

Einführung in die moderne Teilchenphysik

Dr. Stefan Schael
Max-Planck Institut für Physik
Werner Heisenberg Institut
Föhringer Ring 6
D-80805 München

1. Das Standardmodell der Teilchenphysik
2. Teilchendetektoren
3. Erhaltungssätze und Symmetrien
4. Die elektroschwache Wechselwirkung
5. Das Top Quark
6. Physik mit B-Hadronen
7. CP Verletzung
8. Das ATLAS Experiment
9. Neutrinos
10. Grenzen des Standardmodells

Literatur:

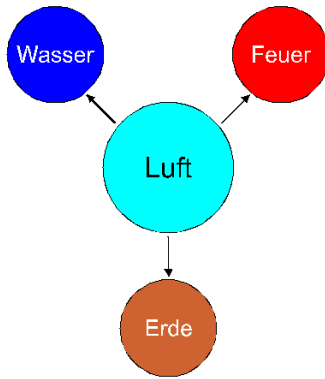
- H. Hilscher, “Elementare Teilchenphysik”, Vieweg,
- E. Lohrmann, “Hochenergiephysik”, Teubner,
- O. Nachtmann, “Elementarteilchenphysik”, Vieweg.

ftp:

[afmp02.mppmu.mpg.de:/pub/stefan/augsburg_ss98/](ftp://afmp02.mppmu.mpg.de:/pub/stefan/augsburg_ss98/)

Einleitung

Die Frage nach dem grundlegenden Aufbau der Materie gehört zu den ältesten Fragen der Menschheit. Die Antwort hängt stark vom Kulturkreis ab.

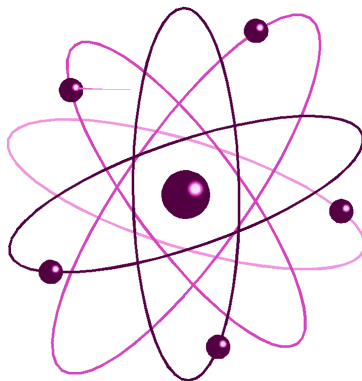


Karl Popper, "Logik der Forschung"

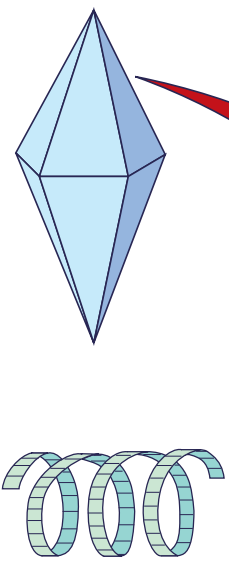
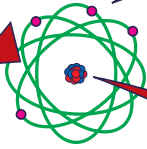
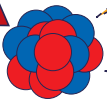
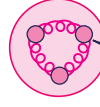
Physikalische Theorien können nicht bewiesen werden. Experimente können Theorien jedoch widerlegen.

"Bekanntlich berechtigen uns noch so viele Beobachtungen von weißen Schwänen nicht zu dem Satz, daß alle Schwäne weiß sind."

Der erste "Elementarteilchenphysiker" war Demokrit (460 v. Chr.) mit seiner Atomlehre.



Das Standardmodell der Teilchenphysik

Crystal Molecule	Atom	Atomic Nucleus	Elementary Particles	
			Hadrons Mesons  Baryons  Proton Neutron	Leptons $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ Pointlike Quarks $u, c, d, s, b, (t)$ 
1 cm	10^{-8} cm	10^{-12} cm	10^{-13} cm	?

Um kleine Strukturen aufzulösen braucht man hohe Energien. Dies folgt aus Heisenbergs Unschärferelation

$$\Delta p \cdot \Delta l \geq \hbar \quad (1)$$

d.h. $p \approx \hbar / \Delta l$.

$$\hbar = 6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

In der Teilchenphysik werden natürliche Einheiten, d.h. $\hbar = c = 1$ verwendet. **Energien** werden in **Elektronen-volt** gemessen:

$$1 \text{ eV} = (\text{Elementarladung}) \times (1 \text{ Volt}) = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$10^6 \text{ eV} = 1 \text{ MeV}, 10^9 \text{ eV} = 1 \text{ GeV}, 10^{12} \text{ eV} = 1 \text{ TeV}$$

