

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

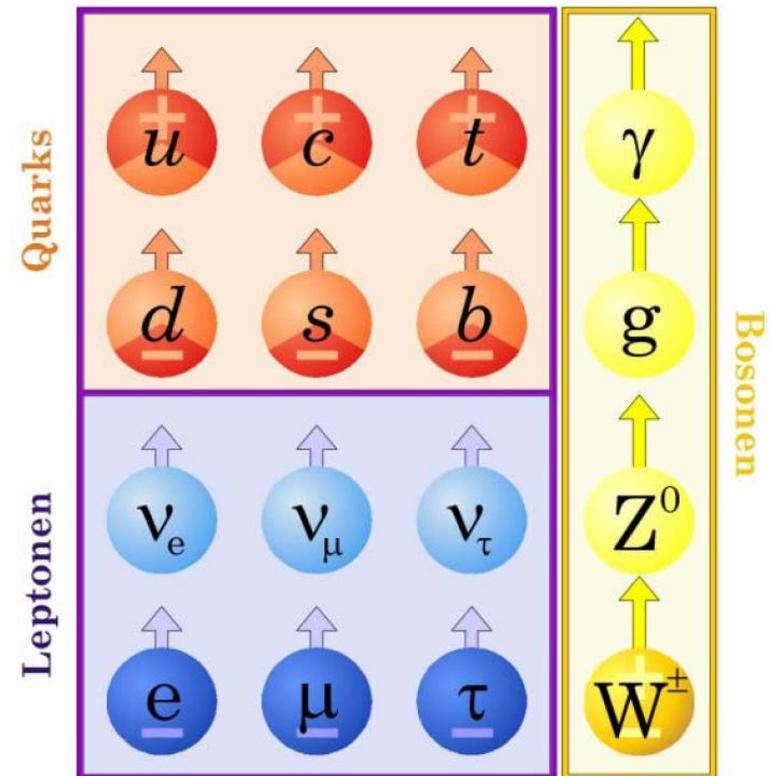
- treten in 3 Generationen (Familien) auf

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)

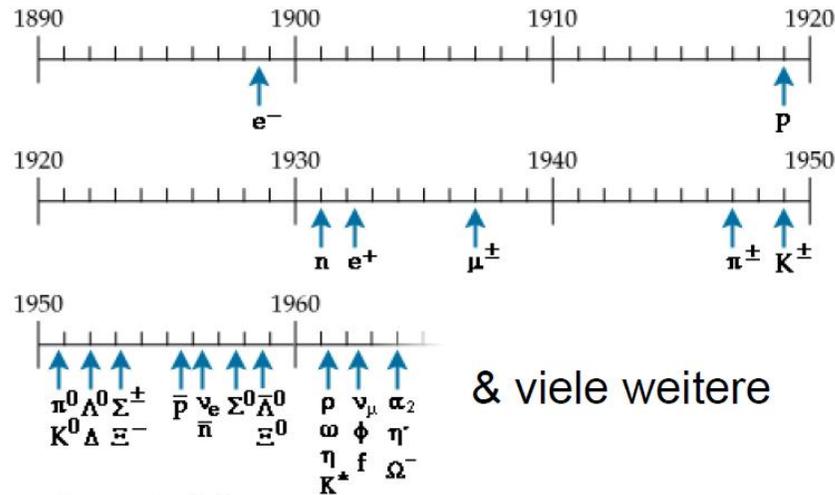
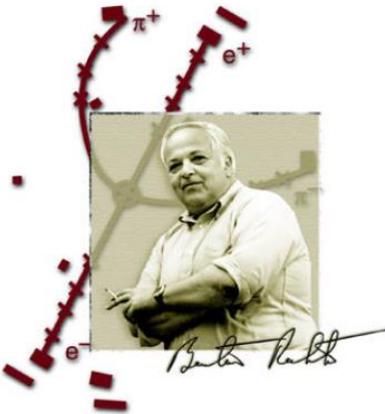
Leptonen (punktförmig)

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^-)

