

Moderne Experimentalphysik III: Teilchenphysik

Sommersemester 2018

Thomas Müller, Roger Wolf
22. Mai 2018 – VL 9

Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



4. Fundamentale Teilchen und Kräfte des Standardmodells

■ Fundamentale Bestandteile der Materie: **S = 1/2 Fermionen** (Leptonen, Quarks)

Fundamentale Austauschwechselwirkungen: **S = 1 Eichbosonen** (γ , W^\pm , Z, g)

S = 1/2 Fermionen

- treten in 3 Generationen (Familien) auf

Quarks (punktförmig)

drei Dubletts: up-down (u,d),

charm-strange (c,s), top-bottom (t,b)

unterliegen allen drei Wechselwirkungen

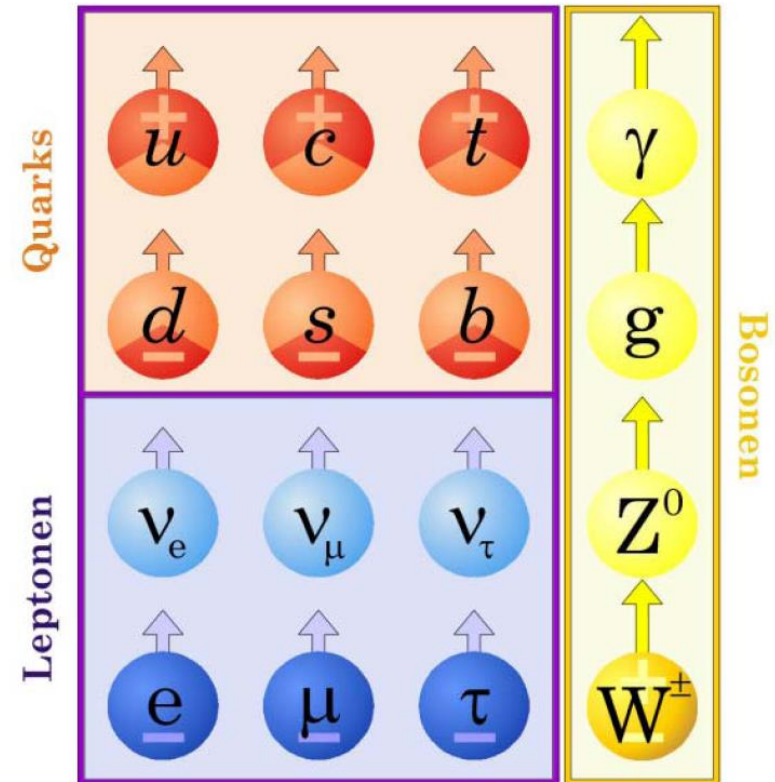
Ladungen $Q = +2/3$ (u,c,t) $Q = -1/3$ (d,s,b)

Leptonen (punktförmig)

drei Dubletts: (ν_e, e^-), (ν_μ, μ^-), (ν_τ, τ^-)

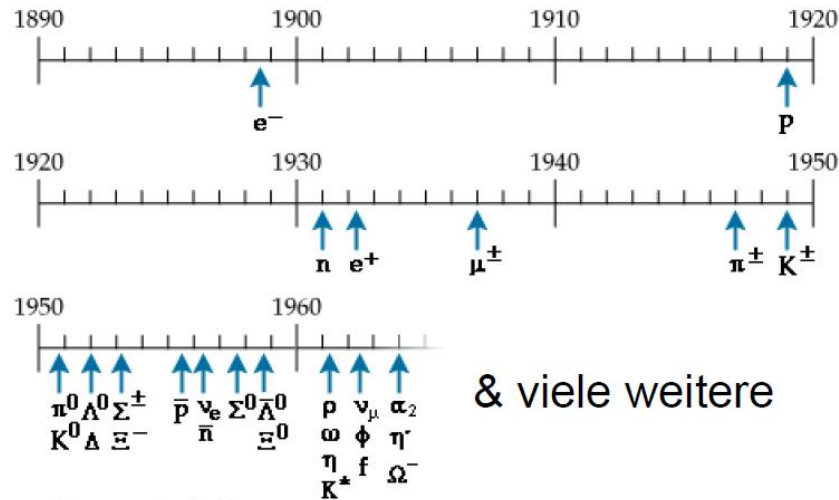
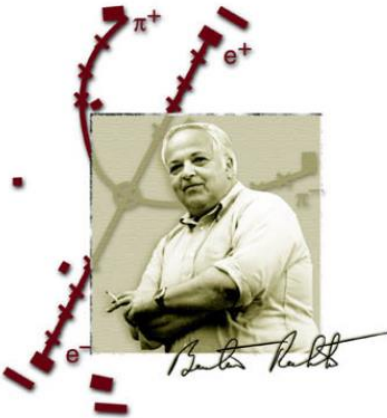
Neutrinos ν_ℓ & geladene Leptonen ℓ^-

unterliegen nur der schwachen (ν_ℓ, ℓ^-) & elektromagnet. Wechselwirkung (ℓ^-)

