

Moderne Experimentalphysik III: Teilchenphysik

Sommersemester 2018

Thomas Müller, Roger Wolf

07. Juni 2018 – VL 12

Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



Einschub: Isospin und Flavoursymmetrie

■ Isospin I:

Basis: Ladungsunabhängigkeit der Kernkräfte und nahezu identische Massen von (u,d)-Quarks

(u,d)-Quark-Isospin-Dublett mit Isospin $I_3 = +\frac{1}{2}$ (u), $-\frac{1}{2}$ (d)

Wechselwirkungen & Quantenzahl I:

stark: Erhaltung von I und I_3

elmagn.: Erhaltung von I, Verletzung von I_3

schwach: Verletzung von I und I_3

■ Flavoursymmetrien:

Basis: Erweiterung der Flavourbasis auf (u,d,s)

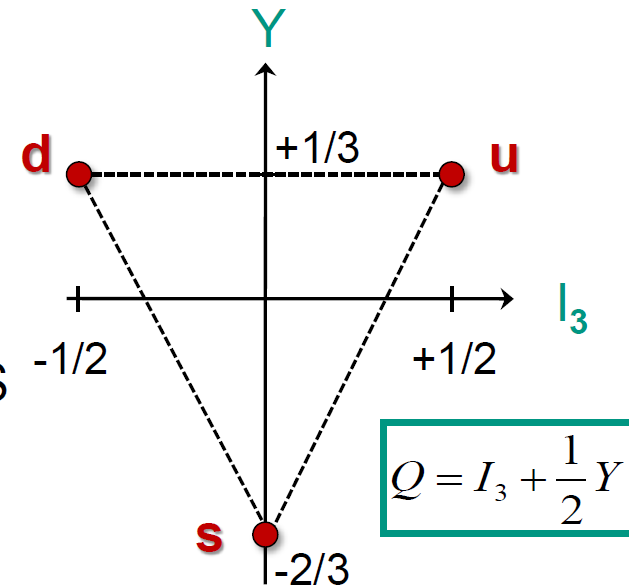
Hyperladung $Y = \text{Baryonenzahl } B + \text{Strangeness } S$

↳ **SU(3) – Flavoursymmetrie mit Multipletten**

mit Flavourzustand Charm: SU(4)

■ Strangeness S:

assoziierte Strangeness-Produktion $\rightarrow \Lambda K^0$



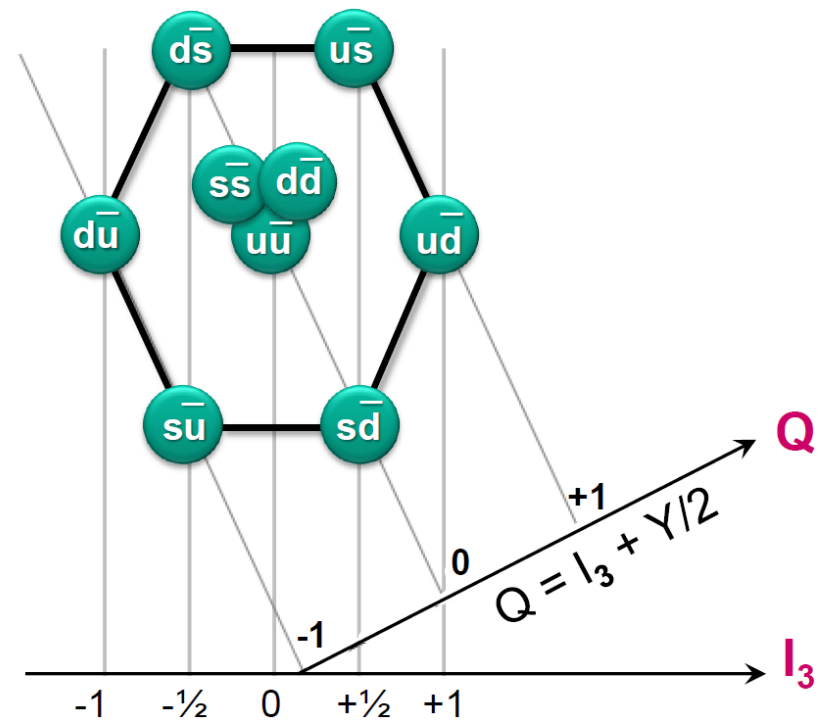
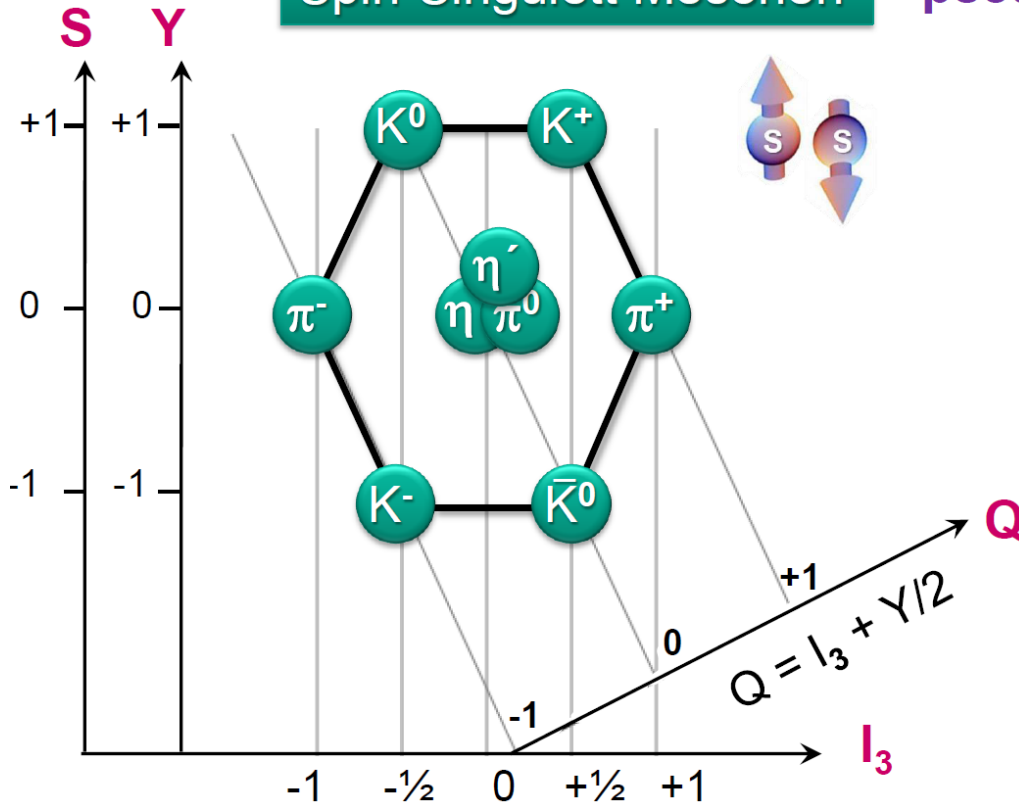
SU(3): fundamentale Darstellung und Zuordnung der Quarks

Mesonen – Nonetts

- **Mesonen-Nonett** mit $J^P = \frac{1}{2}^+$ in der SU(3) Darstellung, **Isomultiplikts**:
 2 Singulets (η, η'), 2 Dubletts (K^0, K^+) & (K^-, \bar{K}^0), 1 Triplet (π^+, π^0, π^-)

Spin-Singulett Mesonen

pseudoskalare Mesonen



Baryonen – Multiplette

■ Isomultipletts:

da Baryonen aus 3 Quarks aufgebaut werden, gibt es

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$$

- ein **Baryonen-Dekuplett** ($J = 3/2$) $\uparrow\uparrow\uparrow$

- zwei **Baryonen-Oktette**

1 Oktett symmetrisch / 1 Oktett antisymmetrisch unter Austausch von qq

- ein **Baryonen-Singulett**

Pauli-Prinzip:

Gesamtwellenfunktion des Baryons muss **antisymmetrisch** sein

- Orts-, Spin-, Flavour-, Farb- Anteile der Wellenfunktion

- Beispiel $J = 1/2$ Baryonen ($\uparrow\uparrow\downarrow$)

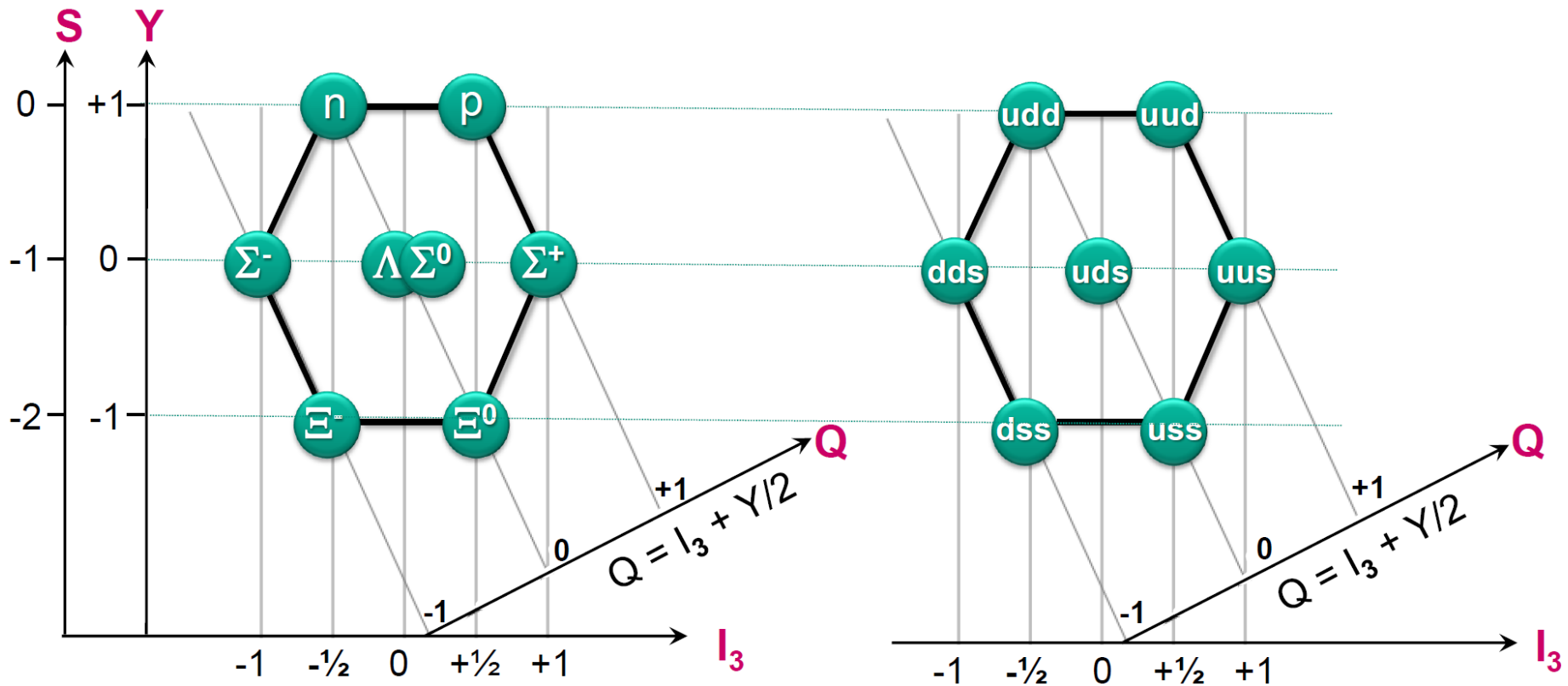
gemischte Spin-Symmetrie (keine reine symmetrische/antisymmetrische Wf.)