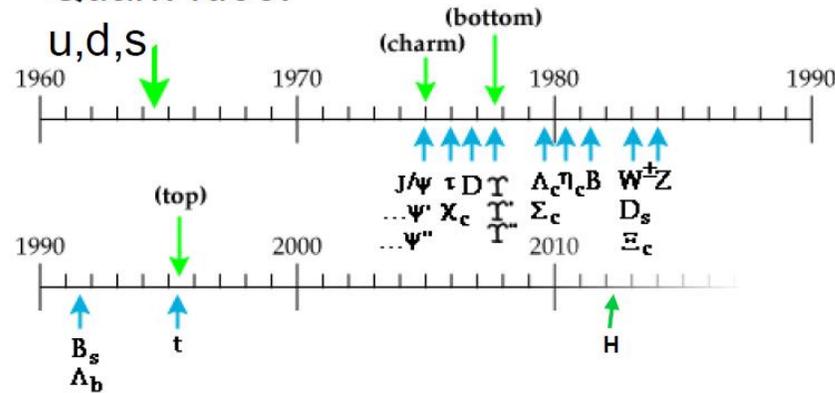


Historisches

- 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

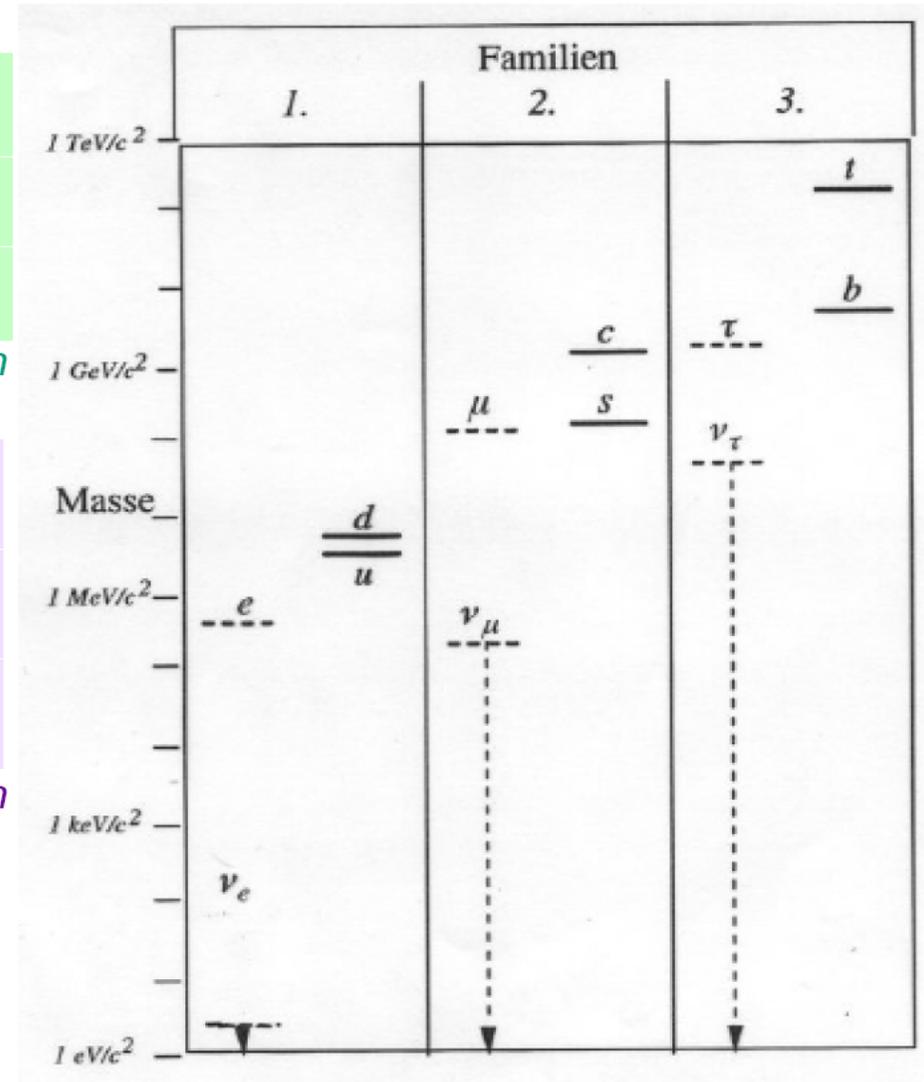
+ Antiteilchen

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
??

