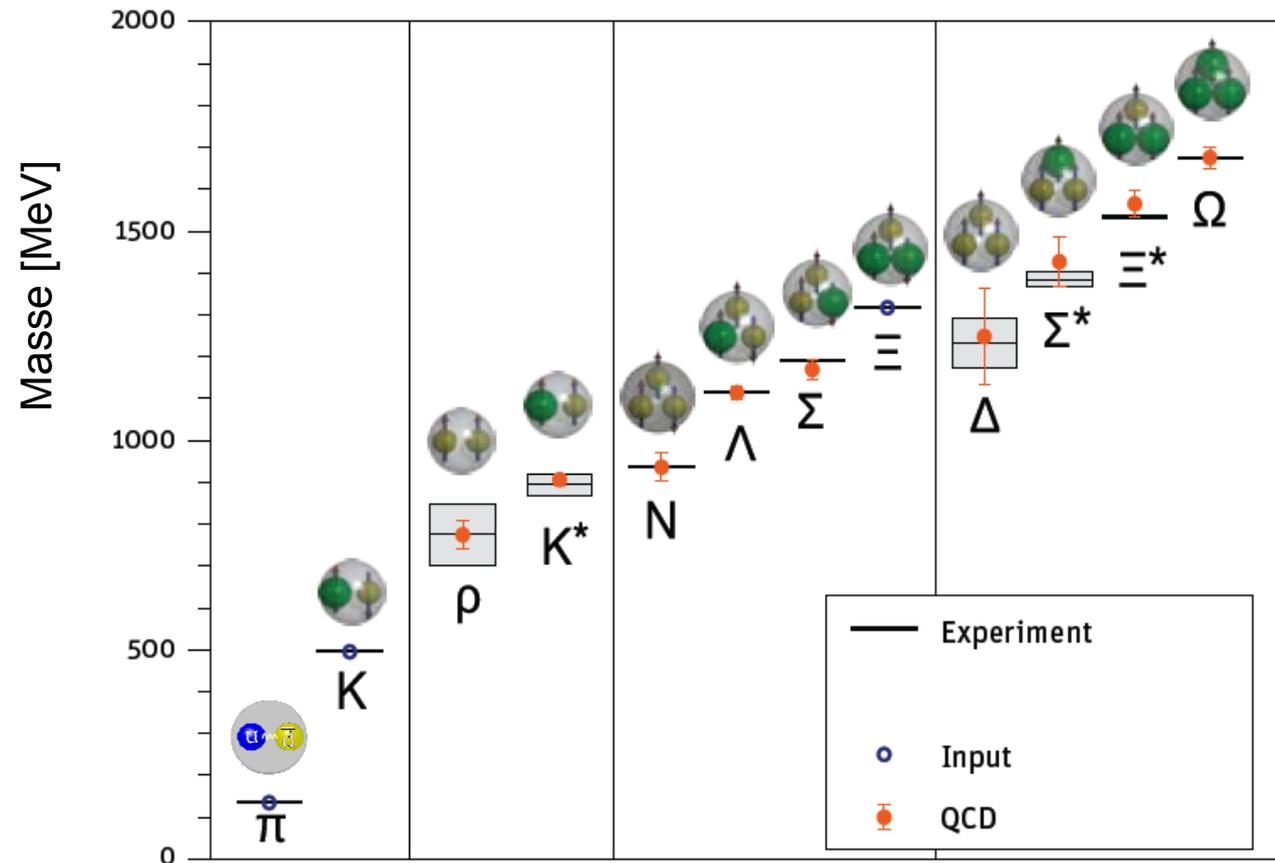
Zweig-Regel

- Bei den Zerfällen von schwereren Mesonen, z.B. des $\Phi(1020)$, ist der Quark-Inhalt der Mesonen im Endzustand wichtig (mit/ohne Strangeness)
- Zerfall eines Φ Vektor-Mesons: $\sim 83\%$ in $K^+ K^-$, nur $\sim 15\%$ in drei Pionen $\pi^+ \pi^- \pi^0$
- Zerfall in $K^+ K^-$: durchgezogene $s\bar{s}$ - Quarklinien
- Zerfall in $\pi^+ \pi^- \pi^0$: nicht durchgezogene $s\bar{s}$ - Quarklinien
- „Zweig-Regel“ \rightarrow geringe Zerfalls-Breite von schweren Mesonen



Massenspektrum von Baryonen/Mesonen

- Das beobachtete Massenspektrum von Baryonen und Mesonen kann heute mit wenigen Input-Massen durch modernen QCD Methoden gut nachgebildet werden



Existenz von exotischen Hadronen?

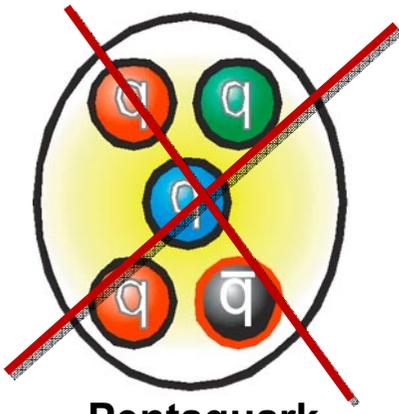
- Zahlreiche Suchen nach **exotischen Baryon- & Mesonzuständen**



normales Baryon



normales Meson



Pentaquark



Tetraquark

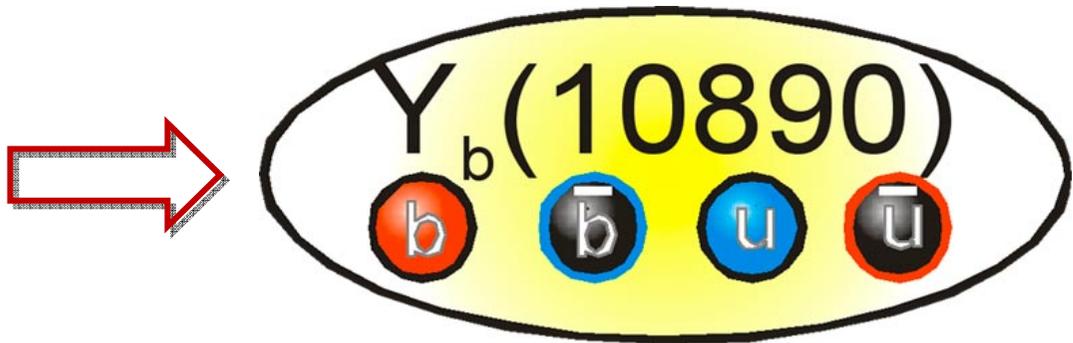


Glueball



Hybridmeson

- Quantenchromodynamik (QCD) erlaubt die Existenz z.B. von Tetraquarks
2010: Resultate des BELLE Experiments in Japan können als möglicher Hinweis für ein Tetraquark gedeutet werden



Evidence grows for tetraquarks

Physics world Apr 27, 2010

7.3 Wechselwirkungen im Standardmodell

- Im Standardmodell werden Wechselwirkungen durch Eichsymmetrien beschrieben:

Vereinheitlichung von **elektromagnetischer** & **schwacher Wechselwirkung** zur **elektroschwachen Wechselwirkung** (zentrale Vorhersage: Existenz

von neutralen schwachen Strömen mit einem massiven Z^0 Eichboson)

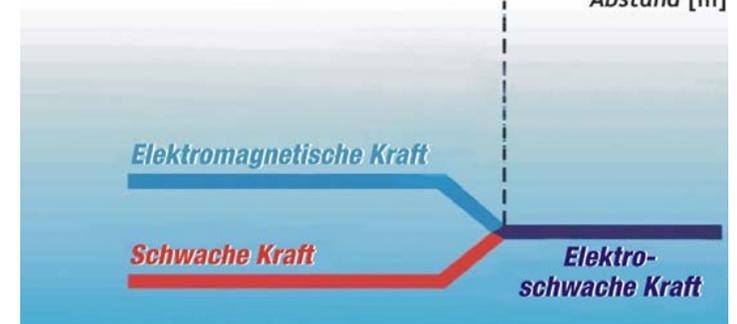
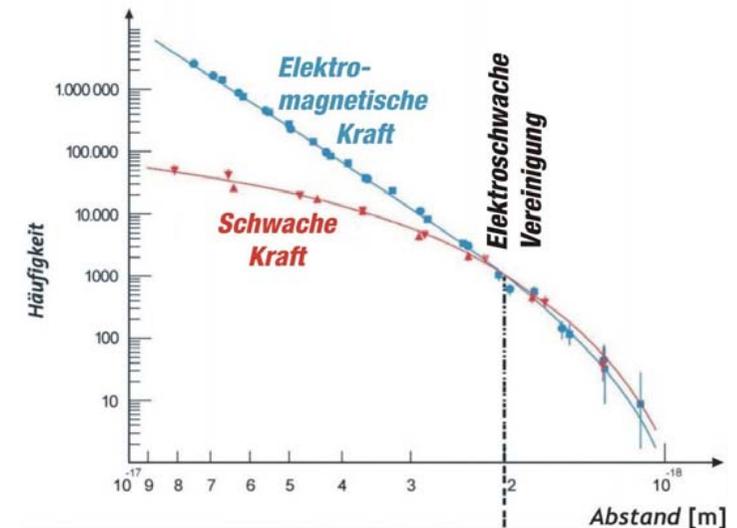
- starke Wechselwirkung : Quantenchromodynamik