↳ die Flavoursymmetrie (u,d,s) muss ebenfalls gemischt sein

↳ keine flavour-symmetrischen $J = 1/2$ Zustände (uuu), (ddd), (sss)

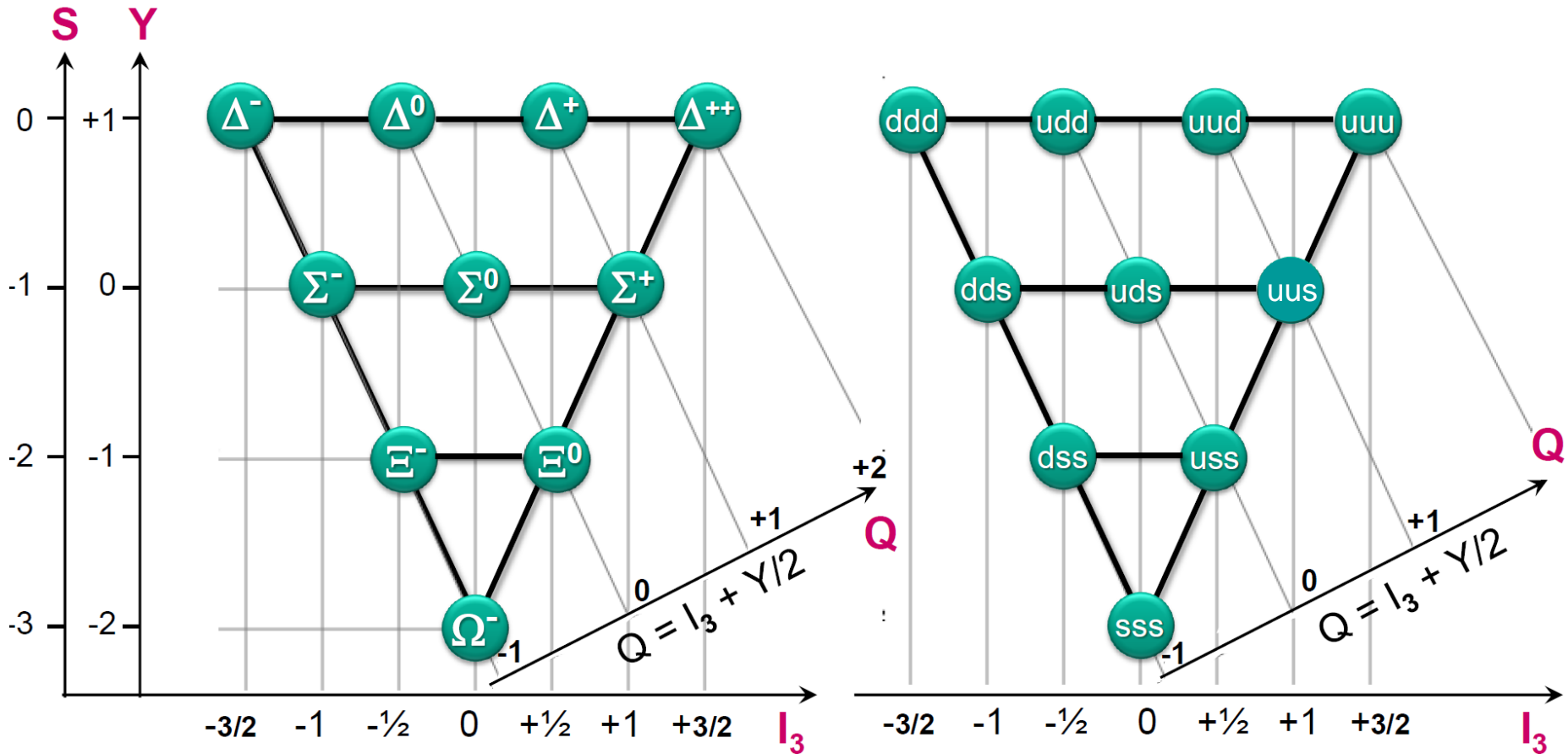
Baryonen – Oktetts

- **Isomultipletts**: Baryonenoktett mit $J^P = \frac{1}{2}^+$ in der SU(3) Darstellung mit den Quantenzahlen Isospin I_3 und Hyperladung Y (bzw. Strangeness $S = Y - B$)
- 8-fold way** (M. Gell-Mann): 1 Singulett (Λ), 2 Dubletts (N, Ξ), 1 Triplet (Σ)



Baryonen – Dekuplett

- **Isomultipletts:** Baryonendekuplett mit $J^P = \frac{3}{2}^+$ in der SU(3) Darstellung
 1 Singulett (Ω^-), 1 Dubletts (Ξ), 1 Tripletts (Σ), 1 Quadruplett (Δ)

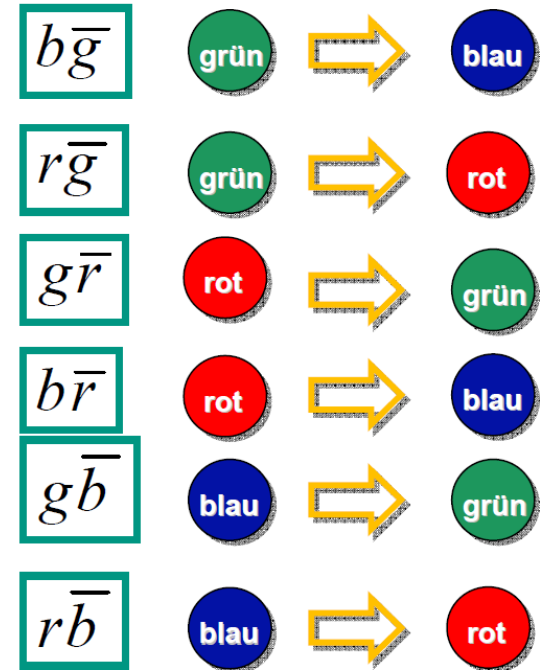
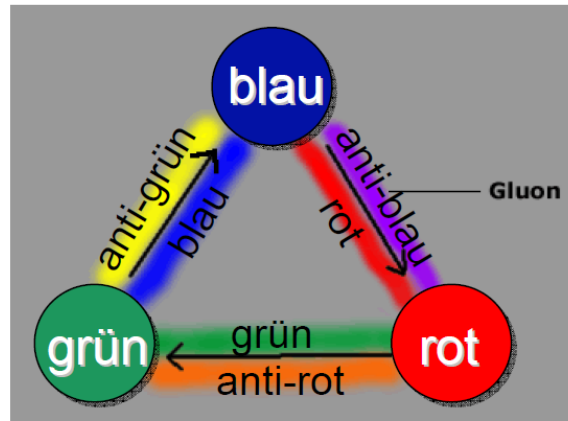
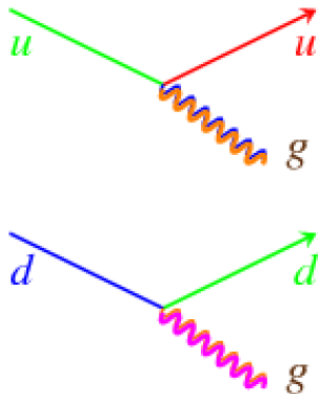


- 5.1 Der Teilchenzoo
- 5.2 Hadronen, Quarks
- 5.3 Das statische Potential der QCD
- 5.4 Die Farbkraft
- 5.5 Das Laufen der Kopplungskonstanten

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



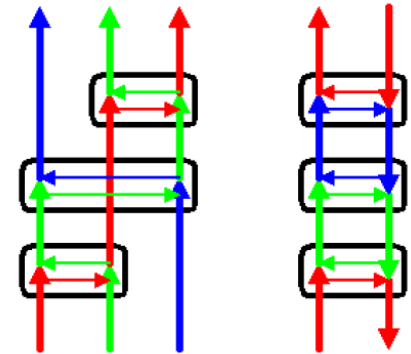
$$(r\bar{r} - g\bar{g}) / \sqrt{2}$$

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

Farbe und $SU(3)_C$ Symmetriegruppe

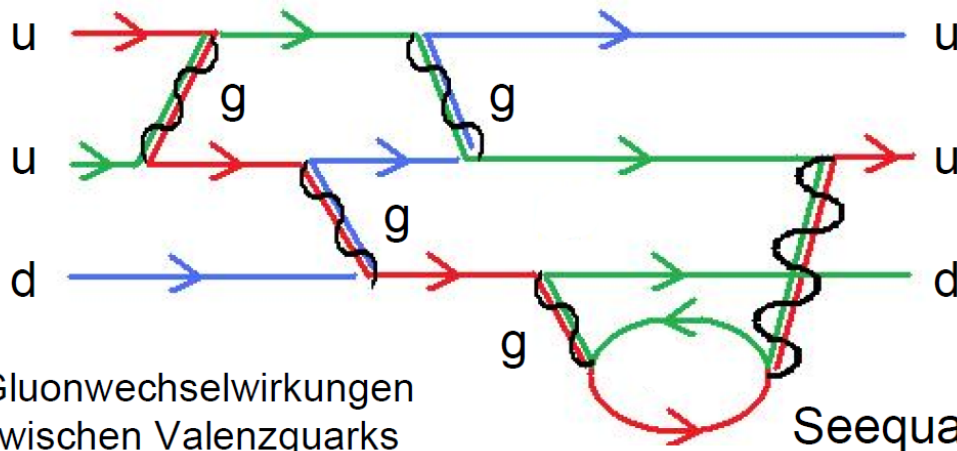
■ Regeln der **Quantenchromodynamik**:

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



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

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



Gluonwechselwirkungen
zwischen Valenzquarks

Seequarks $q\bar{q}$

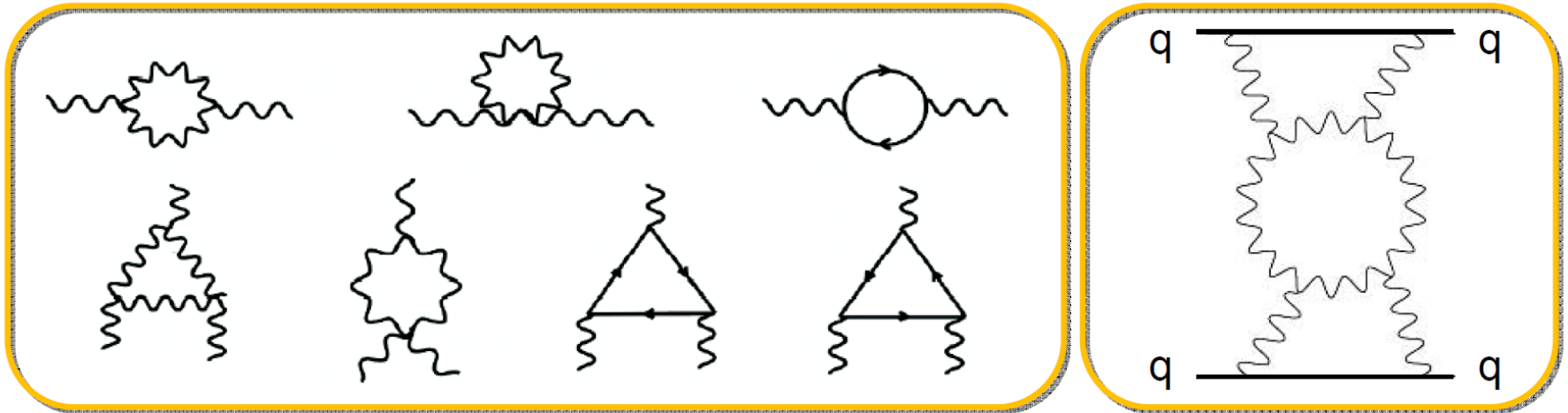
Gluonen: Selbstwechselwirkung

■ 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**



Confinement & Jetstrukturen

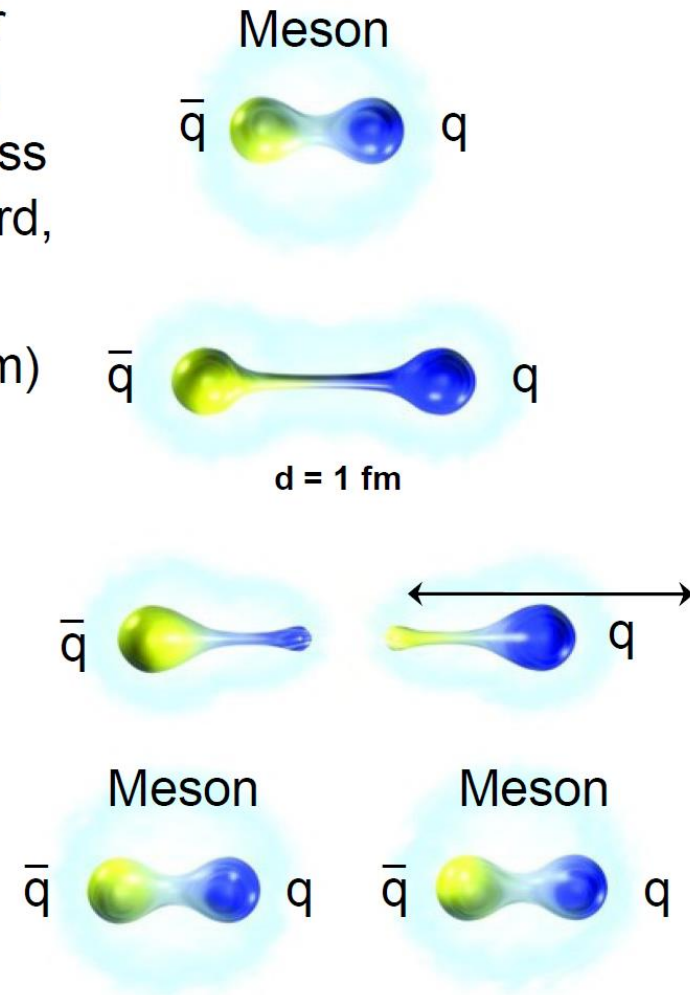
- Bei einem harten Stoßprozess wird das $q\bar{q}$ -Paar räumlich voneinander getrennt & die Energie im farbelektrischen Flusschlauch wird so groß, dass ein weiteres **Quark-Antiquark Paar** erzeugt wird, man erhält damit 2 Mesonen

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

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

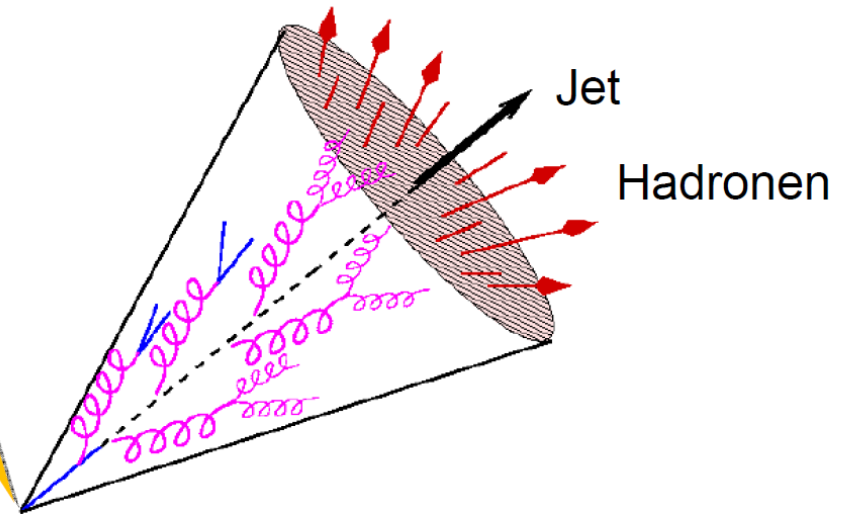
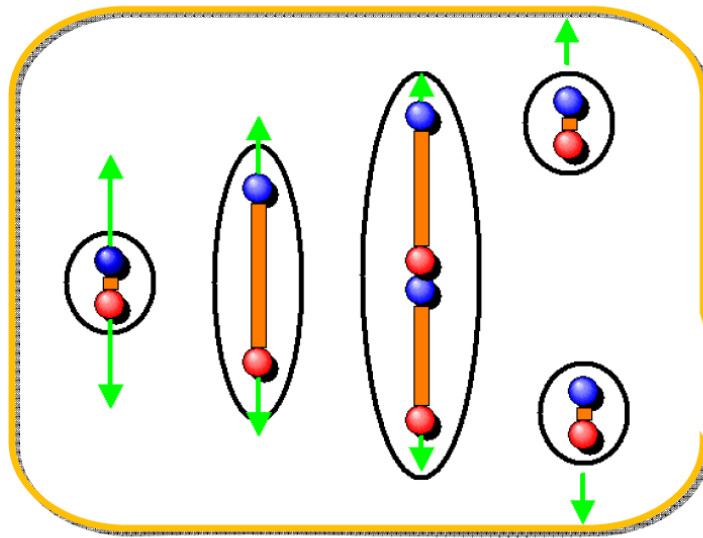
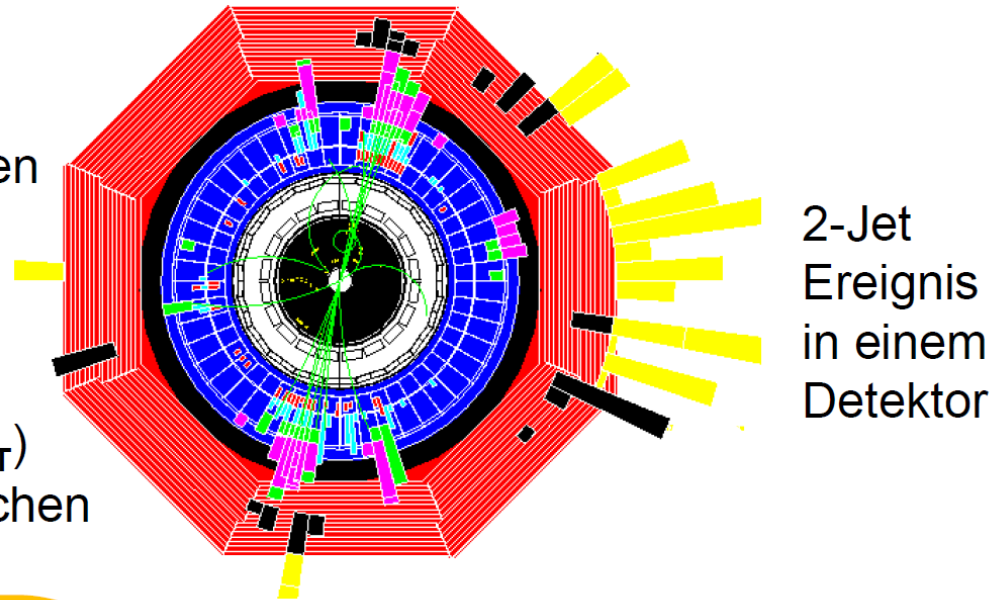
Energie ist ausreichend für neues $q\bar{q}$ -Paar