Aus

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \quad \text{und} \quad p \approx \hbar / \Delta l$$

ergibt sich:

$$[\text{Energie}] = [\text{Masse}] = [\text{Impuls}] = \text{GeV}$$

$$[\text{Länge}] = \text{GeV}^{-1}$$

Die Umrechnung in SI-Einheiten erfolgt mit:

$$\hbar c = 1.97 \cdot 10^{-14} \text{ GeV cm} = 197 \text{ MeV f}$$

$$\text{wobei } 1 \text{ f} = 1 \text{ Fermi} = 10^{-13} \text{ cm}.$$

D.h. mit Teilchen von 1 GeV kann man Strukturen von:

$$l = \frac{\hbar c}{p} = \frac{1.97 \cdot 10^{-14} \text{ GeV cm}}{1 \text{ GeV}} = 1.97 \cdot 10^{-14} \text{ cm}$$

auflösen, was 1/4 der Ausdehnung des Protons entspricht.

Die Materie ist aus Fermionen (Spin $\frac{1}{2}$) aufgebaut.

Leptonen				
Generation	Name	Symbol	Masse [MeV]	elektr. Ladung
I	e-Neutrino	ν_e	$< 15 \cdot 10^{-6}$	0
	Elektron	e^-	0.511	-1
II	μ -Neutrino	ν_μ	< 0.17	0
	Müon	μ^-	105.7	-1
III	τ -Neutrino	ν_τ	< 24	0
	Tau	τ^-	1777	-1

Quarks				
Generation	Name	Symbol	Masse [MeV]	elektr. Ladung
I	up	u	≈ 5	+2/3
	down	d	≈ 7	-1/3
II	charm	c	≈ 1500	+2/3
	strange	s	≈ 150	-1/3
III	top	t	≈ 180000	+2/3
	beauty	b	≈ 4500	-1/3

Die Materie aus der wir bestehen und die uns umgibt setzt sich nur aus den Teilchen der I. Generation zusammen.

Proton: (uud), Neutron (ddu),

Atom: Protonen, Neutronen und Elektronen

Zu jedem Teilchen gibt es ein Anti-Teilchen mit gleicher Masse und Lebensdauer aber entgegengesetzter Ladung. Teilchen und Anti-Teilchen können immer nur paarweise erzeugt werden.

Die Wechselwirkungen zwischen den Fermionen wird durch Bosonen (ganzzahliger Spin) vermittelt. Wir kennen 4 fundamentale Kräfte (Wechselwirkungen):

Wechselwirkung	Austauschteilchen	Spin	Masse [GeV]	Quelle	Reichweite [m]
Gravitation	Graviton	2	0	Masse	∞
Elektromagnetisch	Photon	1	0	elek. Ladung	∞
Schwach	$W^{\pm}, Z^0$	1	80-90	schwache Ladung	10^{-18}
Stark	8 Gluonen	1	0	Farbladung	$\leq 10^{-15}$

Nur Quarks haben eine Farbladung, die “starke Kraft” wirkt also nicht auf Leptonen.



Im klassischen Bild erzeugt das elektrische Feld $\vec{E}(r)$ die Anziehungskraft zwischen den beiden Ladungen Q_1 und Q_2 im Abstand r :

$$\vec{F} = \vec{E}(r)Q_2 = \vec{e}_r \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

In der Quantenfeldtheorie wird die Kraft durch den Austausch von virtuellen Teilchen erzeugt. Der Impulsübertrag q bei Emission und Absorption der Photonen erzeugt die elektromagnetische Kraft.

Für 1 Photon:

Unschärferelation: $q \cdot r \approx \hbar$

Flugzeit: $t = r/c$

$$\Rightarrow \frac{q}{t} = \frac{\hbar c}{r^2}$$

$$\Rightarrow q = \frac{\hbar c}{r^2} \cdot t$$

$$F = \frac{dq}{dt} = \frac{\hbar c}{r^2}$$

Die Anzahl der ausgetauschten Photonen ist proportional zu den Ladungen Q_1 und Q_2 und $\hbar = c = 1$:

$$\Rightarrow F = \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Beide Bilder zur Beschreibung von Wechselwirkungen sind äquivalent.