- elektroschwache Wechselwirkung: Weinberg-Salam-Glashow Modell

Fernziel: große Vereinheitlichung (**Grand Unified Theories, GUTs**)

Wechselwirkung	Boson	Masse [GeV]	rel. Stärke [3×10^{-17} m]	Reichweite [m]	Potenzial
stark	Gluonen	0	60	$2.5 \cdot 10^{-15}$	$\alpha r^{-1} + \beta r$
elektromagnet.	Photon	0	1	∞	$1/r$
schwach	W^+ W^- Z^0	80.4 91.2	10^{-4}	$\sim 10^{-18}$	$\delta(r)$

- Die theoretischen Vorhersagen des Standardmodells stehen mit allen experimentellen Resultaten in sehr guter Übereinstimmung (Ausnahme: endliche Neutrinomassen)
- kosmologische Beobachtungen (Dunkle Materie, dunkle Energie, Materie/Antimaterie Asymmetrie) deuten auf Physik jenseits des Standardmodells hin (**BSM**, **B**eyond the **S**tandard **M**odel, z.B. Supersymmetrie)



Sheldon Lee
Glashow



Abdus
Salam



Steven
Weinberg



Nobelpreis
1979

„for their contributions to the unified weak & electromagn. Interactions of elementary particles“

A) Starke Wechselwirkung

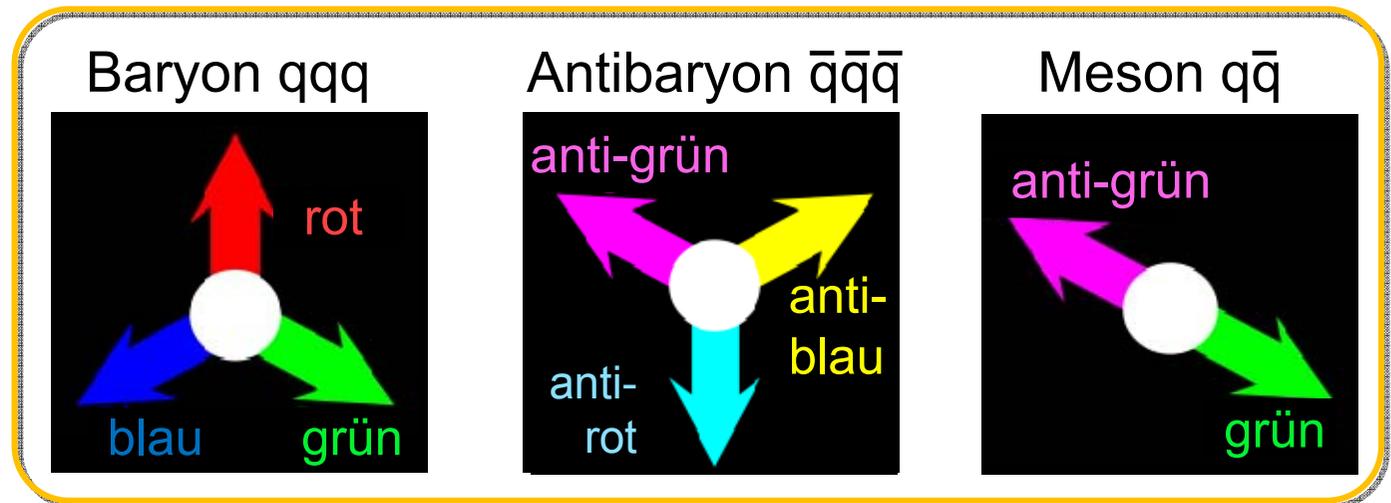
- Baryonen und Mesonen sind nach außen stets QCD - 'farbneutrale' Objekte, d.h. alle **Hadronen** befinden sich in einem **Farb-Singulett-Zustand**

Baryonen: 3 Farben (**rgb**)

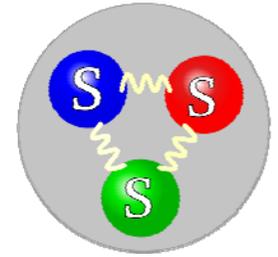
Mesonen: 1 Farbe & 1 Anti-Farbe

- Für Mesonen ergeben sich damit folgende 'Farb-Wahrscheinlichkeiten'
 - $\frac{1}{3}$ für rot-antirot,
 - $\frac{1}{3}$ für blau-antiblau
 - $\frac{1}{3}$ für grün-antigrün

- Der Farbzustand von Quarks ändert sich andauernd durch den Austausch von Gluonen (tragen ebenfalls Farbe)



Farbe als Freiheitsgrad & Pauli-Prinzip



- Der **Farb-Singulett-Zustand** eines Baryons ist wichtig zur Erfüllung eines verallgemeinerten Pauli-Prinzips:

die Gesamtwellenfunktion eines Baryons muss unter Berücksichtigung aller Quark-Freiheitsgrade antisymmetrisch sein

- Die Δ^{++} Resonanz (uuu) & das Ω^- (sss) verletzen ohne die Existenz des Farb-Freiheitsgrades das Pauli-Prinzip, Beispiel: Δ^{++} Wellenfunktion

$$\Delta^{++} = \underbrace{|u u u\rangle}_{\text{Flavour}} \cdot \underbrace{|\uparrow\uparrow\uparrow\rangle}_{\text{Spin}} \cdot \underbrace{|\ell = 0\rangle}_{\text{Orbital-}\ell} \quad \text{symmetrische Gesamtwellenfunktion}$$

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

$\varepsilon_{ijk} = +1$ für gerade Permutation
 $\varepsilon_{ijk} = -1$ für ungerade Permutation
 $\varepsilon_{ijk} = 0$ für 2 gleiche Indices (Farben)

mit **Farbfreiheitsgraden**: anti-symmetrische Δ^{++} Gesamtwellenfunktion

- Die Antisymmetrisierung am Beispiel des Δ^{++} :

$$\Psi_{Farbe} (Baryon) = \frac{1}{\sqrt{6}} \varepsilon^{ijk} q_i \cdot q_j \cdot q_k$$

Summation über die Farbindices i, j, k von 1 bis 3

Antisymmetrische Darstellung der Farbfreiheitsgrade:

$$\Psi_{Farbe} (\Delta^{++}) = \frac{1}{\sqrt{6}} |RGB + BRG + GBR - GRB - BGR - RBG \rangle$$

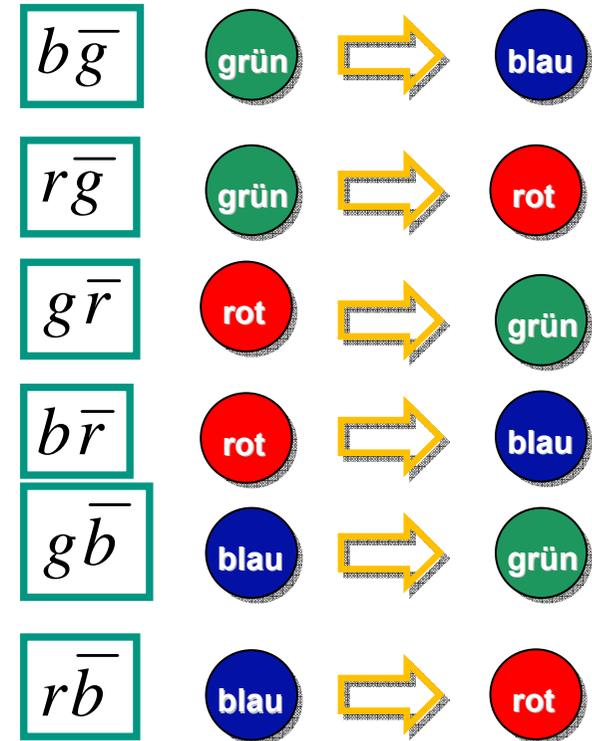
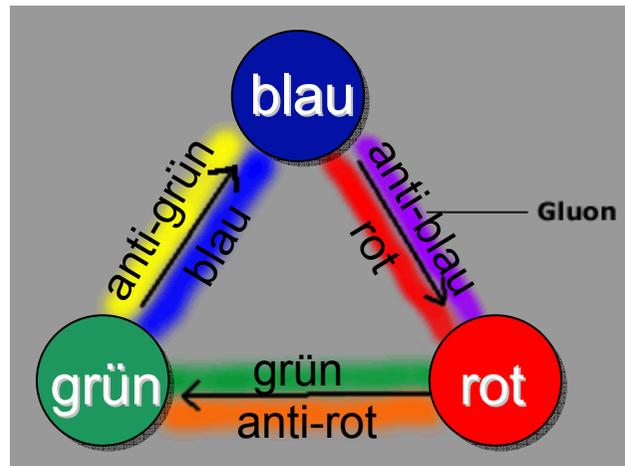
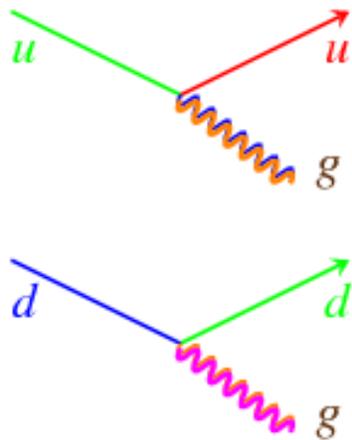
Beispiel: nach Vertauschung der beiden Farbfreiheitsgrade RG ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Psi'_{Farbe} (\Delta^{++}) &= \frac{1}{\sqrt{6}} |GRB + BGR + RBG - RGB - BRG - GBR \rangle \\ &= -\Psi_{Farbe} \end{aligned}$$