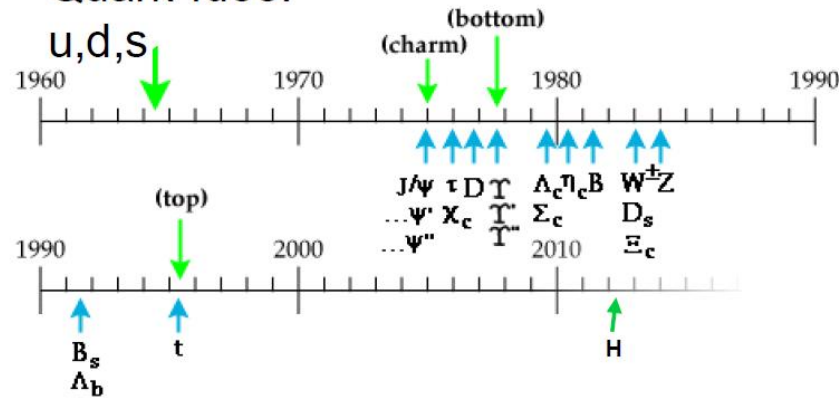


Historisches

- Die fundamentalen Bausteine der Materie und Austauschteilchen wurden in heute berühmten Experimenten nachgewiesen



Quark-Idee:



4.1 Fundamentale Teilchen

Leptonen: (leptos = leicht)

1. Familie	2. Familie	3. Familie	Wechselwirkung
e^-	μ^-	τ^-	EM, Schwach, Gravitation
ν_e	ν_μ	ν_τ	Schwach, Gravitation

+ Antiteilchen

Quarks

1. Familie	2. Familie	3. Familie	Wechselwirkung
u	c	t	EM (+2/3), Schwach, Stark, Gravitation
d	s	b	EM (-1/3), Schwach, Stark, Gravitation