- - 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



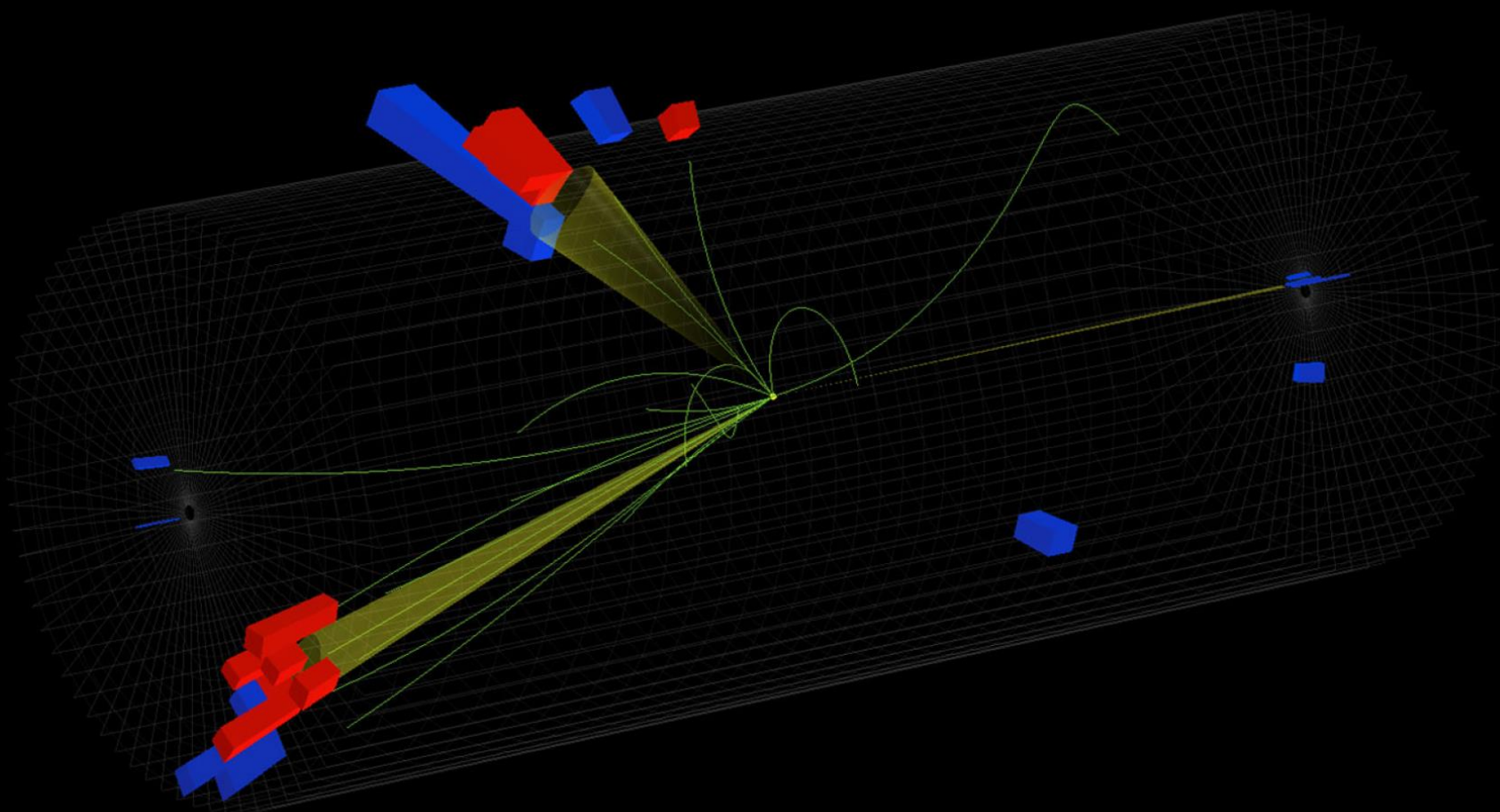


CMS Experiment at the LHC, CERN

Date Recorded: 2009-12-06 07:18 GMT

Run/Event: 123596 / 6732761

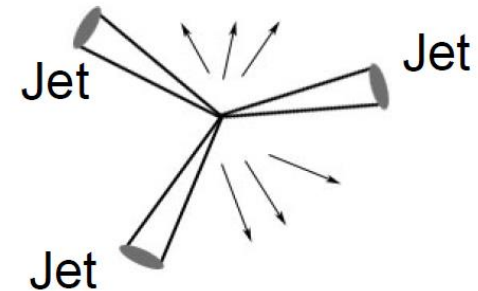
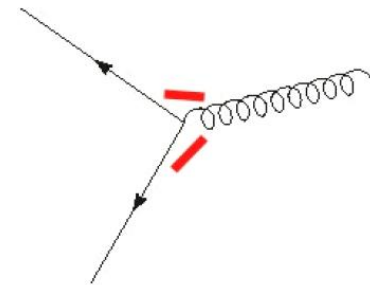
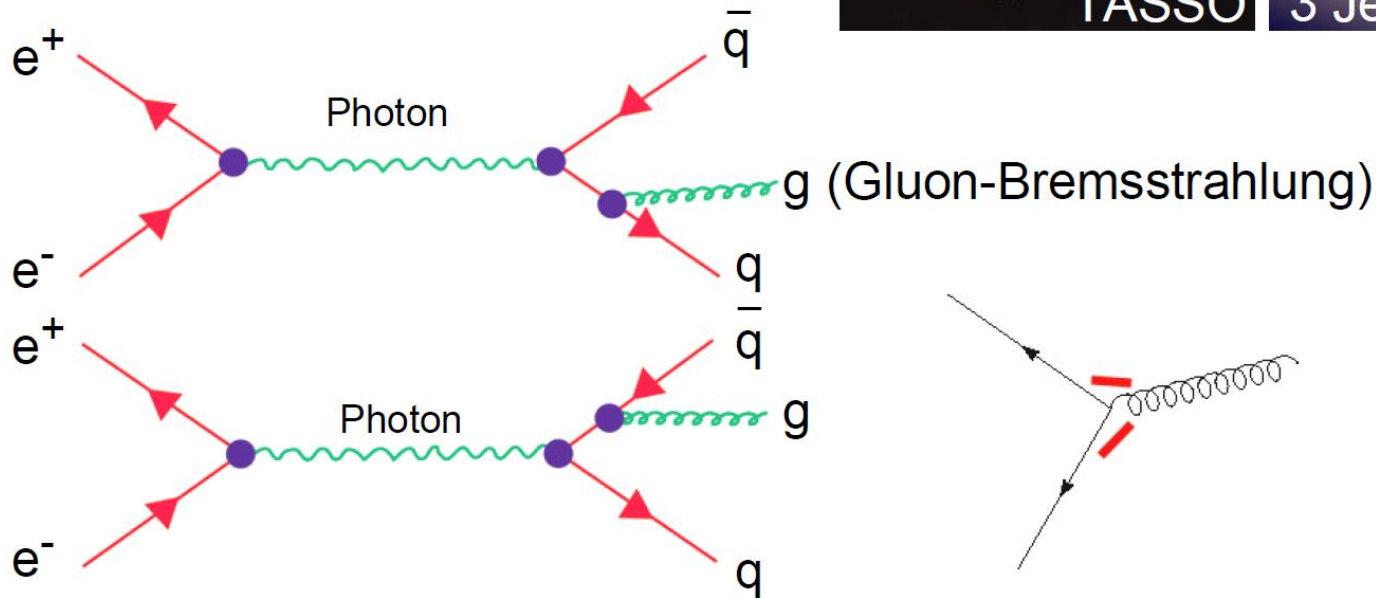
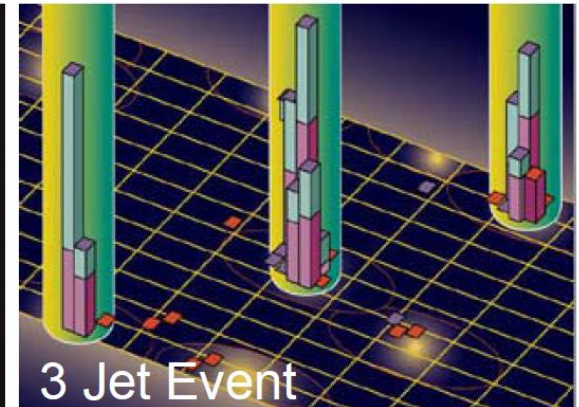
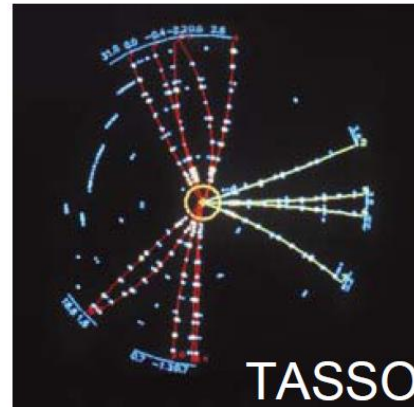
Candidate Dijet Collision Event



Glukonen: Nachweis in 3 Jet Ereignissen

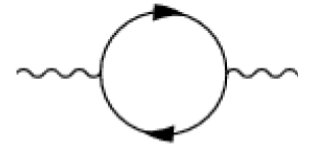
■ Gluonnachweis am DESY:

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



5.5 Das Laufen der Kopplungskonstanten

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

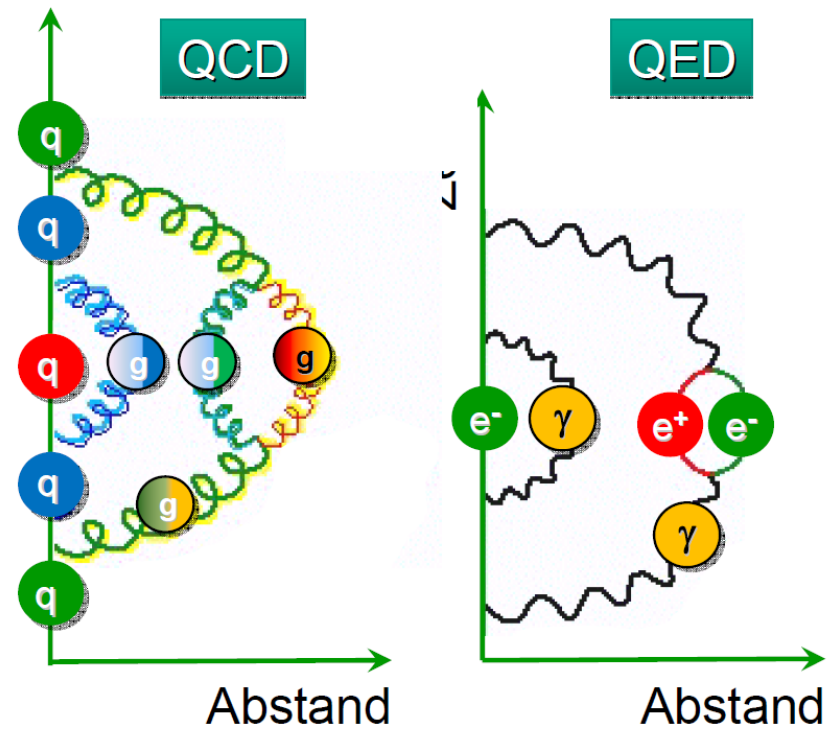
- Vakuumpolarisationen erzeugen ständig **virtuelle Teilchen-Antiteilchenpaare**
Renormierung der nackten Ladung

QED:

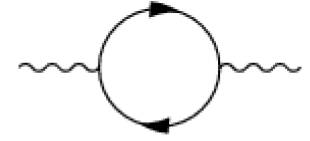
Photonen erzeugen e^+/e^- Paare

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 :

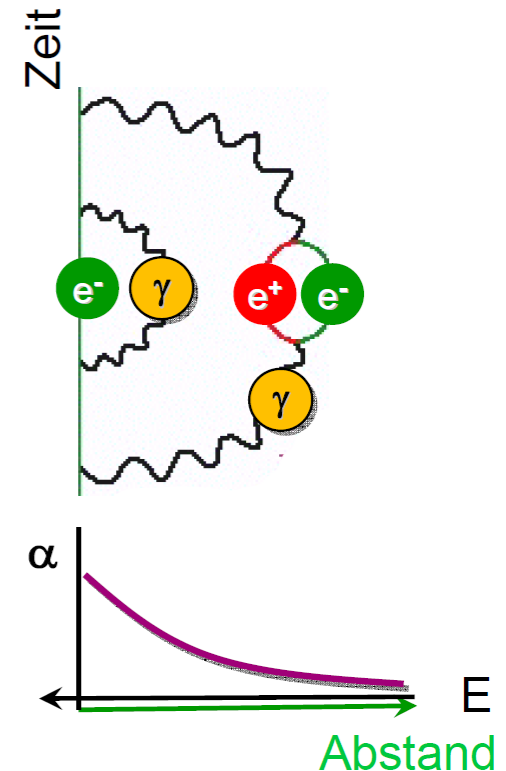
die Stärke $e^2 = \alpha$ (Feinstrukturkonstante) der elektromagnet. Wechselwirkung steigt mit der Energie an