Die Gesamtwellenfunktion des Δ^{++} Baryons ist unter Berücksichtigung aller Quark-Freiheitsgrade wie gefordert antisymmetrisch

Gluonen

- In der QCD existieren **8 Gluonzustände** ('Farbzustände', '**Farboktett**'):
 - alle Zustände sind linear unabhängig
 - jedes Gluon ist ein **masseloses Spin 1 – Boson**
 - jedes Gluon trägt eine **Farbe + Anti-Farbe**
- In nebenstehenden Darstellung ändern die ersten 6 Gluonen die Farbe eines Quarks, die beiden farbneutralen Kombinationen ändern die Farbe bei der Emission/Absorption nicht



$$(r\bar{r} - g\bar{g}) / \sqrt{2}$$

$$(r\bar{r} + b\bar{b} - 2g\bar{g}) / \sqrt{6}$$

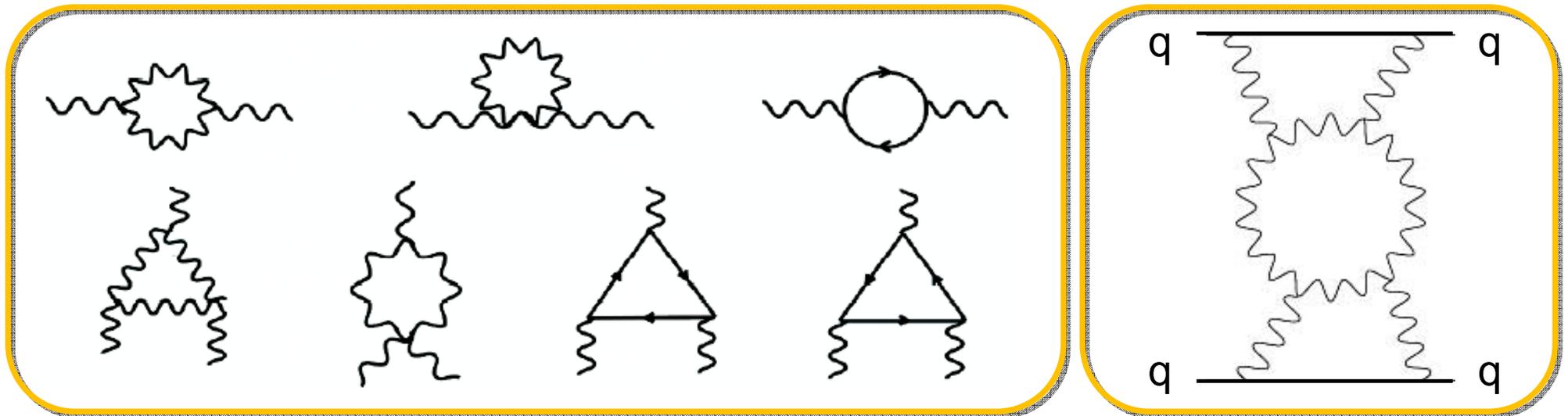
Gluonen: Selbstwechselwirkung

■ QED (Elektrodynamik):

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

■ QCD (Chromodynamik):

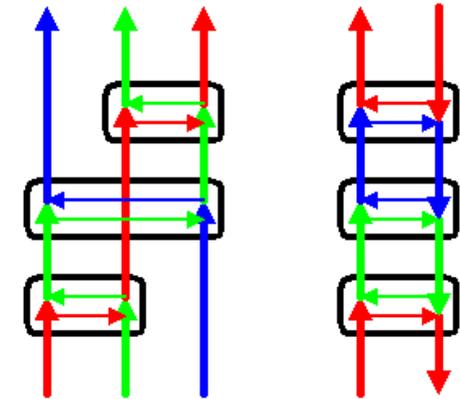
- Gluonen (g) tragen selbst QCD-Farbladungen und können daher nicht nur mit Quarks sondern auch untereinander in Wechselwirkung treten
- die Selbstwechselwirkung der Gluonen führt zum Auftreten von komplexeren **QCD-Vertexgraphen**



Farbe und $SU(3)_c$ Symmetriegruppe

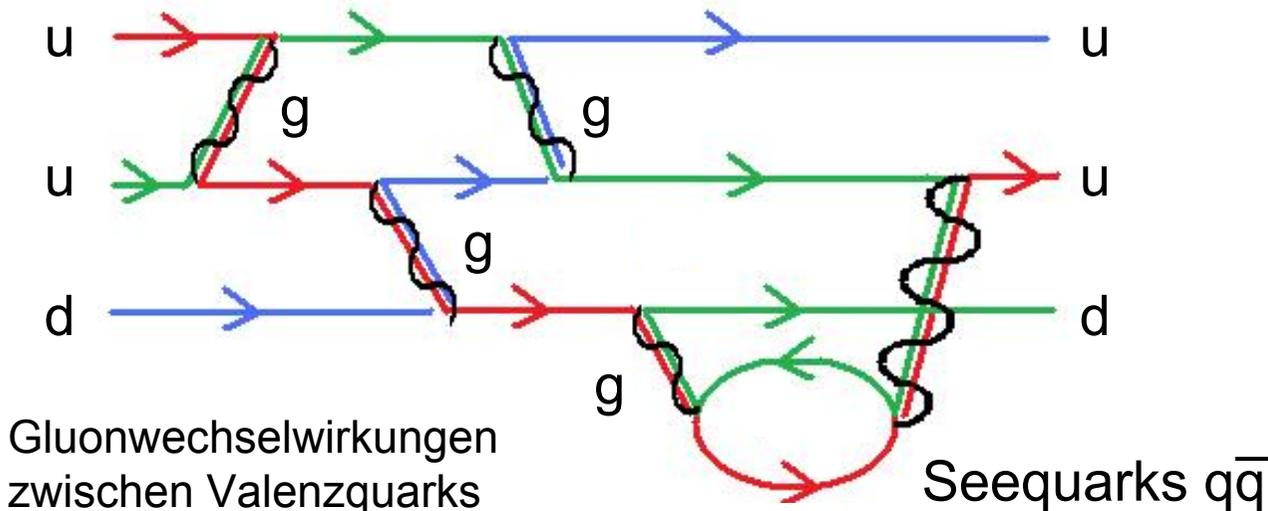
■ Regeln der **Quantenchromodynamik**:

- 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**



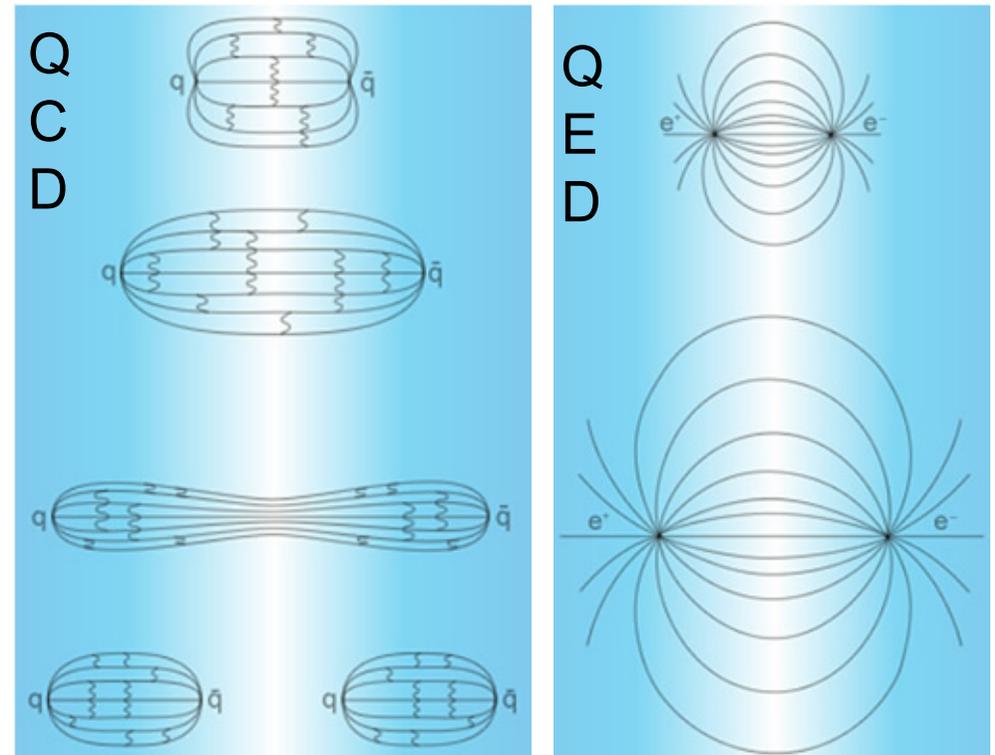
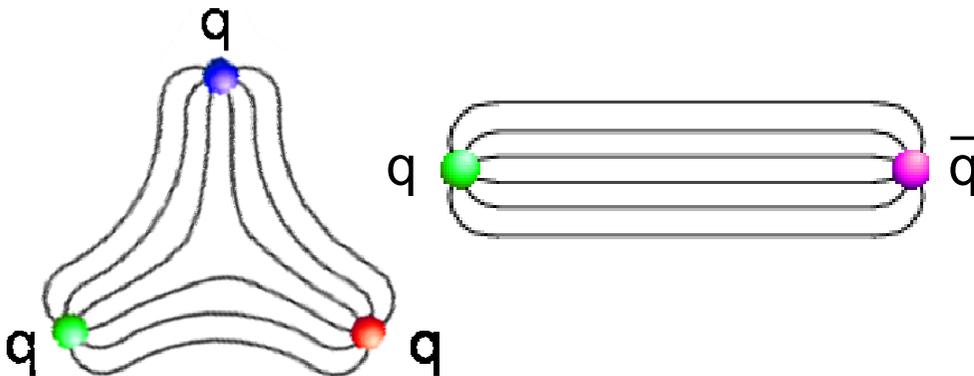
Glukonen: Fluss-Schläuche & Confinement