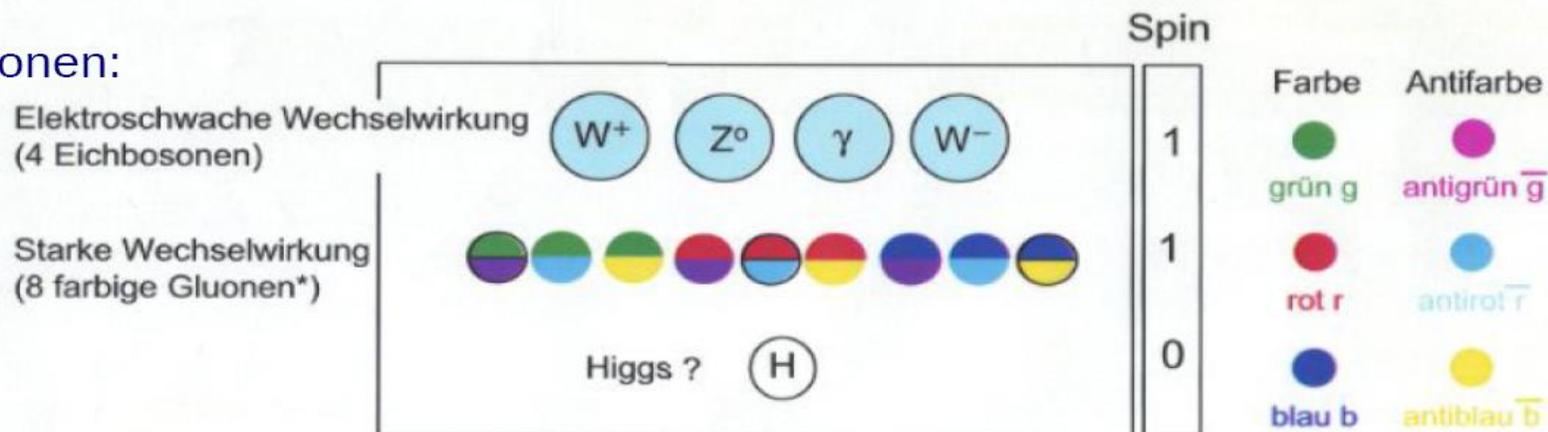
4.2 Fundamentale Wechselwirkungen

	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:



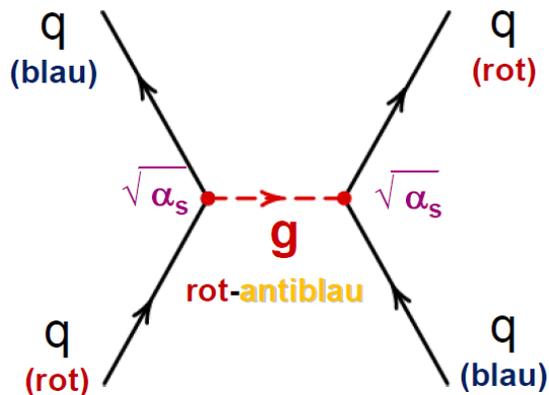
* Es gibt nur 2 farbige Gluonen, die ausschließlich aus Farbe und Antifarbe bestehen $\sqrt{\frac{1}{2}}(r\bar{r} - g\bar{g})$ und $\sqrt{\frac{1}{2}}(r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b})$
Der Zustand $\sqrt{\frac{1}{3}}(r\bar{r} + g\bar{g} + b\bar{b})$ ist farblos und wechselwirkt deshalb nicht

Eichbosonen

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

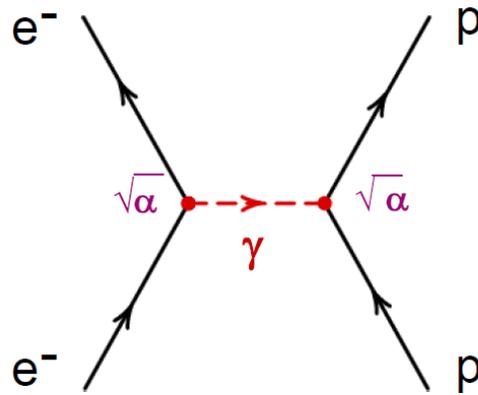
Starke Wechselwirkung

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



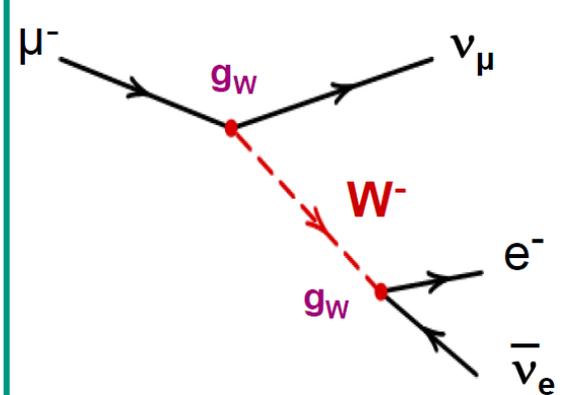
Elektromagnetische Ww.