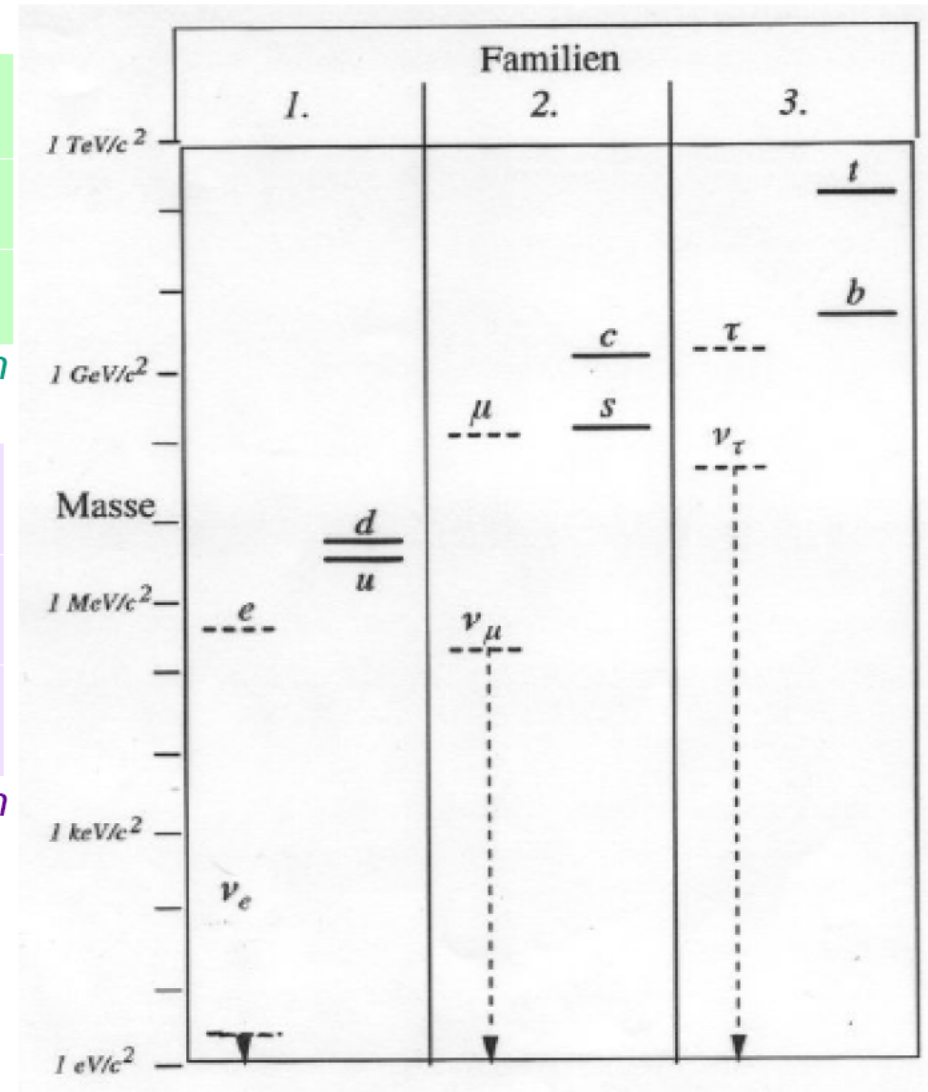
+ Antiteilchen

Stark gebundene Systeme:

Mesonen (mesos = mittel): $q\bar{q}'$

Baryonen (baryos = schwer): qqq

Exoten: gg , $q\bar{q}'g$ Systeme nicht einwandfrei nachgewiesen



Antiteilchen & Erhaltungszahlen L, B

- Dirac-Gleichung sagt Existenz von **Antiteilchen** mit identischer Masse aber entgegengesetzten Quantenzahlen (Ladung Q, magnet. Moment μ) voraus:

Leptonische Antiteilchen: Dubletts $(\bar{\nu}_e, e^+)$, $(\bar{\nu}_\mu, \mu^+)$, $(\bar{\nu}_\tau, \tau^+)$

Antiquarks: Dubletts (\bar{u}, \bar{d}) , (\bar{c}, \bar{s}) , (\bar{t}, \bar{b})

- Einführung von additiven Erhaltungszahlen L und B:

Leptonenzahl L: für Leptonen (ν_ℓ, ℓ^-) gilt $L = +1$
für Anti-Leptonen $(\bar{\nu}_\ell, \ell^+)$ gilt $L = -1$

$0\nu\beta\beta$
??

Familien-Leptonenzahlen L_e, L_μ, L_τ ($L = L_e + L_\mu + L_\tau$)

$(\nu_e, e^-) \Leftrightarrow L_e = +1$ $(\nu_\mu, \mu^-) \Leftrightarrow L_\mu = +1$ $(\nu_\tau, \tau^-) \Leftrightarrow L_\tau = +1$

$\nu_e - \nu_\mu$
 $\nu_\mu - \nu_\tau$

Baryonenzahl B: für Quarks (u, d, c, s, t, b) gilt $B = +1/3$
für Anti-Quarks $(\bar{u}, \bar{d}, \bar{c}, \bar{s}, \bar{t}, \bar{b})$ gilt $B = -1/3$

p-Zerfall
??