- Die Glukon-Glukon-Selbstwechselwirkung erzeugt bei einer räumlichen Trennung von Quarks zylindrische **Farb-Flussschläuche** mit einer konstanten Feldstärke über Länge der Fluss-Röhre
- Quark-Antiquark-Potenzialansatz mit: ① $1/r$ 'Coulombansatz' ② linearer Term

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

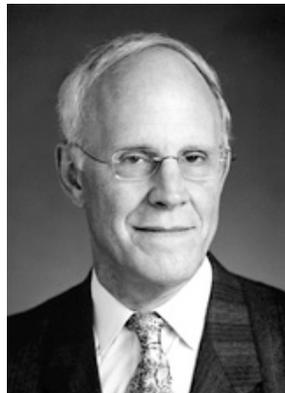
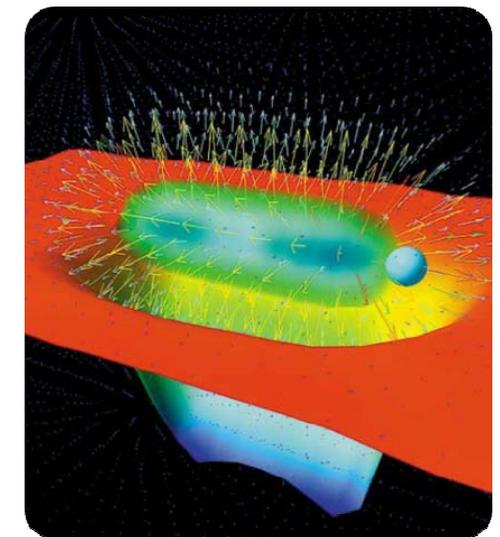
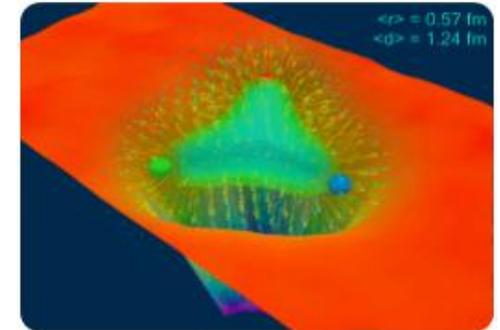
$$\kappa = 1.1 \text{ GeV/fm}$$

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



Frank Wilczek David J. Gross H. David Politzer

Nobelpreis 2004



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

Confinement & Jetstrukturen

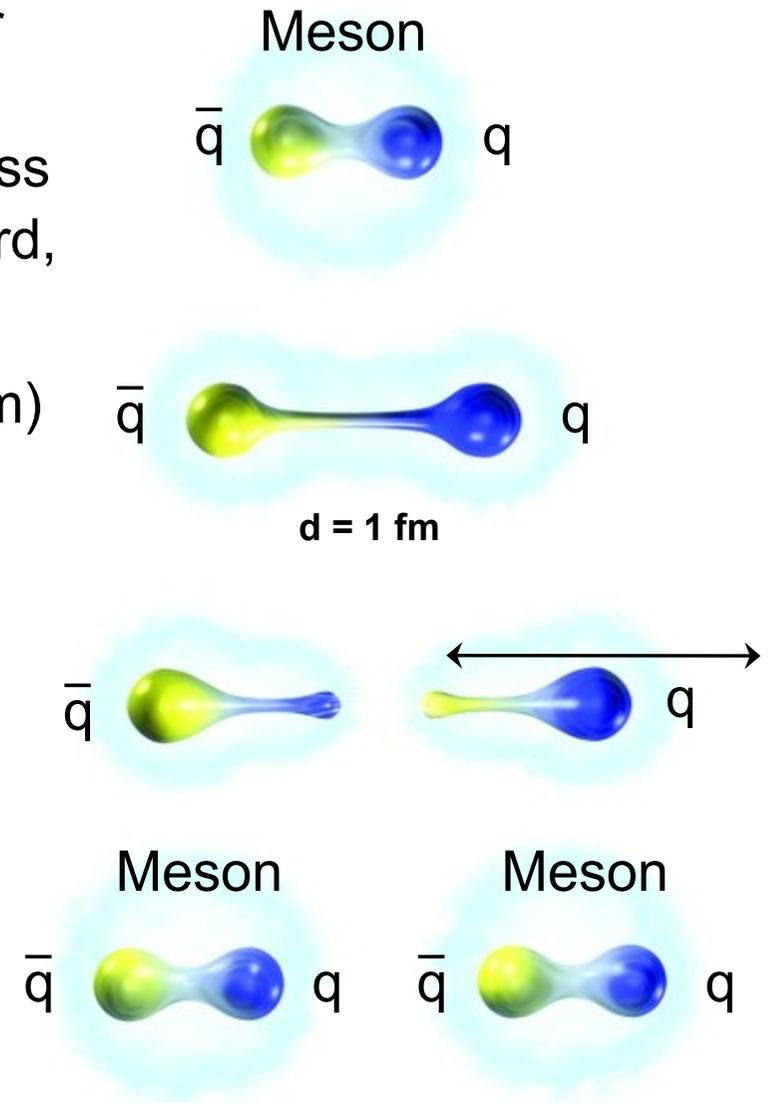
- Bei einem harten Stoßprozess wird das $q\bar{q}$ -Paar räumlich voneinander getrennt & die Energie im farbelektrischen Flussschlauch wird so groß, dass ein weiteres **Quark-Antiquark Paar** erzeugt wird, man erhält damit 2 Mesonen

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

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

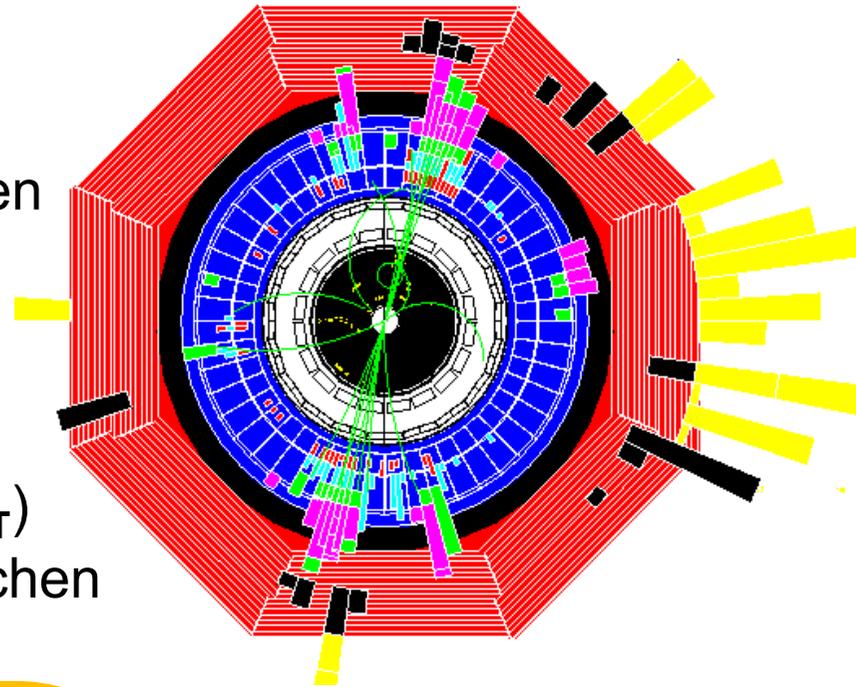
Energie ist ausreichend für neues $q\bar{q}$ -Paar