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



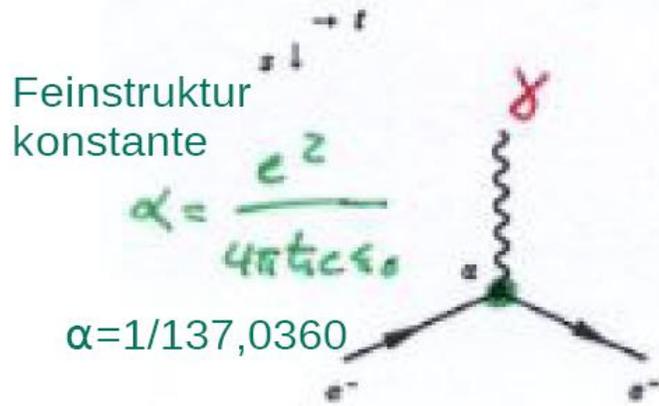
Elektromagnetische Wechselwirkung

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

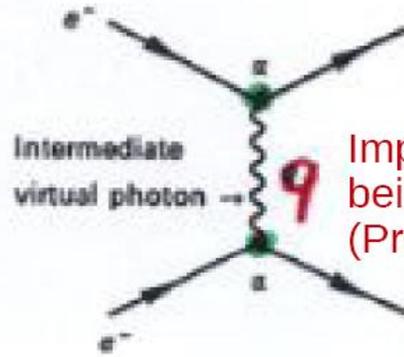
Feinstruktur
konstante

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

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



Photoelektrischer Effekt

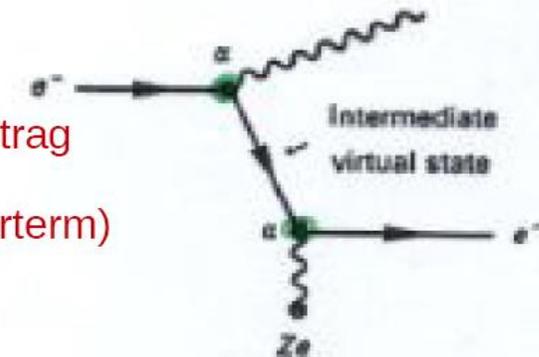


Intermediate
virtual photon

9

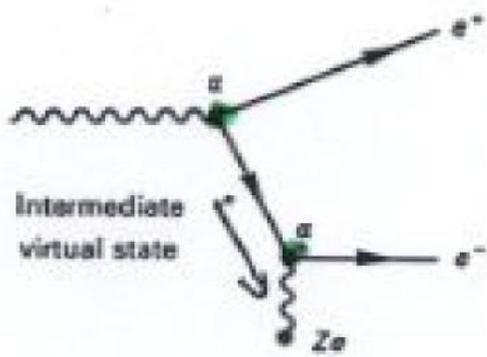
Impulsübertrag
bei WW
(Propagatorterm)