Quanten-Elektro-Dynamik (QED)

Die Quantenfeldtheorie zur Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkung wurde von P. Dirac und R. Feynmann entwickelt. Die Coulomb Kraft zwischen 2 Elementarladungen im Abstand d ist:

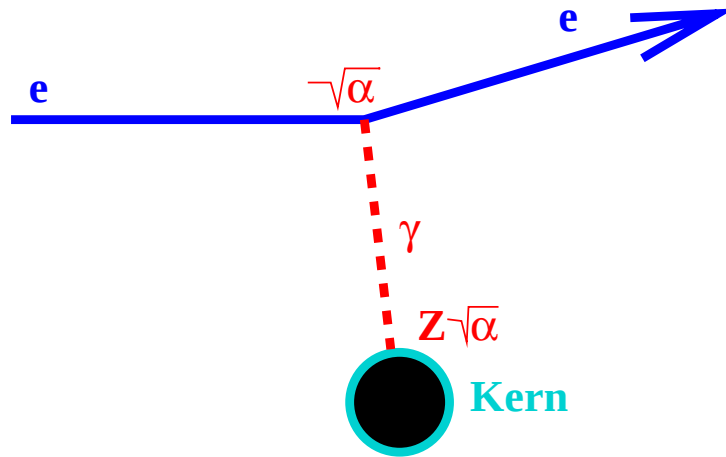
$$F_C = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \cdot \frac{1}{d^2} = \alpha \cdot \frac{1}{d^2} = \frac{1}{137.036} \cdot \frac{1}{d^2}$$

mit $[d] = GeV^{-1}$!

Die Feinstrukturkonstante α ist die dimensionslose Kopplungskonstante.

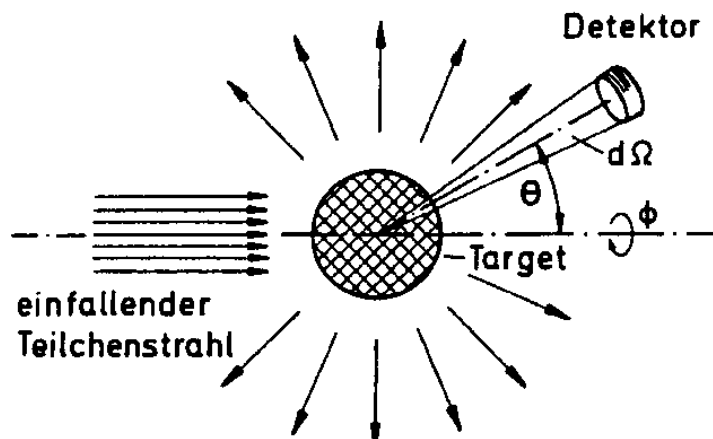
R. Feynmann hat eine anschauliche Methode entwickelt um QED-Prozesse zu berechnen: die Feynmann-Diagramme.

Beispiel: Rutherford-Streuung



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Z^2 \alpha^2}{4E^2} \cdot \frac{1}{\sin(\theta/2)^4}, \quad \alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$

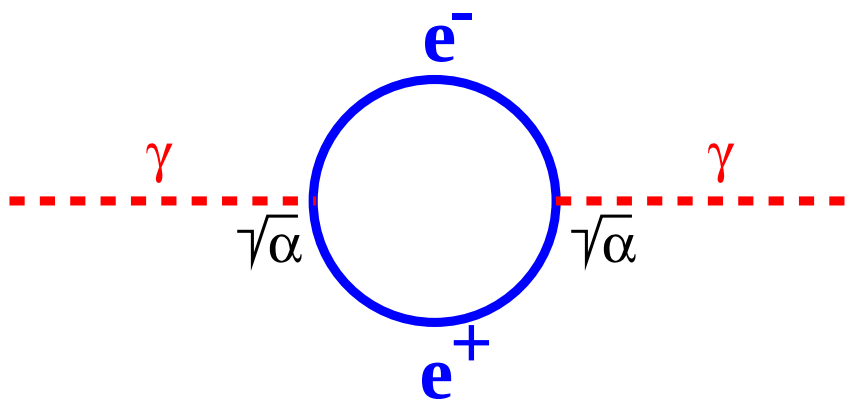
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\# \text{ Teilchen in } \theta, \phi / \text{Zeit}}{\# \text{ einfallender Teilchen je Flächen- und Zeiteinheit}}$$