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

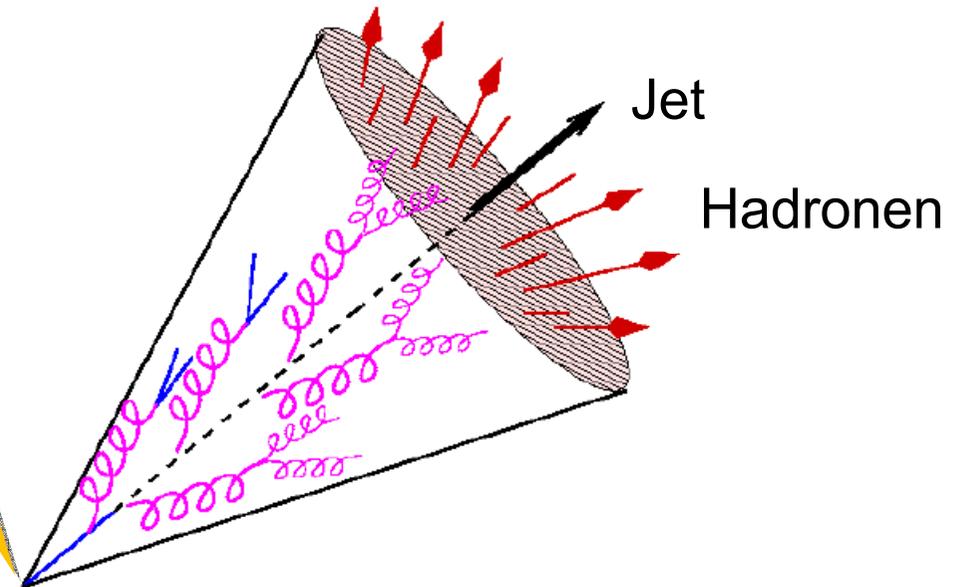
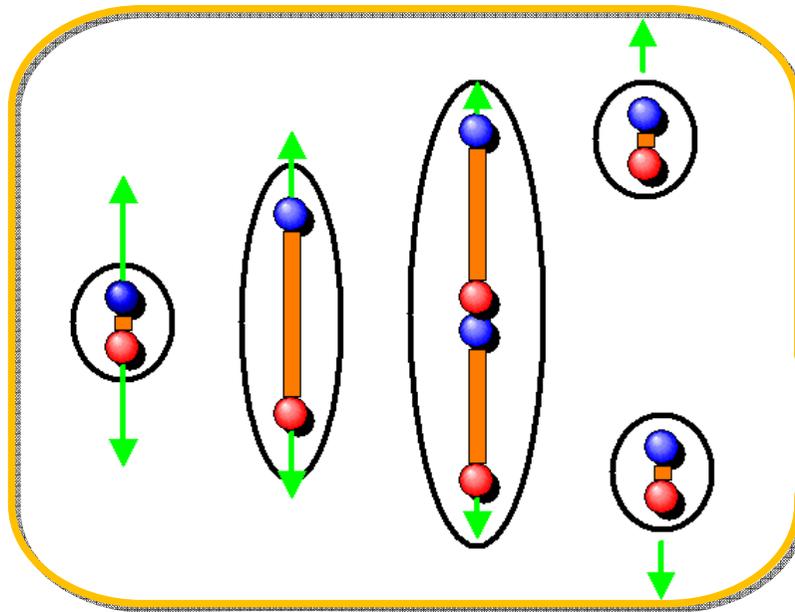