Elastische Streuung



Intermediate
virtual state

Bremsstrahlung

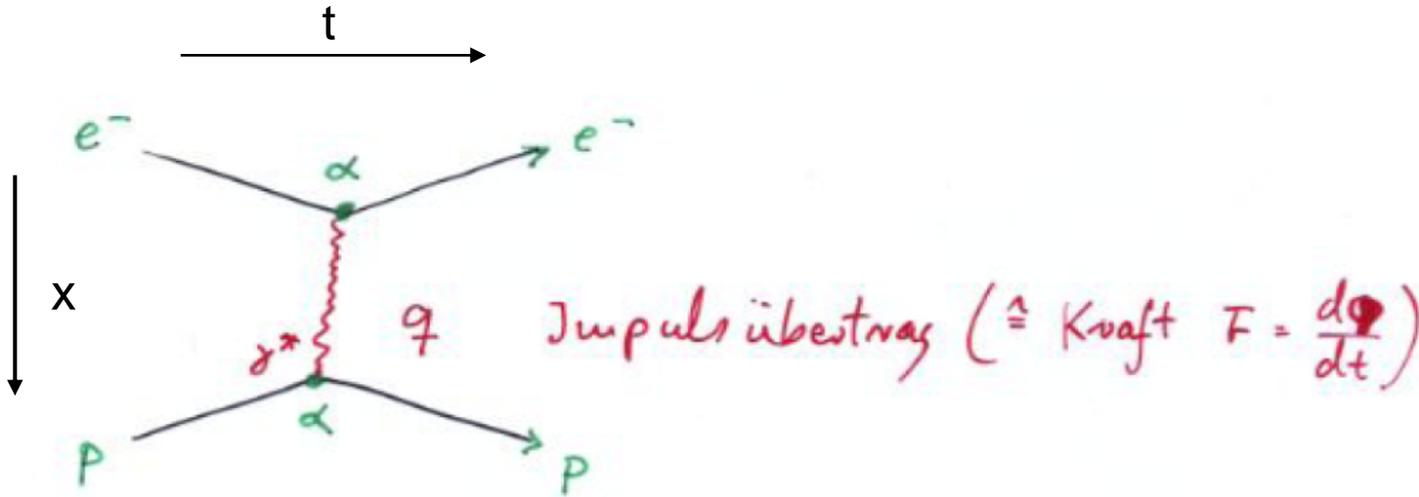


Intermediate
virtual state

Paarproduktion



Selbst-Energie-Beiträge



Kopplung: Elektron – Photon
Photon – Proton

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

$$\sqrt{\alpha}$$

Streuamplitude:

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

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

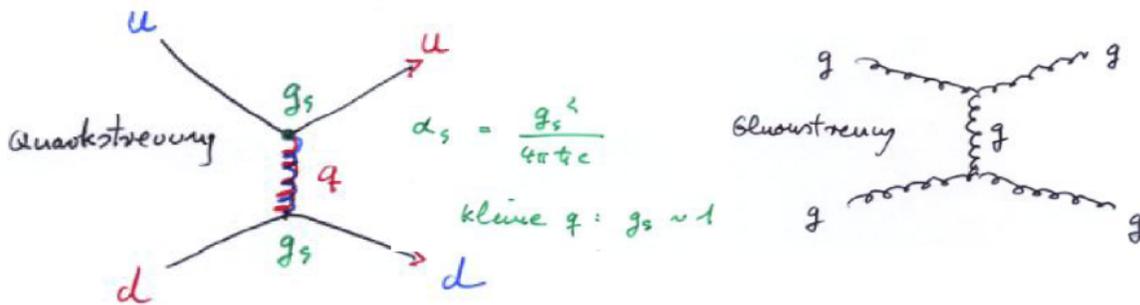
Wirkungsquerschnitt:

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

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

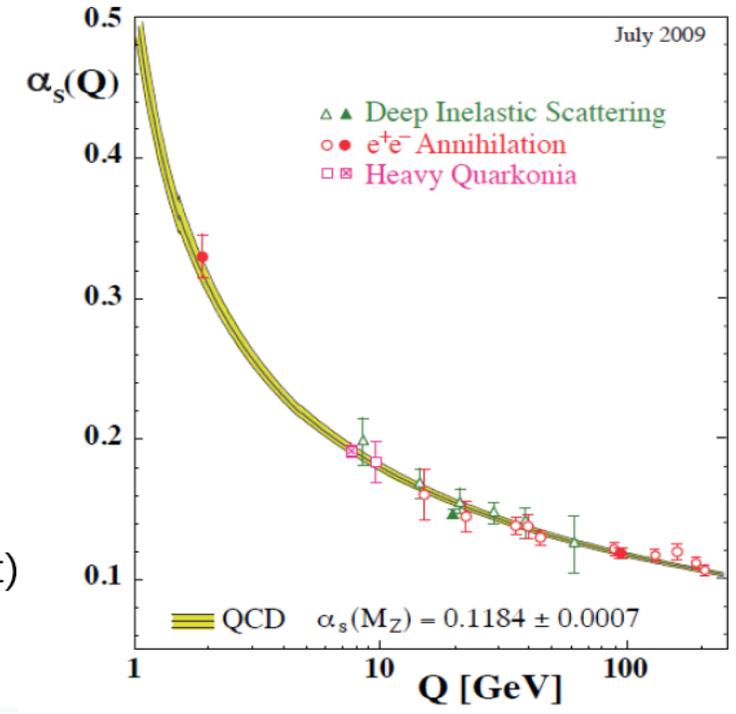
Starke Wechselwirkung

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



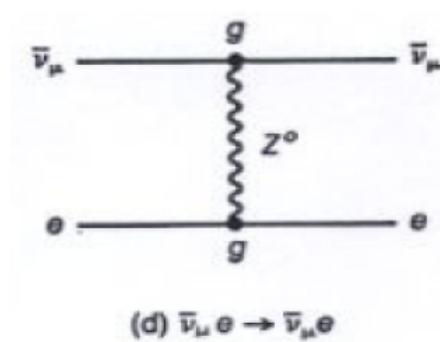
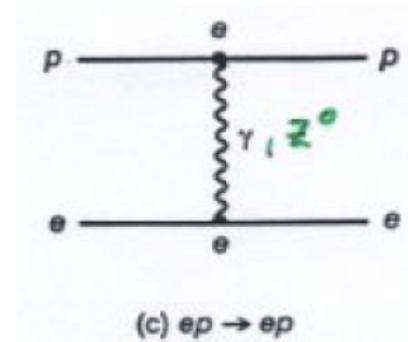
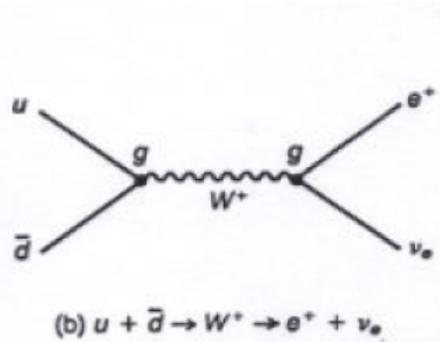
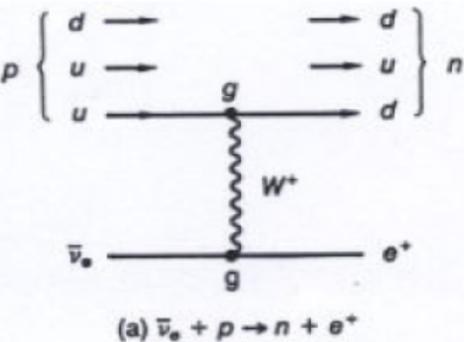
- Es gibt 3 Farbfreiheitsgrade (R,G,B), zB. Δ^{++} (uuu), $\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)/\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{Hadronen})$
- Quarks können gebundene Systeme bilden (Hadronen) (Mesonen: $q\bar{q}$, Baryonen: qqq ; farbneutral)
- QCD Kopplung α_s nimmt mit Energie (Q) ab (asymptotische 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: $F_{m_1, m_2} = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$

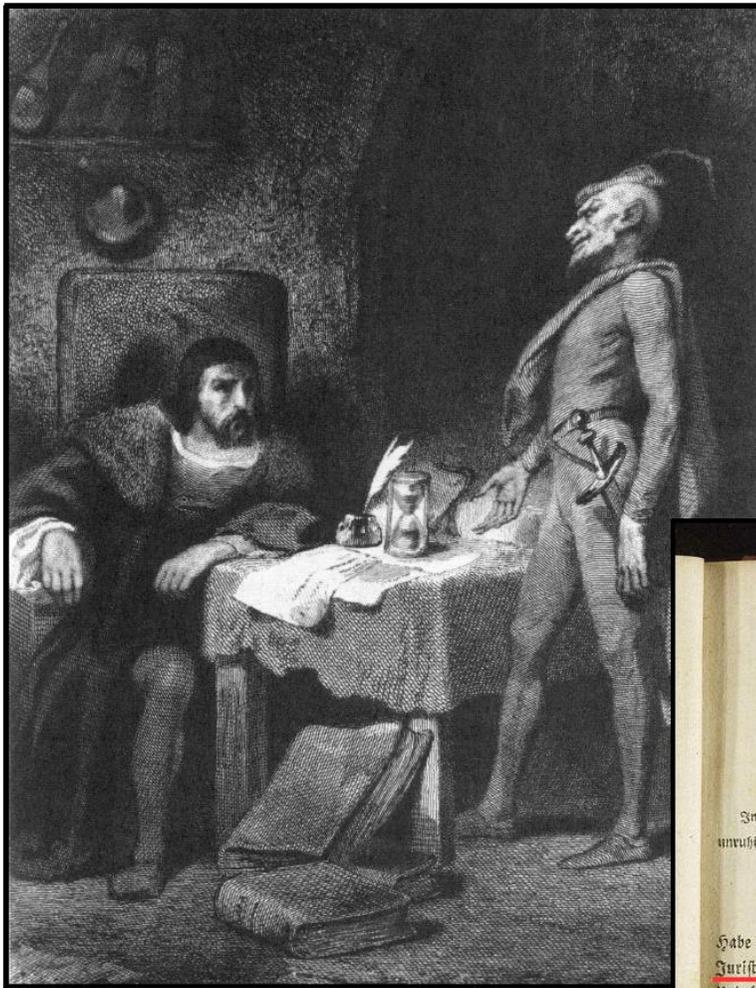
EM: $F_{e_1, e_2} = e_1 \cdot e_2 / (4\pi\epsilon_0 r^2)$