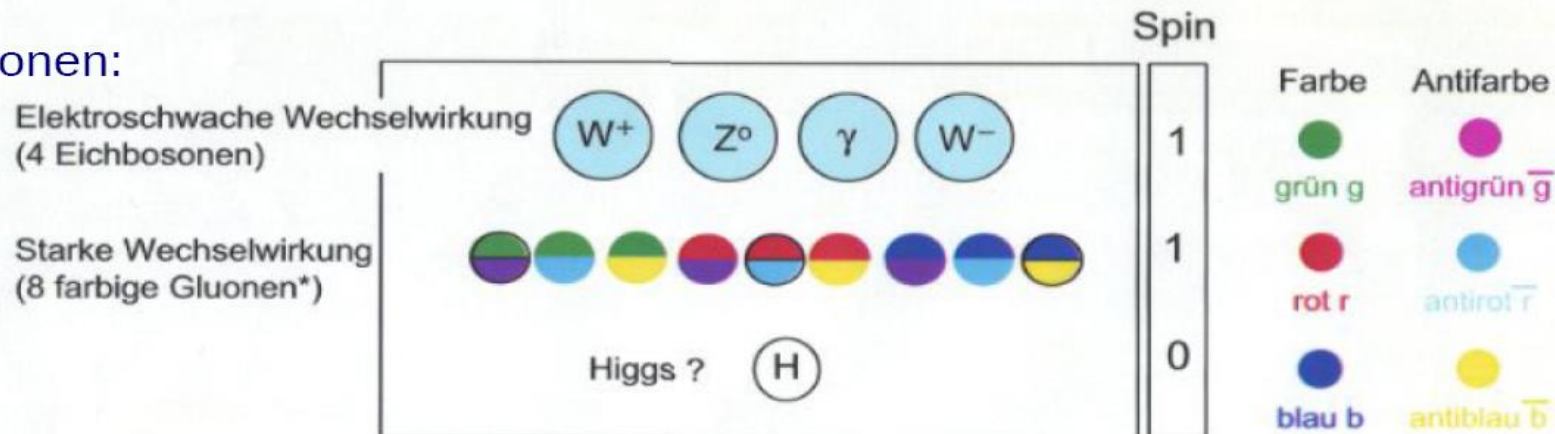
4.2 Fundamentale Wechselwirkungen

	Gravitation	schwache WW	elektromagn. WW	starke WW
Stärke (relativ bei 10^{-16} cm)	sehr schwach 10^{-38}	schwach 10^{-5}	mittel 10^{-2}	stark 1
eff. Reichweite (cm)	∞ ; $(1/r)$	10^{-16}	∞ ; $(1/r)$	10^{-13}
wirkt auf	alle Teilchen (Massen)	Fermionen (Quarks & Leptonen)	Quarks, geladene Leptonen	Quarks / Hadronen
Art der WW zwischen identischen Teilchen	anziehend	abstoßend	abstoßend	abstoßend
Feldquant	Graviton (?)	Vektorboson W^\pm, Z	Photon	Gluon
Spin	2h	1h	1h	1h
Masse	0	≈ 90 GeV	0	0 (aber Gluon-Selbstww. !)
Beispiel	Planetenbewegung Galaxien	β -Zerfall	atomare Bindung	Kernenergie, Bindung der Quarks zu Hadronen

Reichweite einer WW $\propto (\text{Masse des Feldquants})^{-1}$

Ausnahme: Gluon-Selbstwechselwirkung führt trotz $m_g=0$ zu sehr kurzer Reichweite

Bosonen:



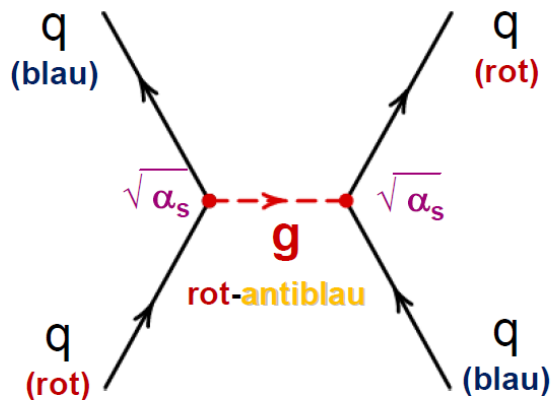
* Es gibt nur 2 farbige Gluonen, die ausschließlich aus Farbe und Antifarbe bestehen $\frac{1}{\sqrt{2}}(r\bar{r} - g\bar{g})$ und $\frac{1}{\sqrt{2}}(r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b})$
Der Zustand $\frac{1}{\sqrt{3}}(r\bar{r} + g\bar{g} + b\bar{b})$ ist farblos und wechselwirkt deshalb nicht

Eichbosonen

- Die drei fundamentalen Wechselwirkungen werden vermittelt durch (vektorielle) **S = 1 Bosonen** (Eichbosonen, Feldquanten)

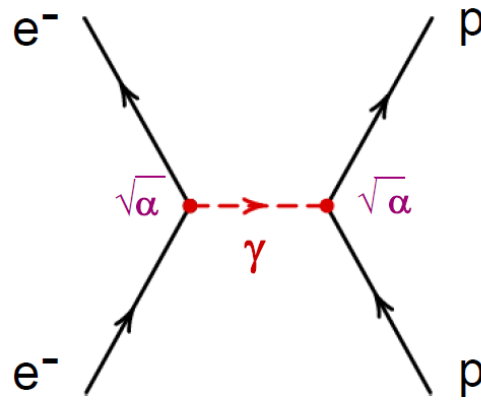
Starke Wechselwirkung

8 geladene Gluonen **g**
 'nacktes' Gluon: $M = 0$
 Reichweite $\sim 10^{-15}$ m
 Farbladung
 Quark-Wechselwirkung



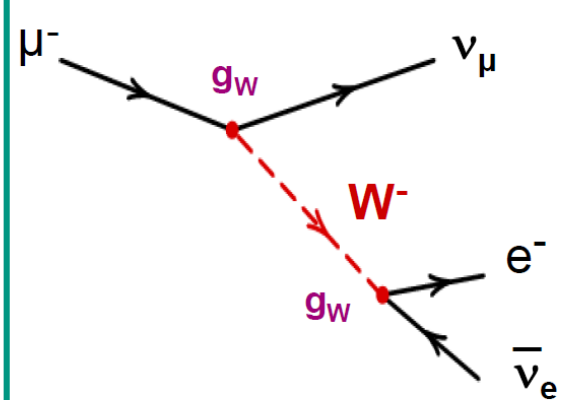
Elektromagnetische Ww.