Jetstrukturen

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

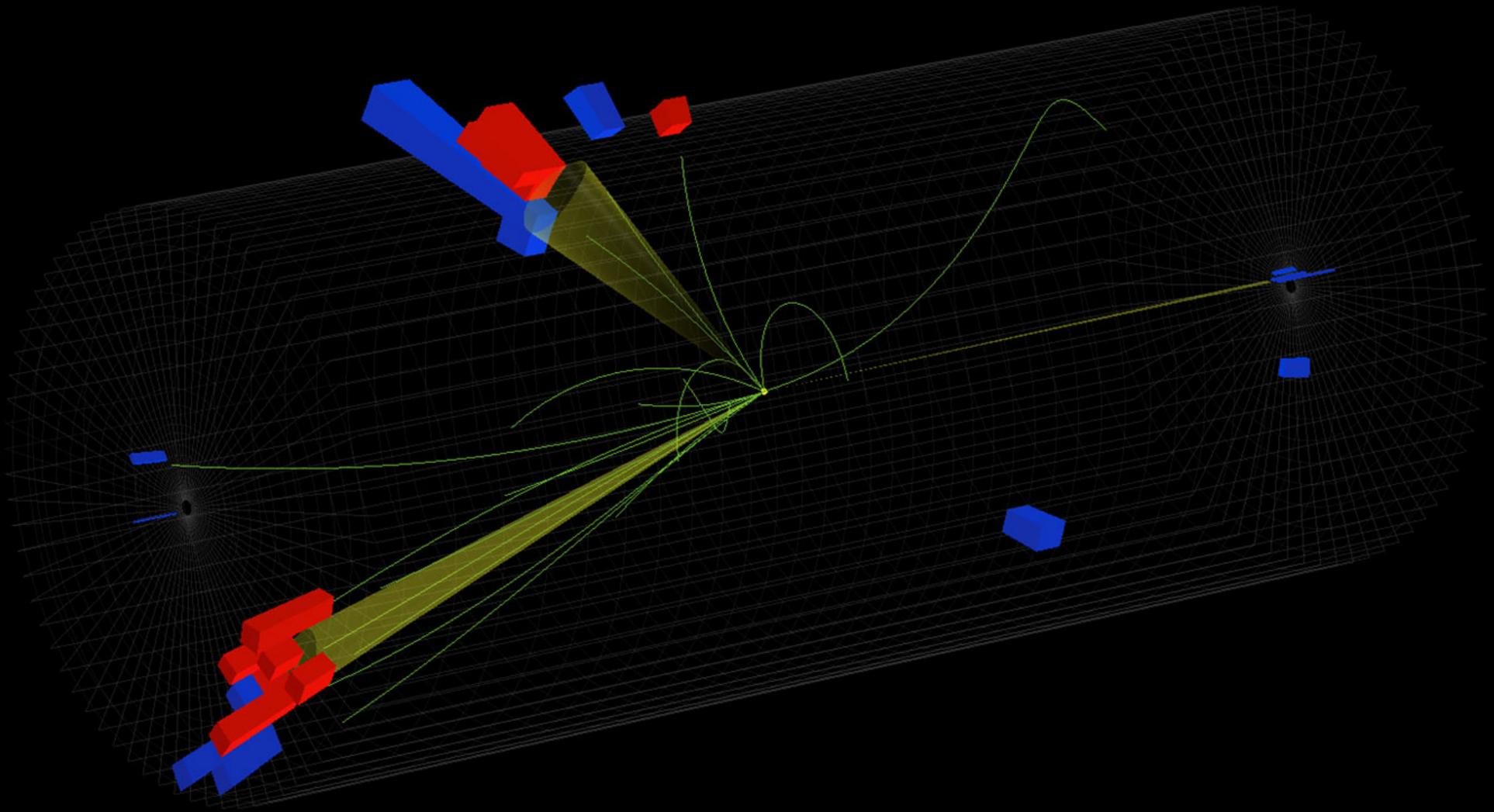


2-Jet
Ereignis
in einem
Detektor





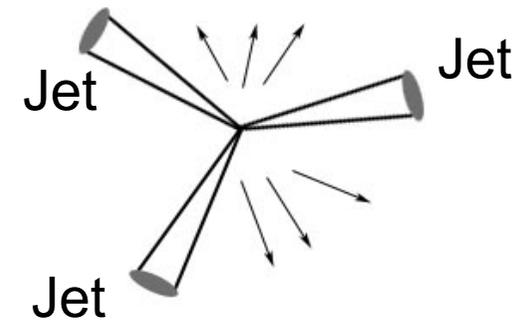
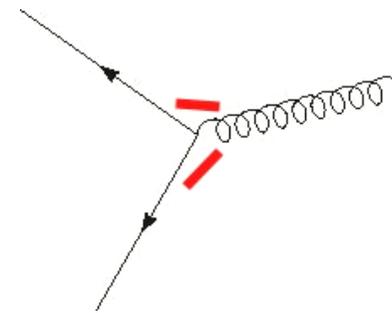
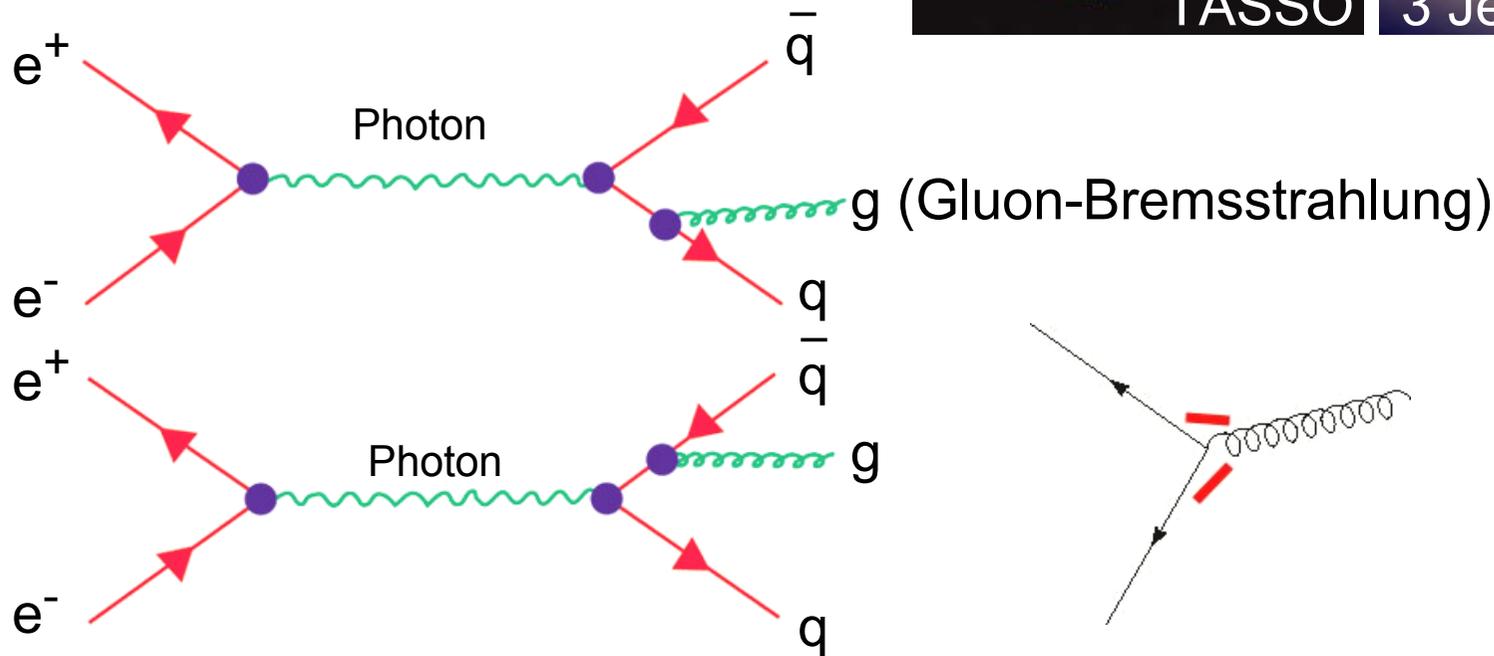
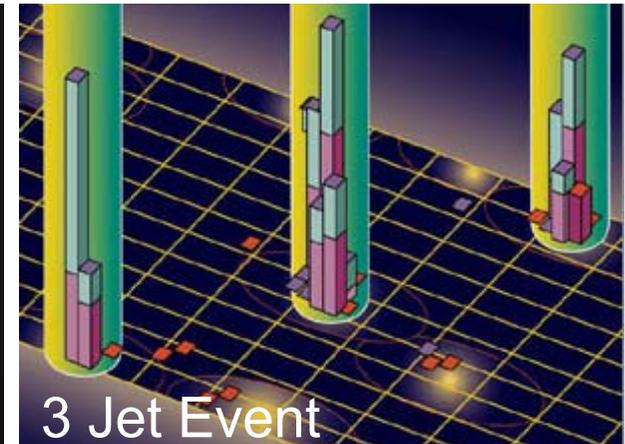
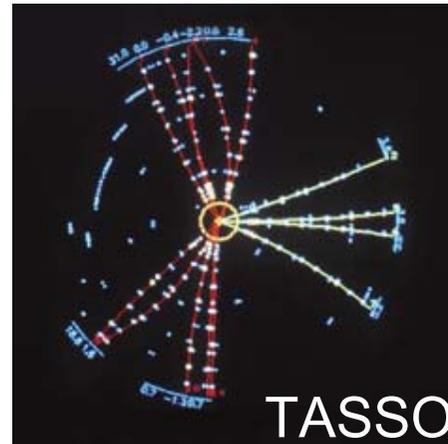
CMS Experiment at the LHC, CERN
Date Recorded: 2009-12-06 07:18 GMT
Run/Event: 123596 / 6732761
Candidate Dijet Collision Event



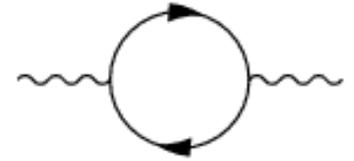
Glukonen: Nachweis in 3 Jet Ereignissen

■ Gluonnachweis am DESY:

TASSO Detektor am
PETRA e^+e^- Speicherring
Quark – Antiquark Jets und
Abstrahlung eines harten
Glukons \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: Polarisation der virtuellen Ladungswolke in Nähe der Ladung

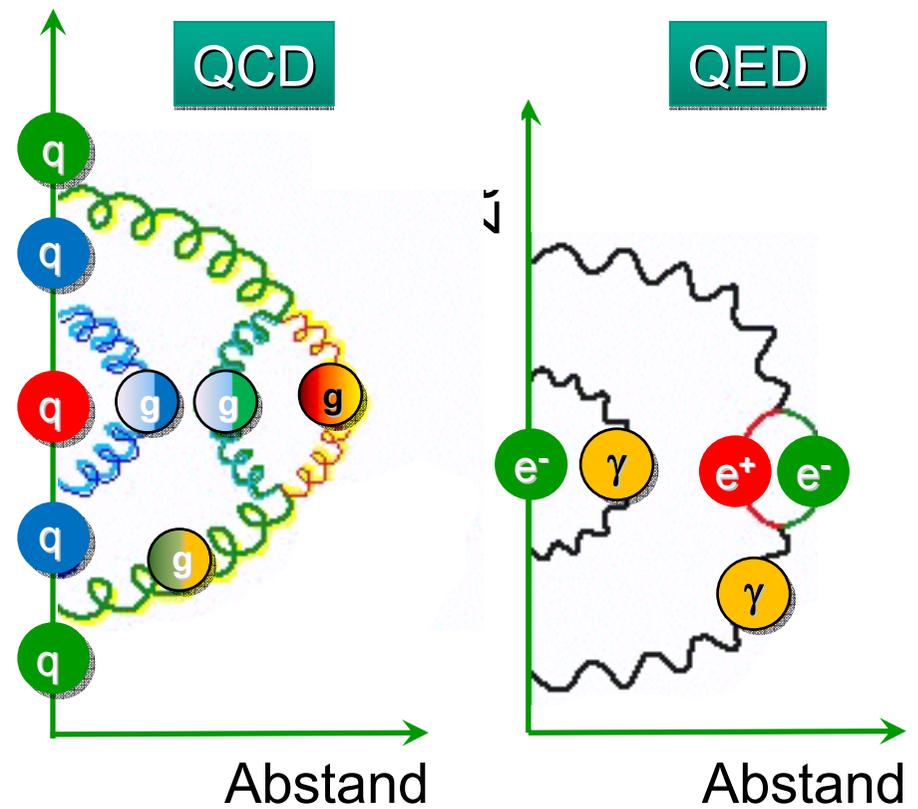
- Vakuumpolarisationen erzeugen ständig **virtuelle Teilchen-Antiteilchenpaare**
Renormierung der nackten Ladung

QED:

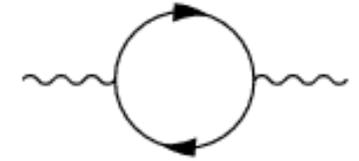
Photonen erzeugen e^+/e^- Paare

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 :

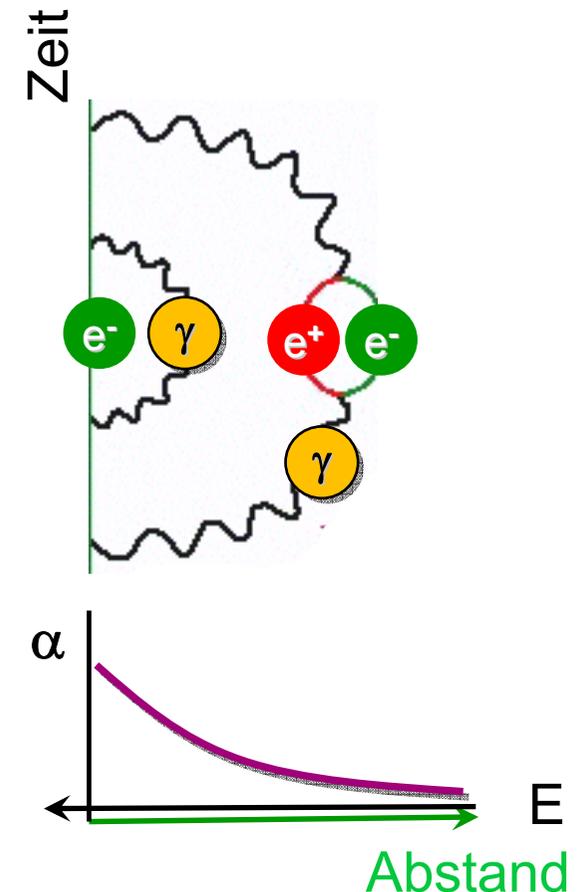
die Stärke $e^2 = \alpha$ (Feinstrukturkonstante) der elektromagnet. Wechselwirkung steigt mit der Energie an