In der QM kann die Energieerhaltung, wegen der Unschärferelation: $\Delta t \Delta E \geq \hbar$ durch sogenannte **virtuelle Teilchen** kurzzeitig verletzt werden:

$$\Delta t \leq \frac{\hbar}{E} = \frac{\hbar}{mc^2}$$

D.h. das einfache Feynmann-Diagramm zur Rutherford-Streuung wird durch Prozesse höherer Ordnung modifiziert, z.B. der Vakuum-Polarisation:



Die Gesamtwahrscheinlichkeit für den Prozeß ergibt sich durch aufsummieren aller möglichen Feynmann-Diagramme. Jeder Vertex trägt mit dem Gewicht der Kopplungskonstante

$$\sqrt{\alpha} = \sqrt{1/137} = 8.5 \cdot 10^{-2}$$

bei. Wegen $\alpha \ll 1$ konvergiert die Störungsreihe sehr schnell. Die QED ist die heute am besten experimentell überprüfte Theorie.

Die Reichweite der Wechselwirkung wird von der Flugstrecke der Austauschteilchen bestimmt:

$$d = c \cdot \Delta t \leq c \cdot \frac{\hbar}{E} = \frac{\hbar}{mc}$$

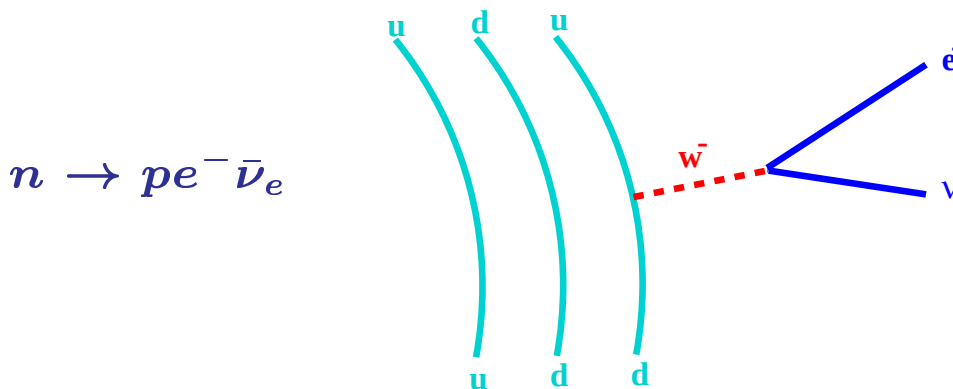
Je schwerer das Austauschteilchen desto kürzer die Reichweite der Wechselwirkung.

Beispiel:

Schwache Wechselwirkung: Austauschteilchen $W^\pm, Z^0$ mit Massen von 80 – 90 GeV.

$$d = \frac{\hbar c}{m[\text{GeV}]} = \frac{1.97 \cdot 10^{-14} \text{ GeV cm}}{80 \text{ GeV}} = 2.5 \cdot 10^{-18} \text{ m}$$

● Schwache WW: β Zerfall des Neutrons



Bis 1930 waren nur 2 fundamentale Teilchen, das Proton und das Elektron bekannt. Die Energie des Elektrons konnte im β Zerfall (Kern A $\rightarrow$ Kern B) gemessen werden:

$$E_\beta \leq E_A - E_B$$

Um den Energieerhaltungssatz zu retten, postulierte Wolfgang Pauli die Existenz eines neutralen, leichten und nur schwach wechselwirkenden Teilchen das im β -Zerfall erzeugt werden sollte.