1 neutrales Photon γ
 $M = 0$ ($< 6 \cdot 10^{-17}$ eV)
 Reichweite = ∞
 klassische Ladung **Q**
 γ -Zerfälle, Streuprozesse



Schwache Wechselwirk.

2 geladene Bosonen **W⁺W⁻**
 $M = 80.42$ GeV
 Reichweite $\sim 10^{-18}$ m
 schwache Ladung **g_w**
 β -Zerfälle, Teilchenzerfälle



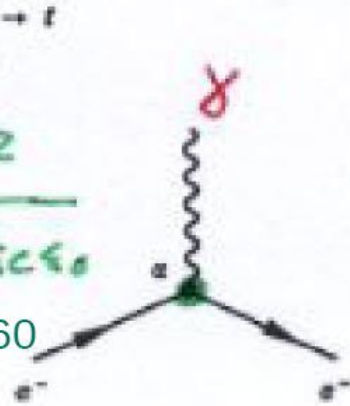
Elektromagnetische Wechselwirkung

- Beschreibung durch Quantenelektrodynamik (QED)
- Kräfte durch Austausch virtueller Photonen

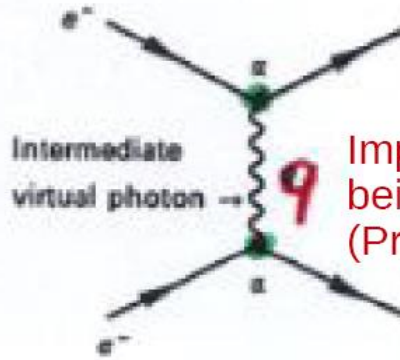
Feinstruktur
konstante

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$

$$\alpha = 1/137,0360$$

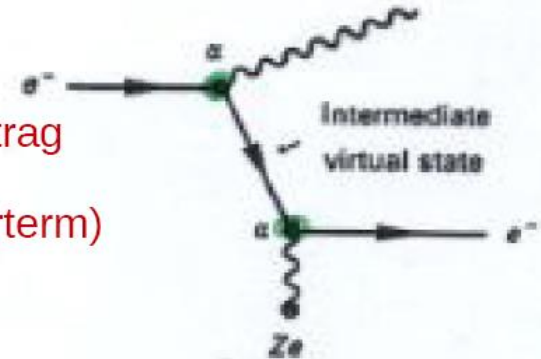


Photoelektrischer Effekt

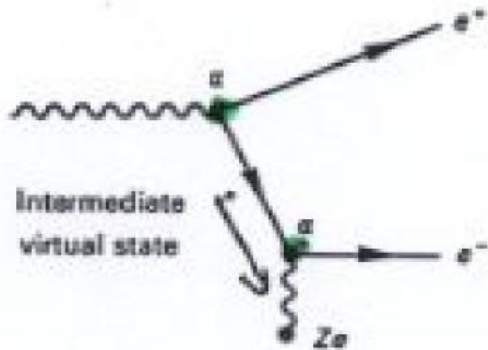


Elastische Streuung

Impulsübertrag
bei WW
(Propagatorterm)