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

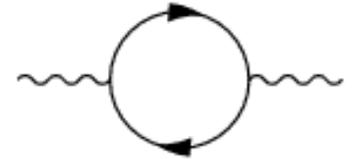
μ : Impulsübertrag

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

QED



Vakuumpolarisation in der QCD



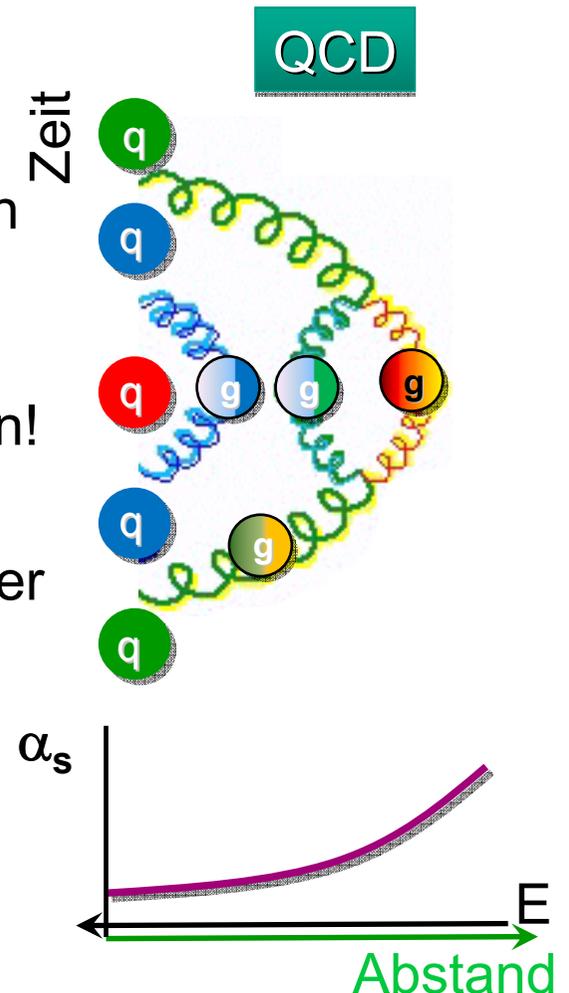
■ Quantenchromodynamik

- **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 :

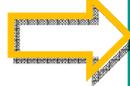
die Kopplungs´konstante´ α_s der QCD wird mit steigender Energie (d.h. bei kleineren Abständen d) durch die schwächere gluonische Anti-Abschirmung kleiner

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

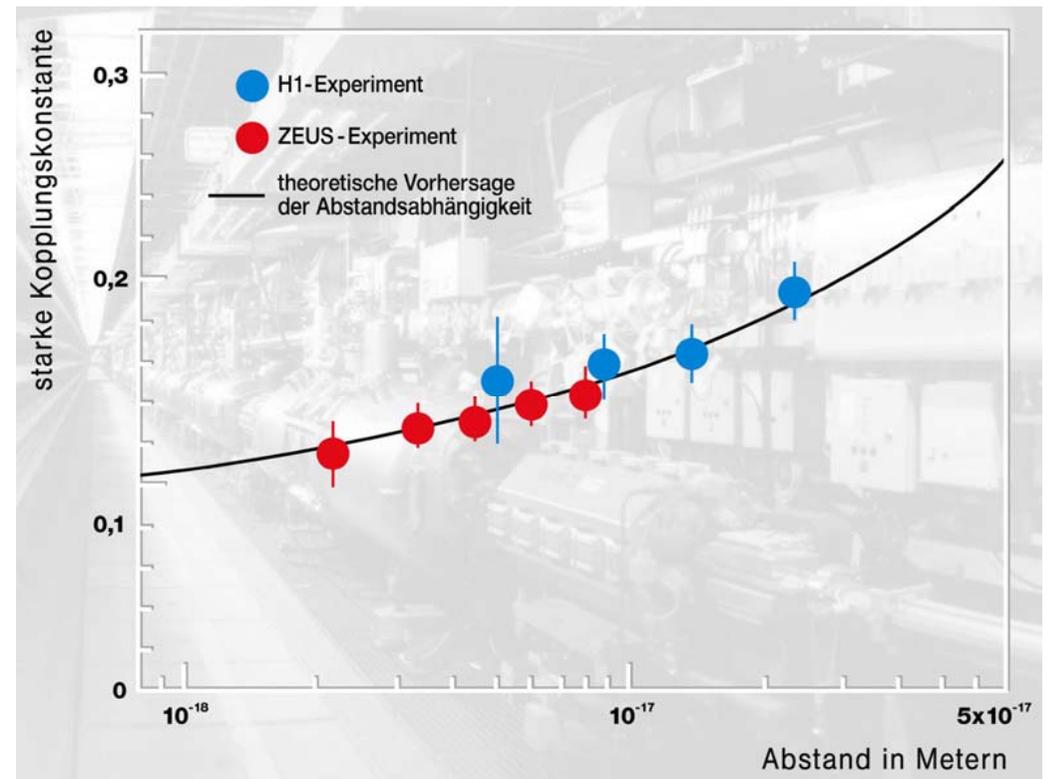


$$\alpha_s(Q) = \frac{\alpha_s(\mu)}{1 + \frac{33 - 2 \cdot n_f}{12\pi} \cdot \alpha_s(\mu) \cdot \ln\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)}$$