Betrachten wir den Zerfall: $a \rightarrow b + c$
dabei sei das Teilchen a in Ruhe.

$$p_a = \begin{pmatrix} m_a \\ \vec{0} \end{pmatrix}, \quad p_b = \begin{pmatrix} E_b \\ \vec{p}_b \end{pmatrix}, \quad p_c = \begin{pmatrix} E_c \\ \vec{p}_c \end{pmatrix}$$

mit $m_a = E_b + E_c$ und $0 = \vec{p}_b + \vec{p}_c \Rightarrow \vec{p}_b = -\vec{p}_c$

$$|p_b|^2 = E_b^2 - \vec{p}_b^2 = m_b^2$$

$$(p_b + p_c) \cdot (p_b - p_c) = p_b^2 - p_c^2$$

$$\begin{pmatrix} m_a \\ \vec{0} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_b - E_c \\ 2\vec{p}_b \end{pmatrix} = m_b^2 - m_c^2$$

$$m_a \cdot (E_b - E_c) = m_b^2 - m_c^2$$

$$m_a \cdot (E_b - (m_a - E_b)) = m_b^2 - m_c^2$$

$$2m_a \cdot E_b - m_a^2 = m_b^2 - m_c^2$$

$$E_b = \frac{m_a^2 + m_b^2 - m_c^2}{2m_a}$$

$$E_b = \frac{m_a^2 + m_b^2 - m_c^2}{2m_a}$$

$$m_a = m(n) = 939.57 \text{ MeV}, m_b = m(e) = 0.511 \text{ MeV}, \\ m_c = m(p) = 938.27 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow E_e = E_b = 1.299 \text{ MeV}, \quad E_p = E_c = 938.27 \text{ MeV}$$

Enrico Fermi gab dem Teilchen den Namen **Neutrino** (italienisch: das kleine Neutrale). Erst 1956 gelang es Neutrinos an Kernreaktoren eindeutig nachzuweisen:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

In der Teilchenphysik kann die Gravitation vernachlässigt werden. Beispiel: Zwei Protonen im Abstand d :

$$F_C = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \cdot \frac{1}{d^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \cdot \frac{1}{d^2} = \alpha \cdot \frac{1}{d^2} = \frac{1}{137} \frac{1}{d^2}$$

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 m_2}{d^2} = \frac{G m_p^2}{\hbar c} \cdot \frac{1}{d^2} = 6.7 \cdot 10^{-39} \frac{1}{d^2}$$

mit $G = 6.707 \cdot 10^{-39} \hbar c \text{ GeV}^{-2}$ und $m_p \approx 1 \text{ GeV}$.

$$\Rightarrow \frac{F_C}{F_G} = \frac{7.2 \cdot 10^{-3}}{6.7 \cdot 10^{-39}} = 1 \cdot 10^{36}$$

Die Gravitation kann nicht vernachlässigt werden wenn

$$\frac{G m^2}{\hbar c} \approx 1 \Rightarrow m_{Planck} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 10^{19} \text{ GeV}$$

Ein entsprechendes Gravitationsfeld kann auch durch ein leichtes Teilchen entsprechend hoher Energie erzeugt werden. Dann gilt:

$$E \approx p \approx \frac{\hbar c}{\Delta x}$$

d.h. bei Energien von $E_{Planck} = m_{Planck} = 10^{19} \text{ GeV}$ oder Abständen und Zeiten von

$$l_{Planck} = 10^{-33} \text{ cm}, \quad t_{Planck} = \frac{l_{Planck}}{c} = 1 \cdot 10^{-43} \text{ s}$$

muß die Gravitation in die quantenmechanische Beschreibung der Wechselwirkungen mit einbezogen werden. Diese Skalen stellen die Grenzen der heutigen Physik dar. Es gibt bis heute keine Quantentheorie der Gravitation.

Die Starke Wechselwirkung

Baryonen: Gebundene Zustände von 3 Quarks

z.B. Protonen (uud), Neutronen (ddu), Δ^{++} (uuu)

Mesonen: Gebundene Zustände von 2 Quarks

z.B. Pionen π^+ ($u\bar{d}$), π^- ($\bar{u}d$)

Der Zerfall des $\Delta^{++} \rightarrow \pi^+ p$ wurde 1951 von Fermi entdeckt. Es befinden sich 3 identische Fermionen (u-Quarks, Spin 1/2) in einem völlig symmetrischen Grundzustand.