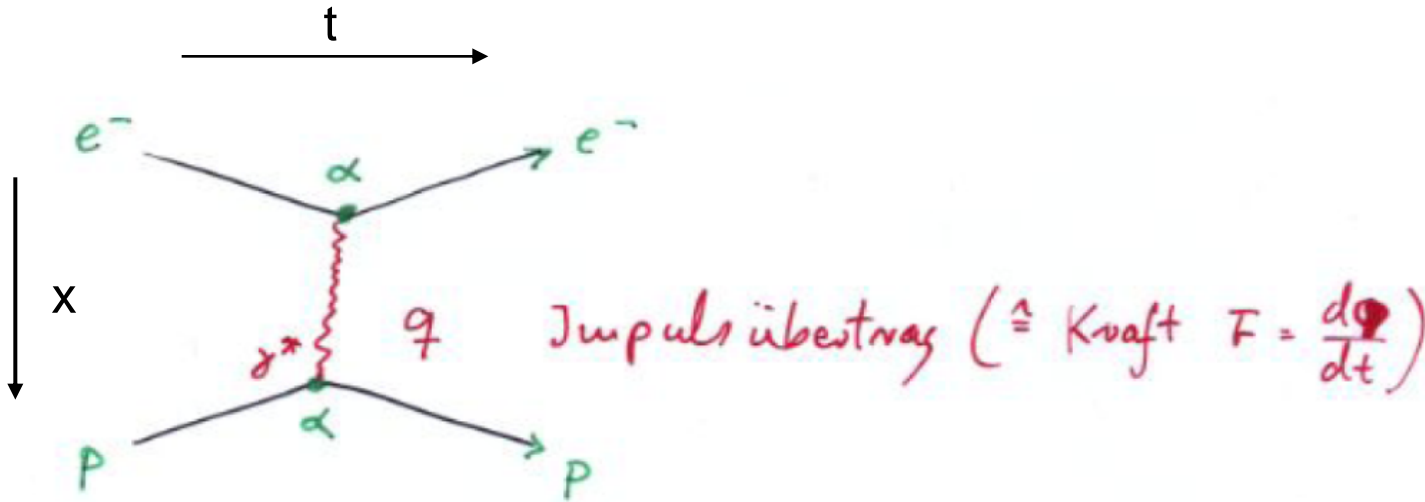
Bremsstrahlung



Paarproduktion



Selbst-Energie-Beiträge



Kopplung: Elektron – Photon
Photon – Proton

$$\sqrt{\alpha} \sim e \quad (\hbar=c=1)$$

$$\sqrt{\alpha}$$

Streuamplitude:

$$A(q) \sim \sqrt{\alpha} \cdot (1/q^2) \cdot \sqrt{\alpha}$$

$$= \alpha/q^2 = e^2/(4\pi q^2)$$

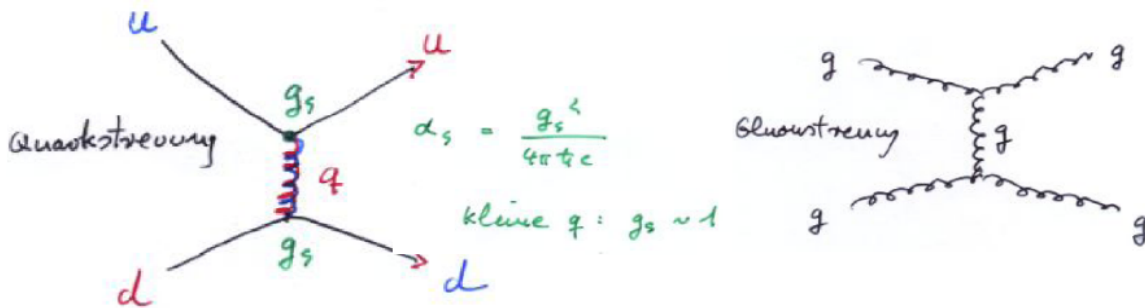
Wirkungsquerschnitt:

$$d\sigma/dq^2 = \alpha/(4\pi q^4) \quad (\text{Rutherfordstreuformel})$$

- EM Wechselwirkungen haben unendliche Reichweite
- EM Wechselwirkungen übertragen keine Ladungen (abelsche Theorie)
- Geladene Teilchen können gebundene Systeme formen (zB. Wasserstoff, $V(r)=-\alpha/(4\pi r)$)

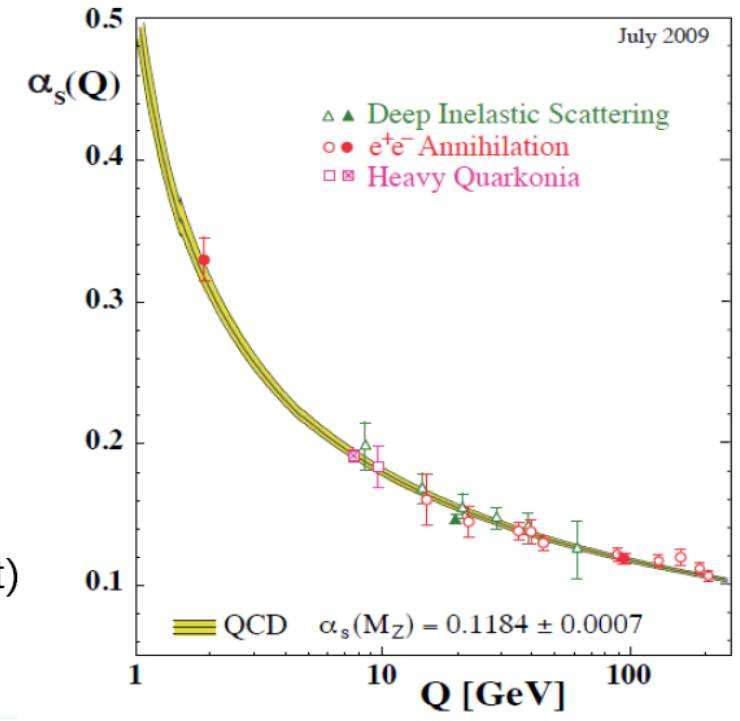
Starke Wechselwirkung

- Beschreibung durch Quantenchromodynamik (QCD)
- Kräfte durch Austausch masseloser Gluonen zwischen farbgeladenen Objekten
- Quarks und Gluonen tragen Farbladung (nicht-abelsch)