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

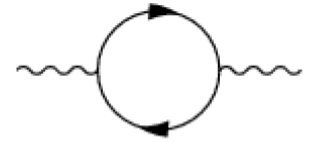
μ : Impulsübertrag

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

QED



Vakuumpolarisation in der QCD



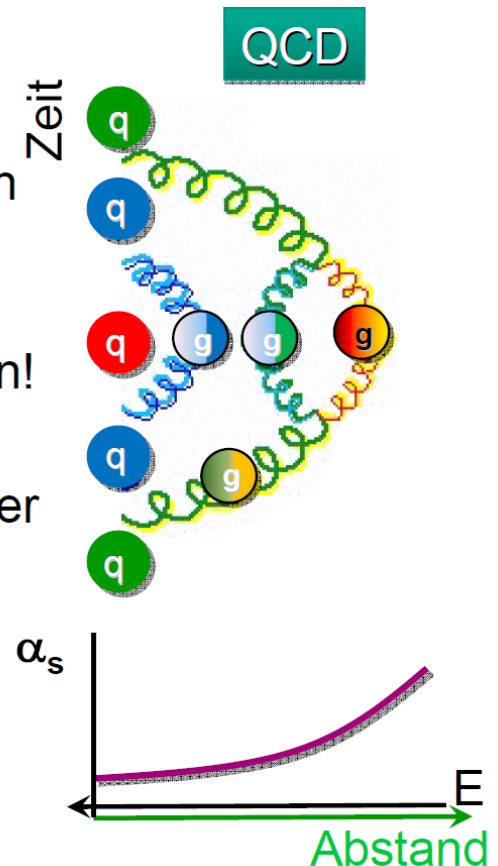
■ Quantenchromodynamik

- **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

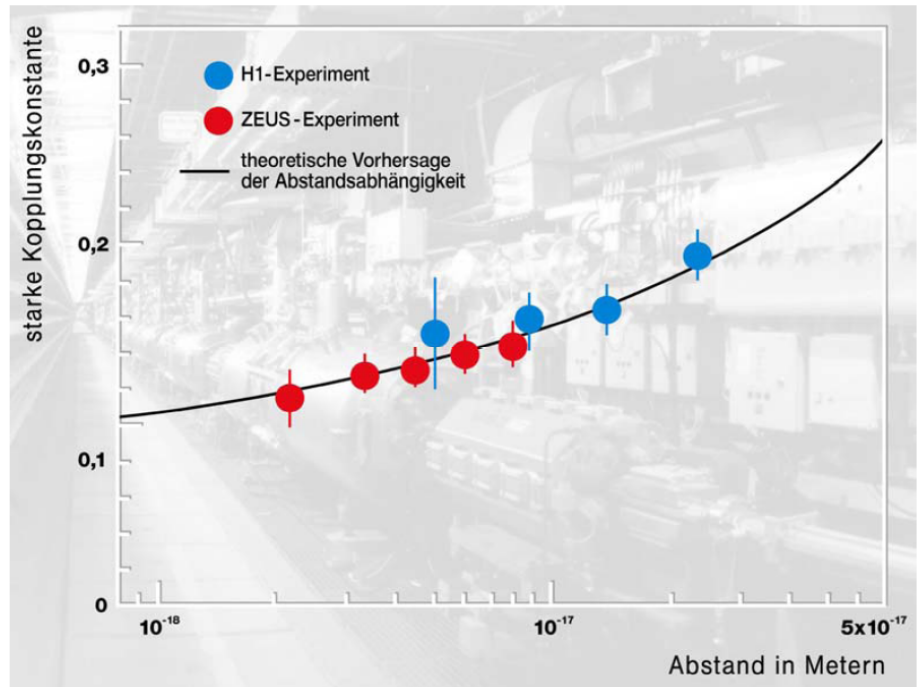


$$\alpha_s(Q) = \frac{\alpha_s(\mu)}{1 + \frac{33 - 2 \cdot n_f}{12\pi} \cdot \alpha_s(\mu) \cdot \ln\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)}$$

- 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 $\alpha_s(Q)$

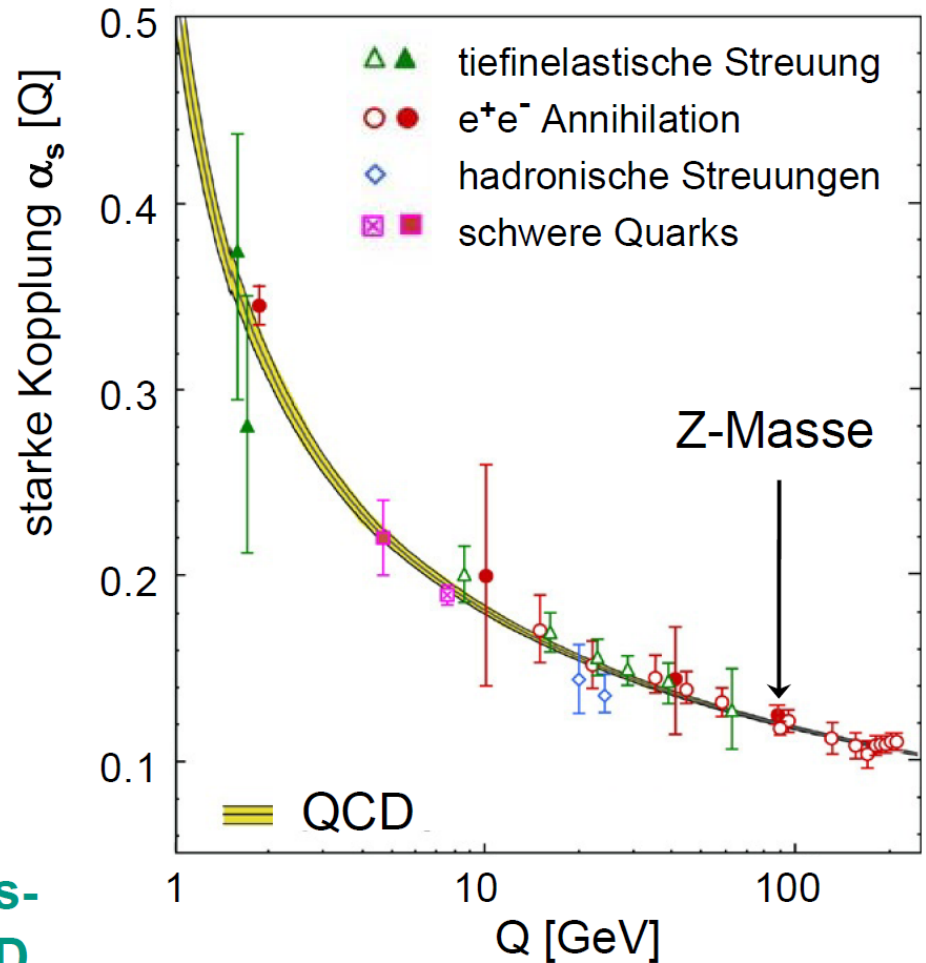
- - Zusammenfassung der bei verschiedenem Q-Werten gemessenen Kopplungsparameter & Vergleich mit QCD
- Energie-Bezugspunkt ist die Ruhemasse des Z-Bosons M_Z :

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

- - 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:

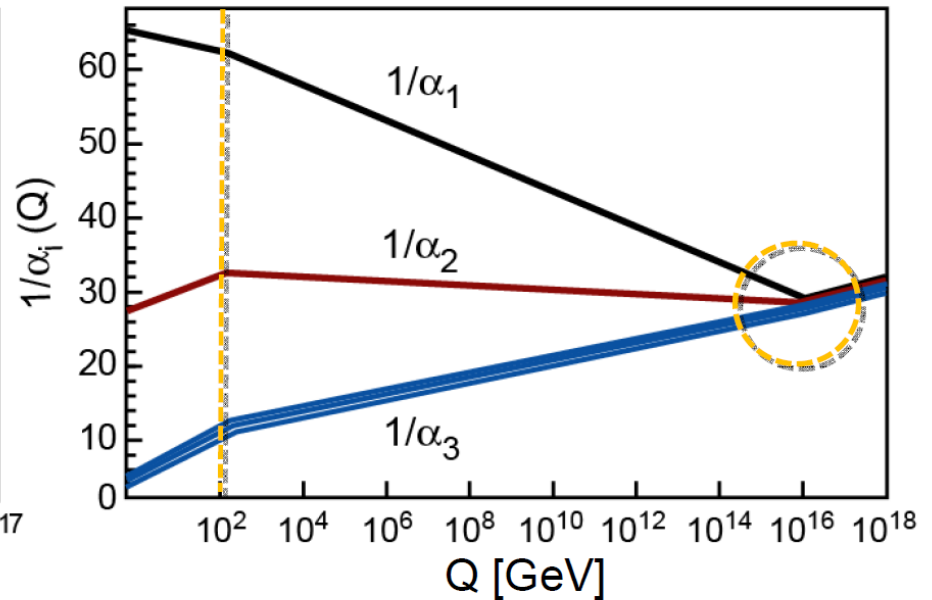
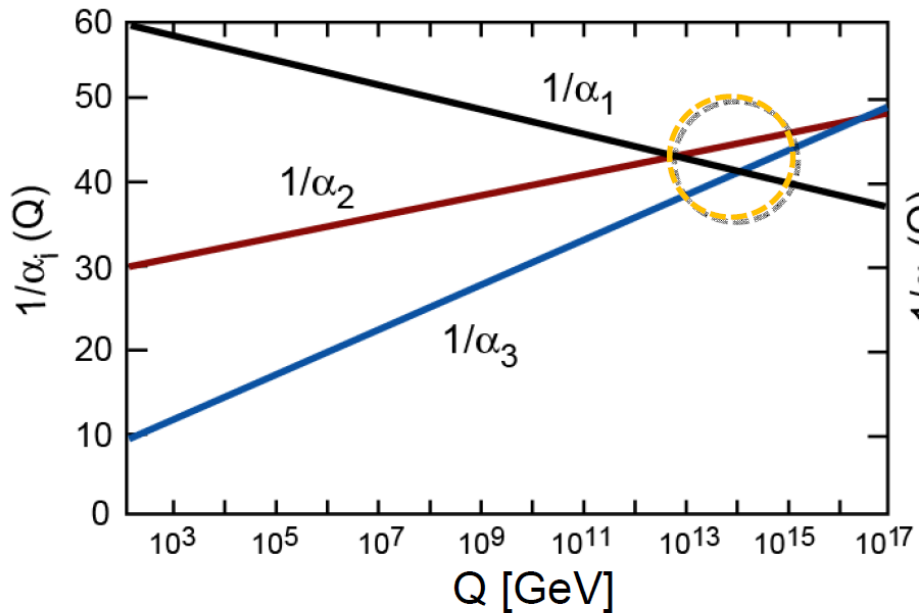
$$N_c = 3.03 \pm 0.12$$

3 Farbfreiheitsgrade der QCD



Vereinheitlichung der Kräfte

- **Grand Unified Theories** (GUTs) erwarten Vereinheitlichung der Stärke der elektromagnetischen, starken & schwachen Eichkopplungen bei $M_{\text{GUT}} < M_{\text{Pl}}$
- **Standardmodell (SM):** kein Schnittpunkt der 3 Eichkopplungen α_i
- **MSSM: minimales supersymmetrisches Standardmodell:** Eichkopplungen α_1 : elektromagnetisch α_2 : schwach α_3 : stark vereinigt bei $M_{\text{GUT}} = 2 \times 10^{16} \text{ GeV}$