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

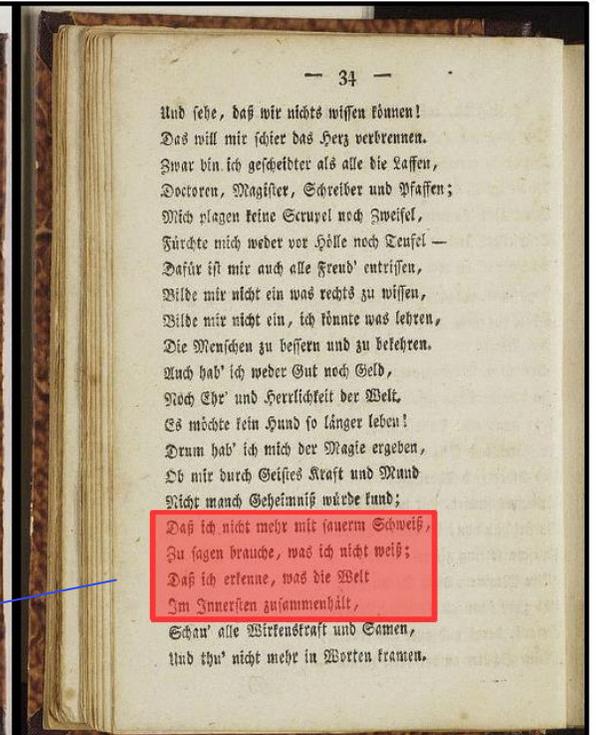
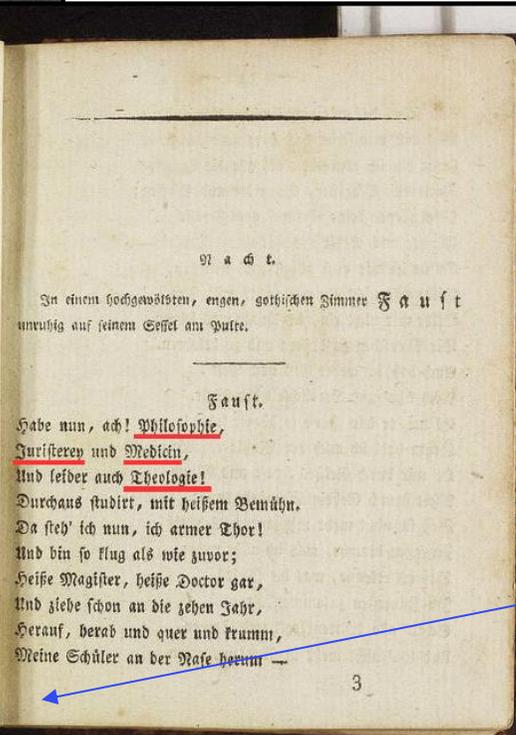
$\rightarrow \alpha_G = G \cdot m_p^2 / (\hbar c) \sim 6 \cdot 10^{-39}$

Experimenteller Nachweis von Gravitonen:

Gravitationswellen von kollabierenden Neutronensternen



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



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

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