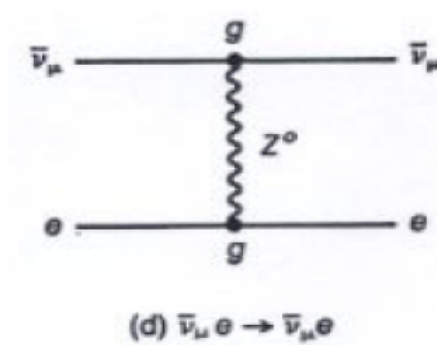
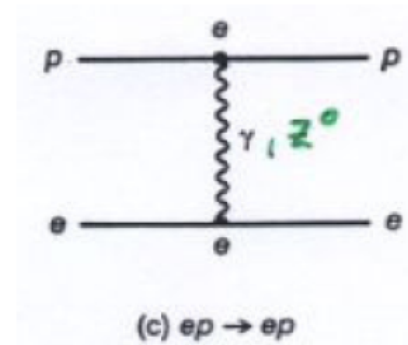
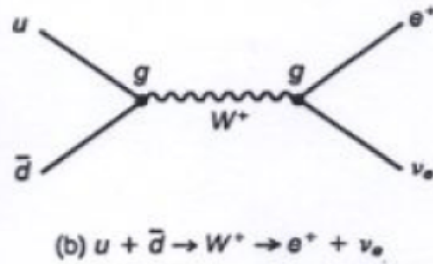
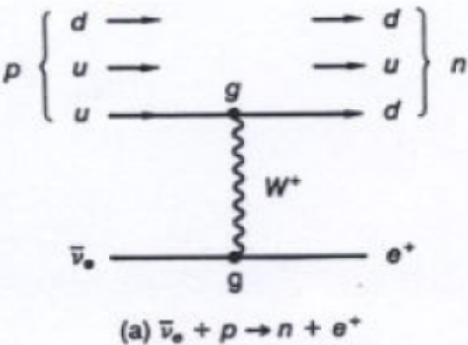
- Es gibt 3 Farbfreiheitsgrade (R,G,B), zB. Δ^{++} (uuu), $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)/\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})$
- Quarks können gebundene Systeme bilden (Hadronen) (Mesonen: $q\bar{q}$, Baryonen: qqq ; farbneutral)
- QCD Kopplung α_s nimmt mit Energie (Q) ab (asymptotische Freiheit)
- Es werden keine freien Quarks beobachtet (Confinement) **Confinement** verursacht durch Gluon-Selbstkopplungen

$$V(r) = -4/3 \cdot \alpha_s / r + k \cdot r \quad (k \sim 1 \text{ GeV/fm})$$



Schwache Wechselwirkung

- Beschreibung durch Quantumflavordynamik (QFD)
- Kräfte durch Austausch massiver Bosonen



$$\alpha_W = g_W^2 / (4\pi\hbar c) = 1/30 > \alpha_{EM}$$

Austausch virtueller W^+ , W^- , Z -Bosonen:

Propagator: $1/(q^2 + m^2)$ $m = m_Z$ oder m_W

Streuamplitude: $f(q^2) \sim g^2 / (q^2 + m^2)$

Schwache Kopplung vergleichbar mit EM Kopplung !

Bei kleinen q , schwacher Wirkungsquerschnitt \ll EM Wirkungsquerschnitt !

Gravitation

- Keine etablierte Quantengravitationstheorie
- Annahme: Kräfte durch Austausch masseloser Gravitonen