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

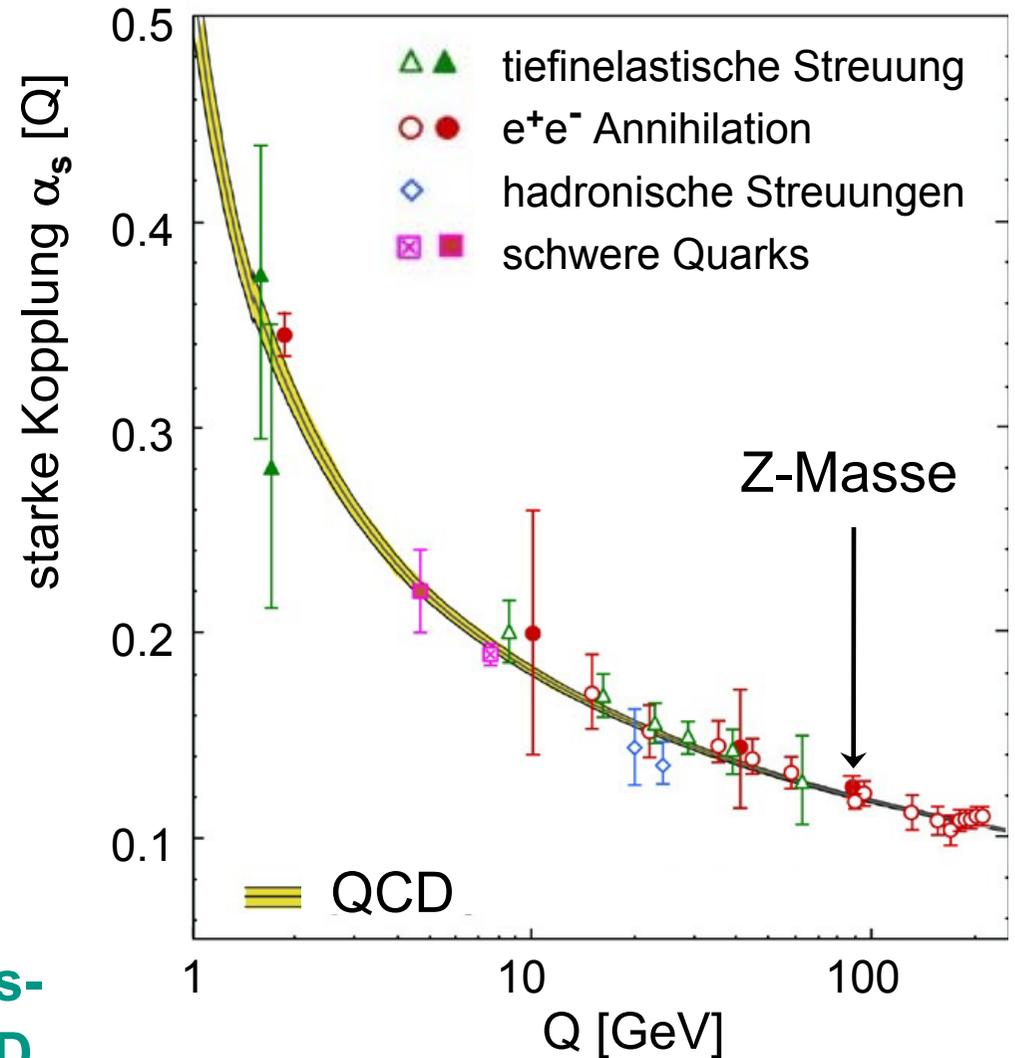


Starke Kopplungskonstante $\alpha_s(Q)$

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

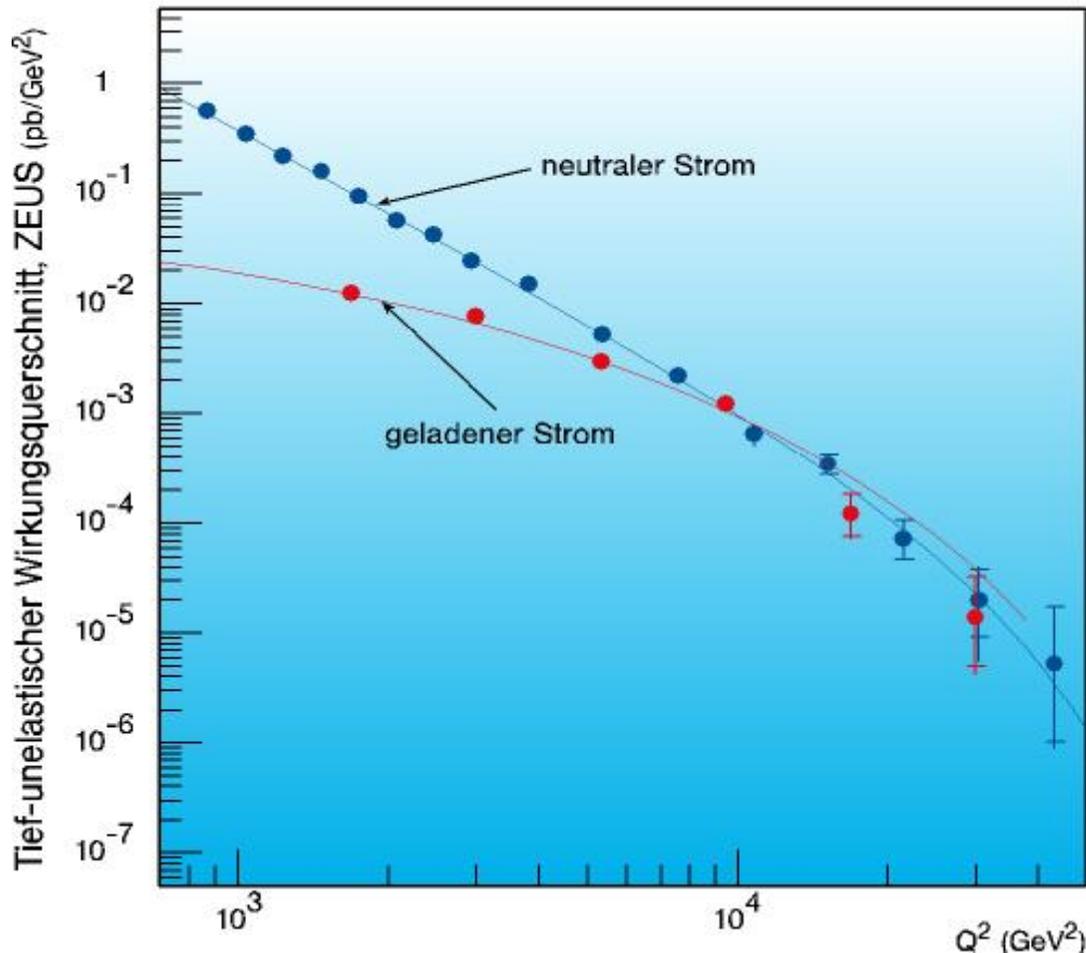
$$\alpha_s(M_Z) = 0.1189 \pm 0.0010$$

- - 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: **3 Farbfreiheitsgrade der QCD**



B) Elektroschwache Wechselwirkung

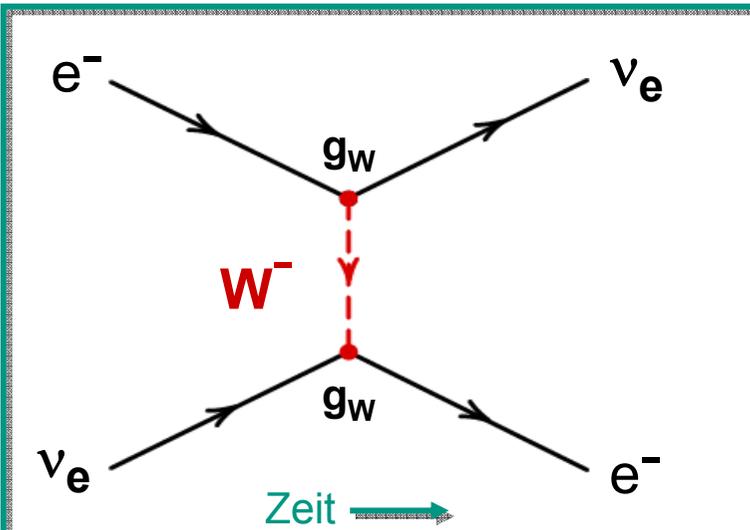
- Eine zentrale Säule des Standardmodells (SM) ist die Vereinheitlichung von elektromagnet. & schwacher Ww. zur **elektroschwachen Wechselwirkung**



- 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.

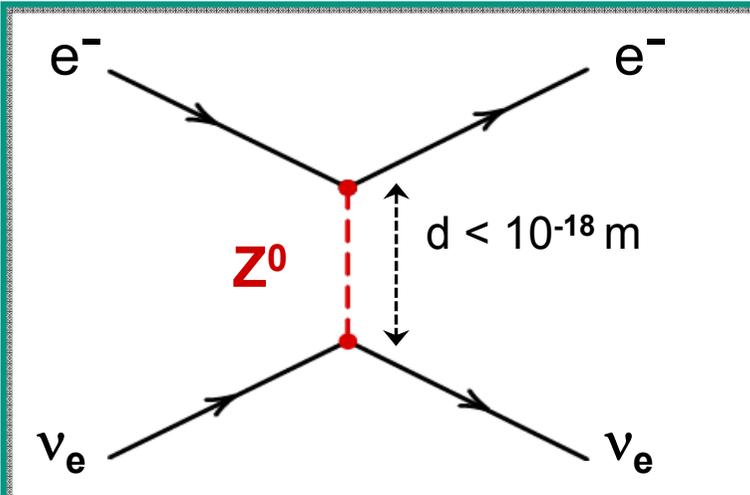
Schwache Wechselwirkung - Vektorbosonen

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

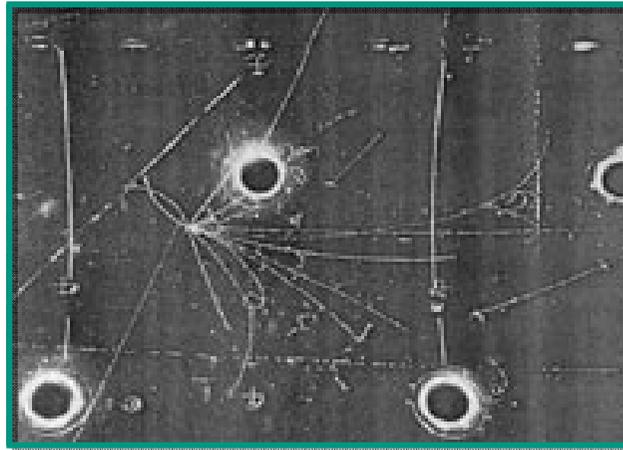
- '**neutral current**' (NC) Reaktionen
- kein Ladungstransfer, Austausch von neutralen **Z^0** Bosonen ($M = 91.19 \text{ GeV}$)
- Flavour-Universalität des NC: identische Kopplung ν_e, ν_μ, ν_τ an Z^0

Geladene & neutrale schwache Ströme

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

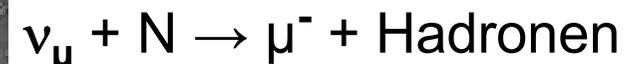
Gargamelle Blasenkammer

(Target: 20 t Freon, $l = 4.8$ m, $\varnothing = 1.9$ m)

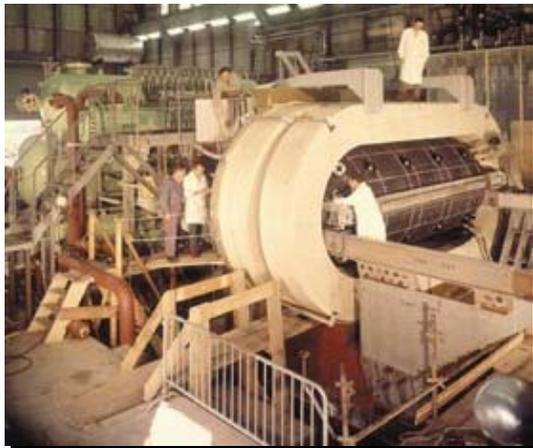


geladener Strom: W^+ , W^-

Untersuchung tiefinelastischer Reaktionen an Kernen

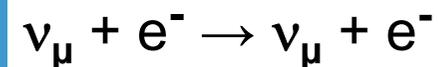


CC Ereignis: Identifikation durch auslaufendes Myon μ



neutraler Strom: Z^0

Untersuchung von Streuungen Von Neutrinos an Elektronen



NC Ereignis: Identifikation durch auslaufendes Elektron e