6 Die Schwache Wechselwirkung

6.1 Vektorbosonen

6.2 Phänomene der Schwachen Wechselwirkung

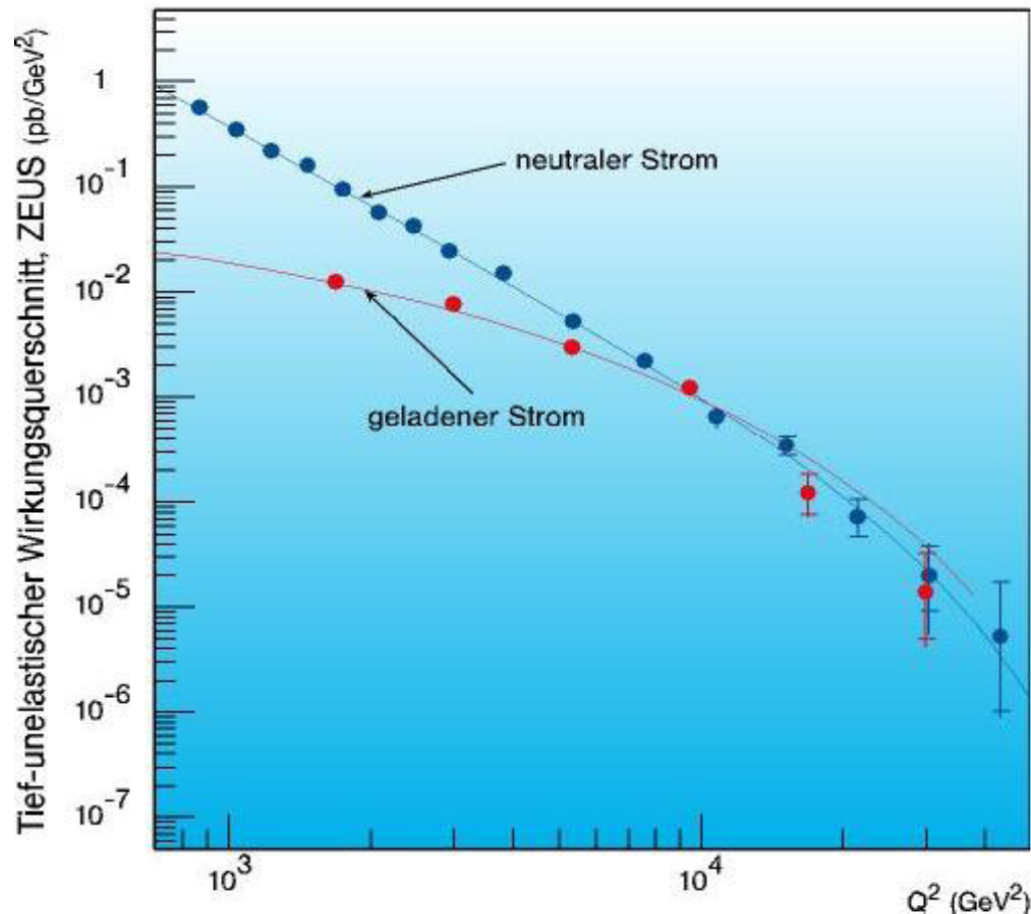
6.3 Flavormischung

6.4 CP-Verletzung

6.5 Elektroschwache Vereinigung, Higgs-Mechanismus

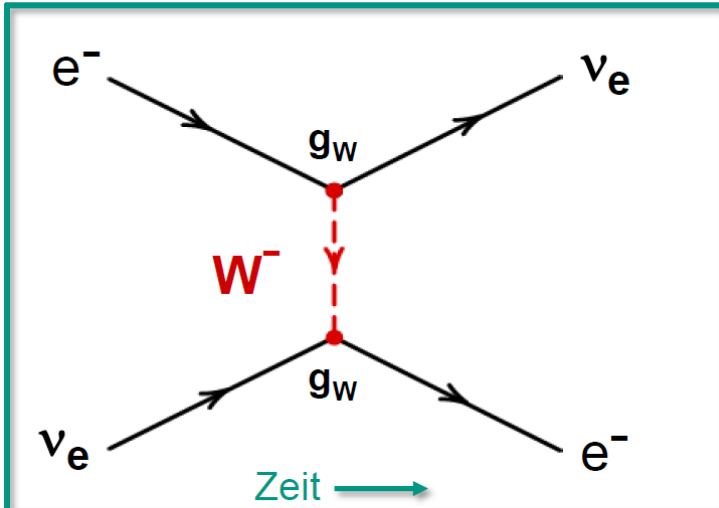
6.1 Vektorbosonen

- 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

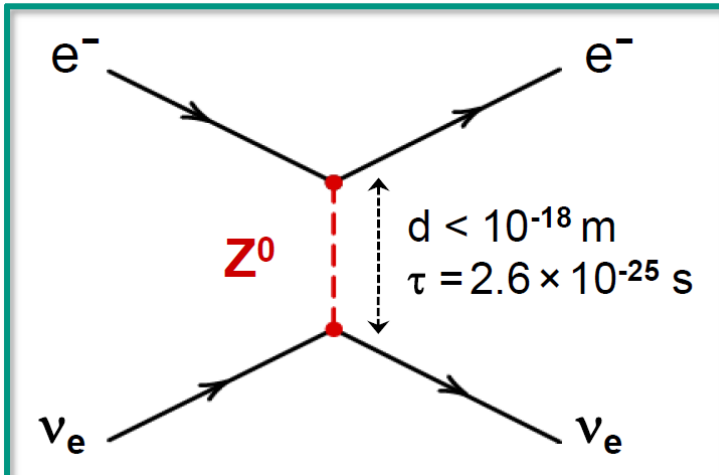
Intermediäre Vektorbosonen $J^P = 1^-$



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

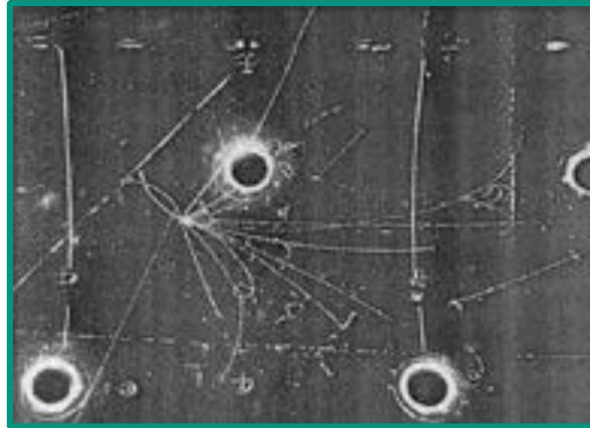
‘**neutral current**’ (NC) Reaktionen

- 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

Neutrale Schwache Ströme

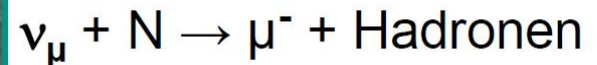
- 1973: erster Nachweis von neutralen Ströme am CERN mit Gargamelle

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

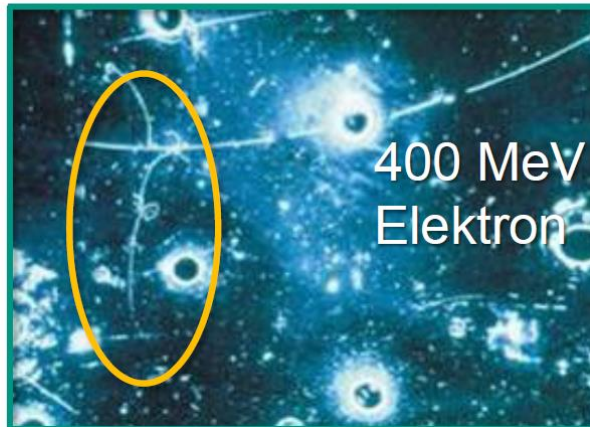


geladener Strom: W^+ , W^-

Untersuchung tiefinelastischer Reaktionen an Kernen



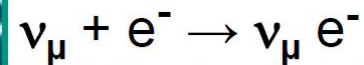
CC Ereignis: Identifikation durch auslaufendes Myon μ



400 MeV
Elektron

neutraler Strom: Z^0

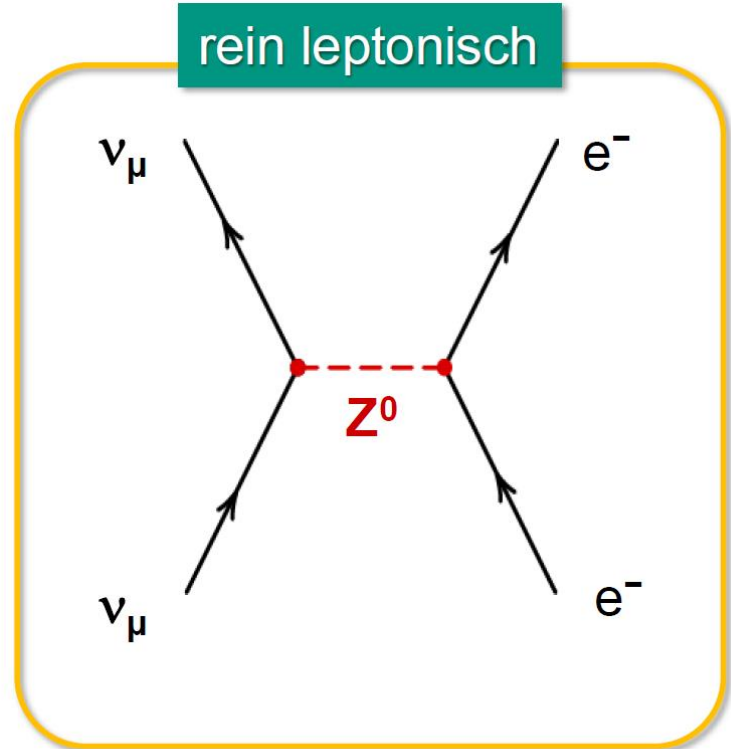
Untersuchung von Streuungen Von Neutrinos an Elektronen



NC Ereignis: Identifikation durch auslaufendes Elektron e

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

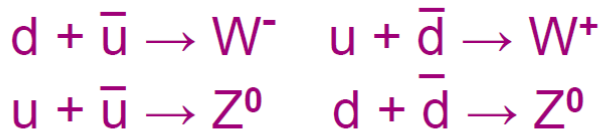
Analysegruppe in Aachen: visueller Scan von Teilen der ~700.000 aufgenommenen Gargamelle Bilder



Entdeckung der Vektorbosonen

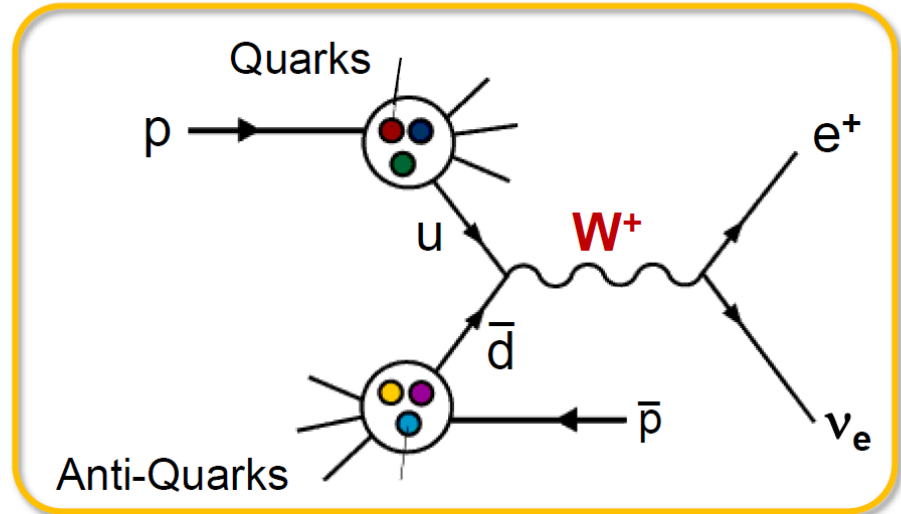
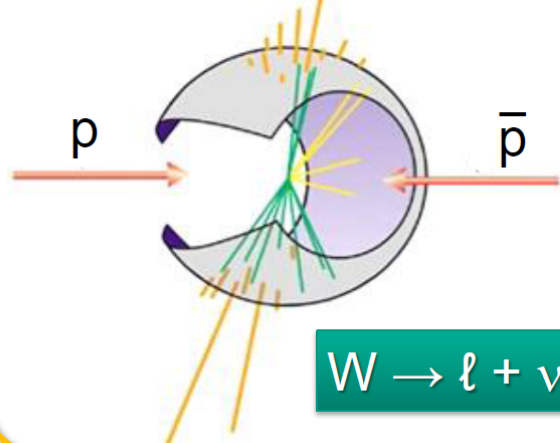
- die **intermediären Vektorbosonen W^+ , W^- & Z^0** des GSW-Modells wurden in Proton-Antiproton Kollisionen bei Energien $E = 400$ GeV nachgewiesen,