Newton: $F_{m_1, m_2} = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$

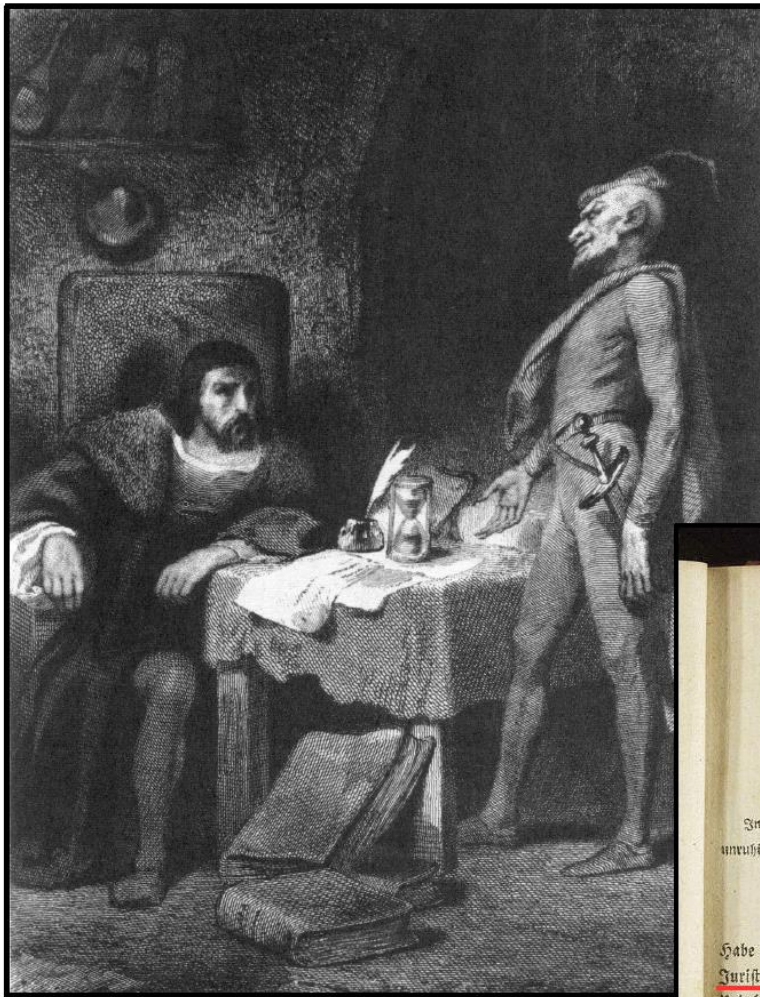
EM: $F_{e_1, e_2} = e_1 \cdot e_2 / (4\pi\epsilon_0 r^2)$

Kraft zwischen e^- , p in Wasserstoff: $F_{mp, me} / F_{ep, ee} \sim 6 \cdot 10^{-38}$

$\rightarrow \alpha_G = G \cdot m_p^2 / (\hbar c) \sim 6 \cdot 10^{-39}$

Experimenteller Nachweis von Gravitonen:

Gravitationswellen von kollabierenden Neutronensternen



- Noble Ziele...
- Etwa 220 Jahre später
- Die gleichen Fragen...

— 34 —

— a t.

In einem hochgewölbten, engen, gotischen Zimmer **F a u s t**
unruhig auf seinem Sessel am Tische.

F a u s t.

Habe nun, ach! Philosophie,
Juristerei und Medicin,
Und selber auch Theologie!
Durchaus studirt, mit heißem Bemühen.
Da steh' ich nun, ich armer Thor!
Und bin so klug als wie zuvor;
Heiße Magister, heiße Doctor gar,
Und ziehe schon an die zehnen Jahr,
Herauf, herab und quer und krumm,
Meine Schüler an der Nase herum —

3

Und sehe, daß wir nichts wissen können!
Das will mir schier das Herz verbrennen.
Swar bin ich geschickter als alle die Laffen,
Doctoren, Magister, Schreiber und Pfaffen;
Mich plagten keine Scrupel noch Zweifel,
Fürchte mich weder vor Hölle noch Teufel —
Dafür ist mir auch alle Freud' entrisen,
Wilde mir nicht ein was rechts zu wissen,
Wilde mir nicht ein, ich könnte was lehren,
Die Menschen zu bessern und zu bekehren.
Nuch hab' ich weder Gut noch Geld,
Noch Ehr' und Herrlichkeit der Welt,
Es möchte sein Hund so länger leben!
Drum hab' ich mich der Magie ergeben,
Ob mir durch Geistes Kraft und Mund
Nicht manch Geheimniß würde kund;
Daß ich nicht mehr mit saurem Schweiß,
Zu sagen brauche, was ich nicht weiß;
Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält,
Schar' alle Wirkenkraft und Samen,
Und thu' nicht mehr in Worten kramen.

Daß ich nicht mehr mit saurem Schweiß,
Zu sagen brauche, was ich nicht weiß;
Daß ich erkenne, was die Welt
Im Innersten zusammenhält,

Drei Säulen des Standardmodells

Quantenfeldtheorie

- Relativistische QM.
- Erzeugung/Vernichtung von Teilchen.

Symmetriebrechung

- Teilchenmasse (hier noch nicht diskutiert).

Symmetrien

- Fundamentale WW.
- Struktur der Materie