Erzeugung durch:



W-Boson
Produktion
& Zerfall

Lepton



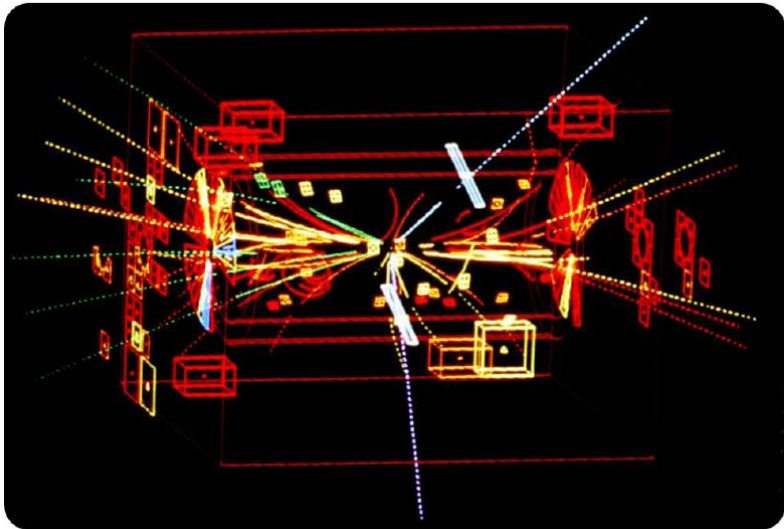
- der **Nachweis der reellen Bosonen** erfolgt über Zerfallsprozesse in hochenergetische Leptonen:



1 HE-Lepton & fehlender Transversalimpuls (ν)



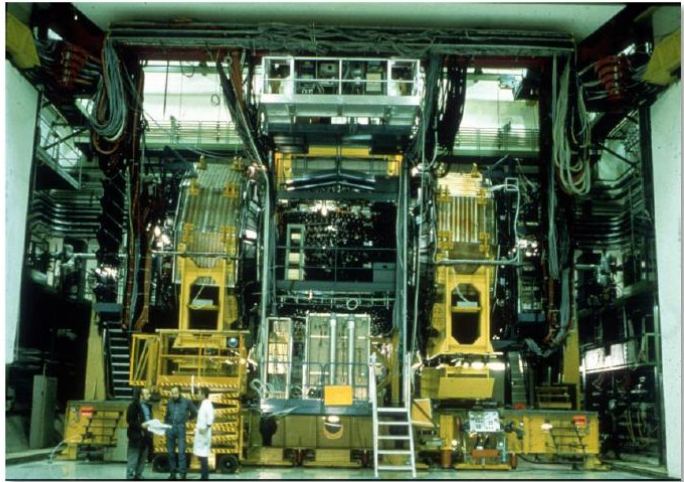
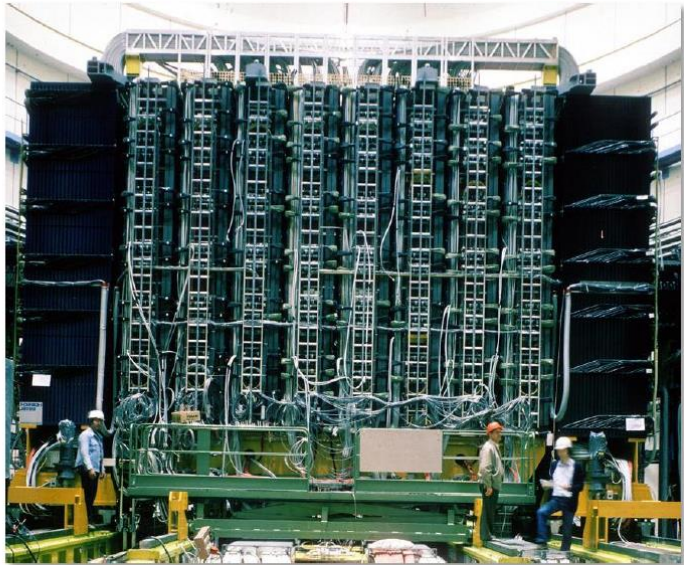
- 1983: der experimentelle Nachweis der intermediären Vektorbosonen erfolgte am **CERN SPS Beschleuniger** in den Experimenten UA1 und UA2
- UA1, April 1983: erster beobachteter **Z^0 Zerfall** in ein hochenergetisches Leptonenpaar (e^+, e^-) jedes Lepton hat $E \sim 45$ GeV



Nobel
1984



Carlo Rubbia,
S. van der Meer



■ 1989-2000: nach Inbetriebnahme des **LEP** (**L**arge **E**lectron-**P**ositron Collider) werden am CERN die W^\pm und Z^0 Zerfallsmoden detailliert untersucht:

■ W^\pm Zerfallsmoden

$$\begin{aligned}
 W^\pm \rightarrow e^\pm + (\bar{\nu}_e) : & \quad (10.9 \pm 0.4) \% \\
 \mu^\pm + (\bar{\nu}_\mu) : & \quad (10.2 \pm 0.5) \% \\
 \tau^\pm + (\bar{\nu}_\tau) : & \quad (11.3 \pm 0.8) \% \\
 \text{Hadronen} : & \quad \sim 68\%
 \end{aligned}$$

je 1/9 Leptonpaar,
6/9 = 2/3 in Hadronen



- das W-Boson koppelt an alle (linkshändigen) Fermionen mit gleicher Stärke an, z.B. für W^- :
 - 3 Lepton-Dubletts $(\nu_e, e^-), (\nu_\mu, \mu^-), \dots$
 - aber nur 2 Quark-Dubletts, da das top-Quark zu schwer: $(\bar{u}, d), (\bar{c}, s)$

1 : 1 : 1 : 3 : 3



■ Z^0 Zerfallsmoden

6 leptonische Kanäle: $(\nu_e, \bar{\nu}_e), (\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu), (\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau), (e^+, e^-), (\mu^+, \mu^-), (\tau^+, \tau^-)$

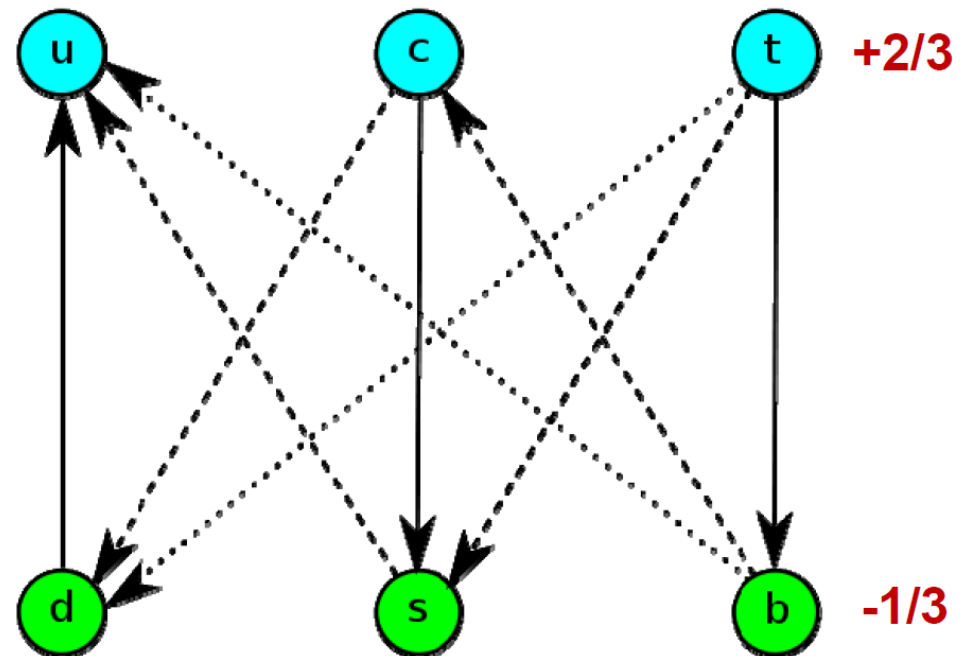
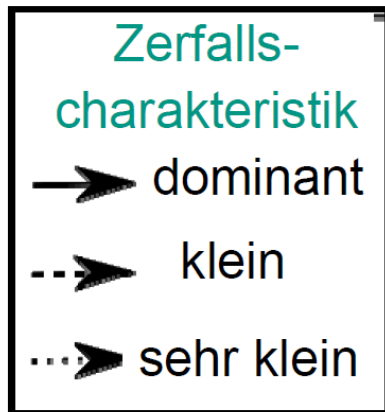
5 hadronische Kanäle: $(u, \bar{u}), (d, \bar{d}), (s, \bar{s}), (c, \bar{c}), (b, \bar{b})$ (zusammen $\sim 70\%$)

Z^0 koppelt auch an elektr. Ladung, daher 3.35% pro (ℓ^+, ℓ^-) & 6.7% pro $(\nu, \bar{\nu})$

6.2 Phänomene der Schwachen Wechselwirkung

■ Schwache Wechselwirkung:

- **flavourändernde Übergänge** zwischen den Quarks ($d \rightarrow u$, $c \rightarrow s$, $t \rightarrow b$)
- **geladene** (W^\pm) und **neutrale** (Z^0) Ströme
- **Verletzung von Erhaltungssätzen**: Parität P (chirale Symmetrie), Ladungskonjugation C, CP-Symmetrie, Familien-Leptonenzahl $L_{e,\mu,\tau}$, (Leptonenzahl L?)



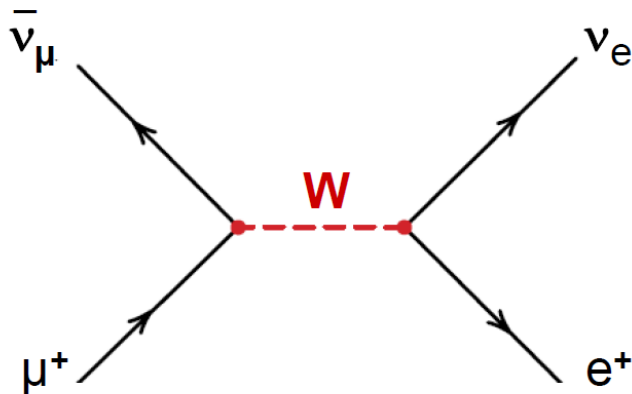
a) Klassifikation schwacher Prozesse

■ Rein leptonische Prozesse:

- ausschließlich Leptonen im Anfangs- und Endzustand
- wichtige Beispiele für rein leptonische Kanäle:
 μ -Zerfall $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$ τ -Zerfall: $\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_\tau$,
- Bestimmung der Kopplungsstärke G_F der schwachen Wechselwirkung
- **keine Beeinflussung durch hadronische Prozesse**

$$l + \bar{\nu}_e \rightarrow l' + \bar{\nu}_{e'}$$

elementare Reaktion: Kopplung von 2 Strömen



β -Zerfall des Myons

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

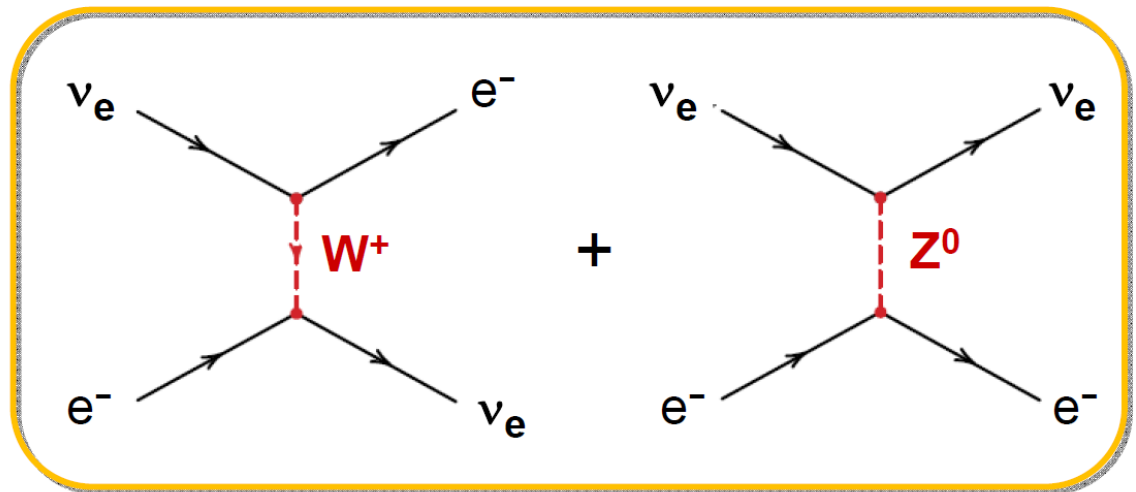
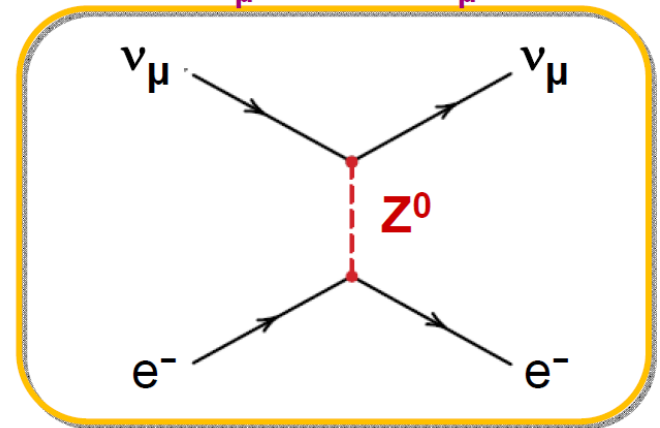
$\tau = 2.2 \mu\text{s}$

■ Neutrino-Elektron Streuung

- **CC**: geladene Ströme (W-Bosonen)
- **NC**: neutrale Ströme (Z⁰-Bosonen)
- bei der ν_e -e Streuung (und der ν_e -e Streuung) kommt es zu einer CC/NC

Interferenz der Ströme

$$\text{NC: } \nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$$



$$\text{CC+NC: } \nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$

Semi-leptonische Prozesse:

- neben Leptonen sind auch Hadronen im Anfangs- und Endzustand
- wichtige Beispiele semi-leptonischer Kanäle:

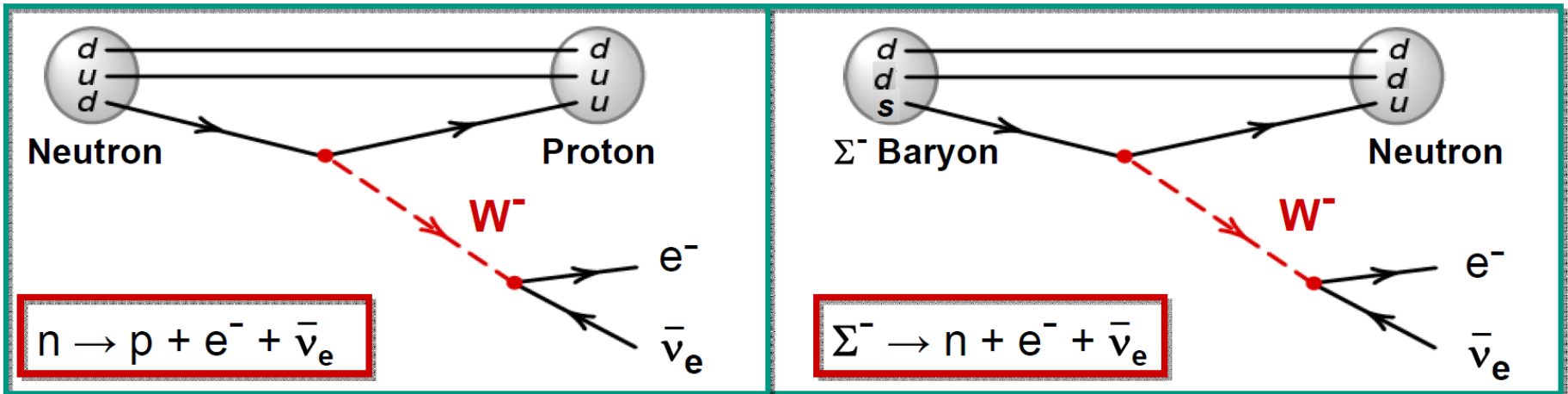
n-Zerfall, Kaon-Zerfall: $K^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$

- für semileptonische Zerfälle von Hadronen mit Strangeness $S \neq 0$ gilt

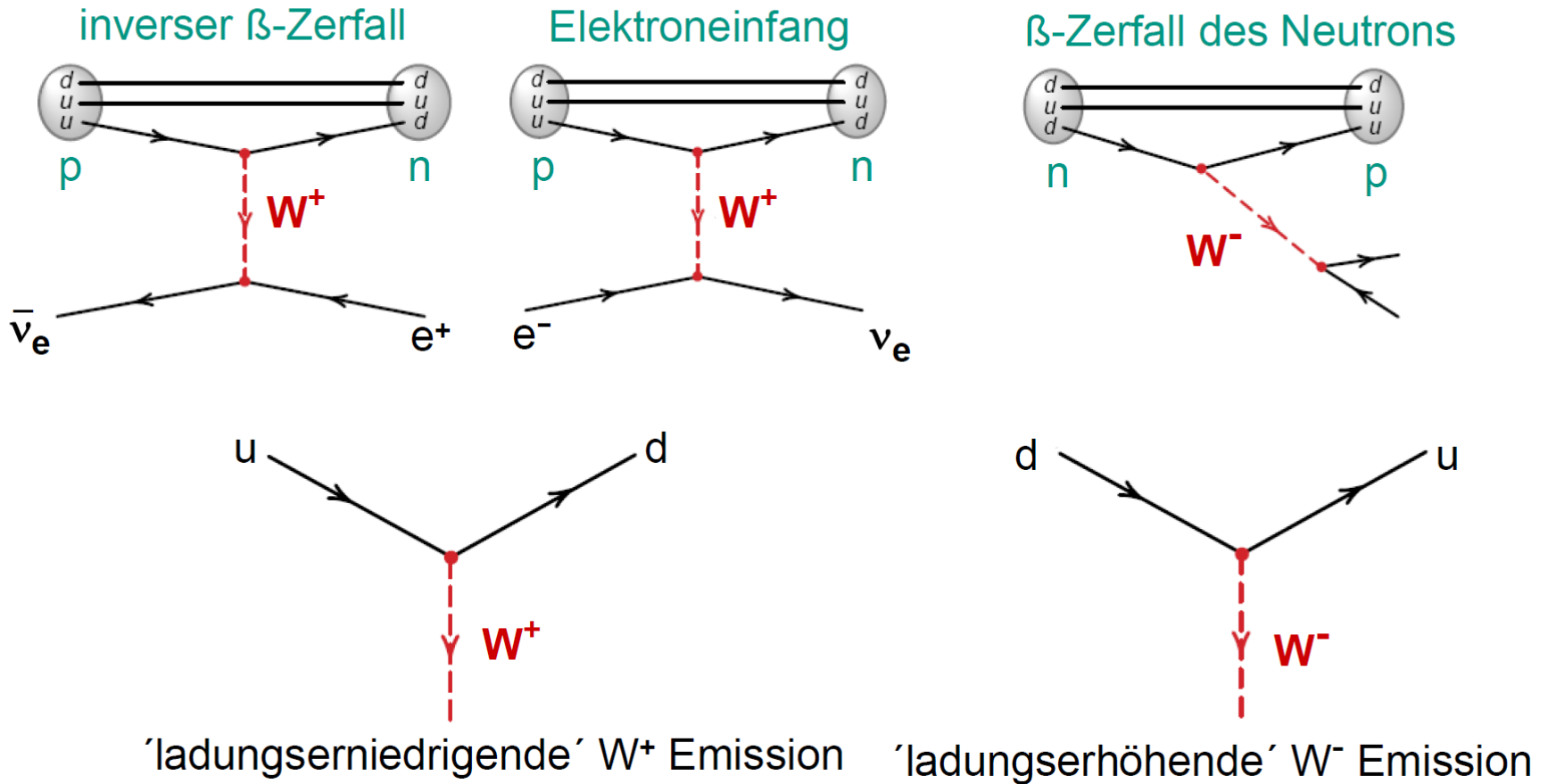
$$\Delta S = \Delta Q$$

Quarkflavours: $s \rightarrow W^- + u, \bar{s} \rightarrow W^+ + \bar{u}$

mit $|\Delta S| = 1$, Beispiel: $\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$ mit $|\Delta S| = +1$ und $|\Delta Q| = +1$



■ Semileptonische Prozesse



Fermi-Kopplungskonstante G_F

■ Fermi-Kopplungskonstante:

- Die geringe Reichweite der massiven W-Bosonen ($\sim 1/M_W \sim 0.002$ fm) kann als **Fermische Punktwechselwirkung** approximiert werden
- Stärke der Fermi-Kopplungskonstante G_F der Punktwechselwirkung wird aus der Zerfallskonstante λ spezieller (Fermi)-Zerfälle bestimmt, wobei mit Fermis Goldener Regel gilt: $\lambda \sim G^2 \cdot |M|^2$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{m_e^5 c^4}{2\pi^3 \hbar^7} \cdot f \cdot G_F^2 \cdot |M_{fi}|^2$$

- Für bestimmte (Fermi-) β -Übergänge wie $^{14}\text{O} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^- + \nu_e$ gilt $|M_F|^2 = 1$, damit ergibt sich G_F zu:

$$\frac{G_F}{(\hbar c)^3} = 1.16637 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} = 8.96 \times 10^{-5} \text{ MeV fm}^{-3}$$