Pauli-Prinzip:

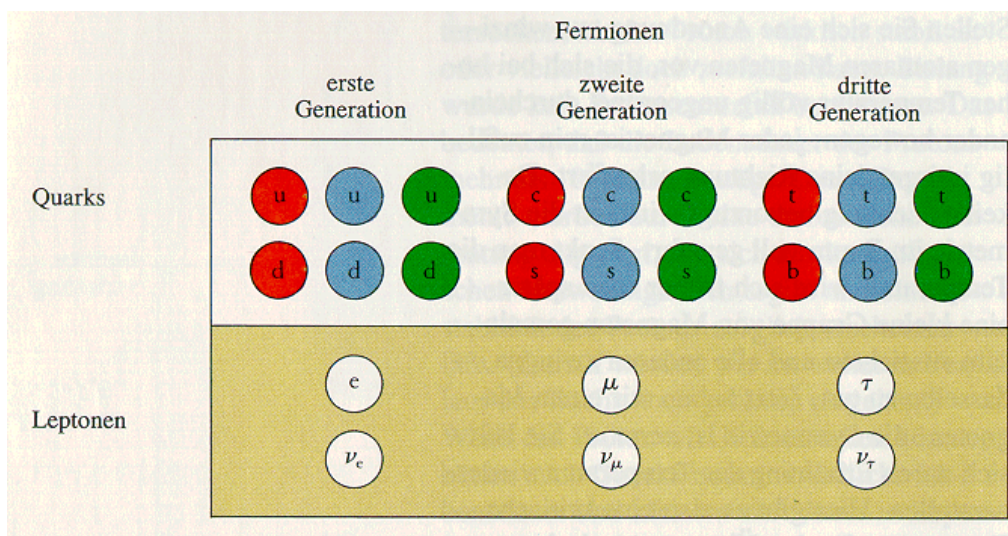
Zwei Fermionen können nicht gleichzeitig einen Zustand mit den selben Quantenzahlen besetzen.

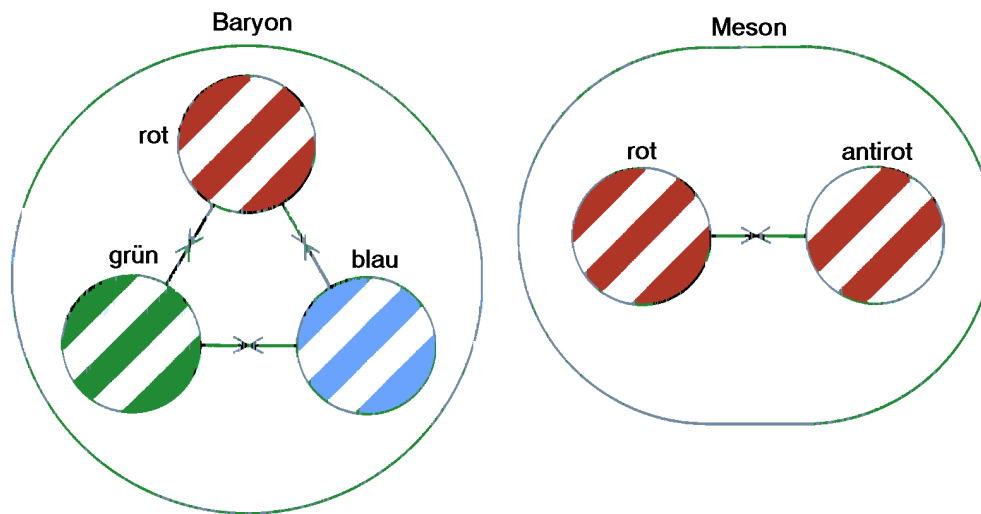
$\Rightarrow$ Es muß einen zusätzlichen Freiheitsgrad für die Quarks geben. Dieser Freiheitsgrad wird Farbe oder Farbladung genannt.

Es gibt Quarks mit den Farbladungen:

Rot (R), Grün (G) und Blau (B)

und den entsprechenden Anti-Farbladungen.





Alle Teilchen die wir in der Natur beobachten sind Farbneutral d.h. weiß:

- Gleiche Mischungen aus Rot, Grün und Blau (RGB),
- Gleiche Mischungen aus Anti-Rot, Anti-Grün und Anti-Blau ($\bar{R}\bar{G}\bar{B}$),
- Gleiche Mischungen aus Farbe und Komplementärfarbe ($R\bar{R}, G\bar{G}, B\bar{B}$).

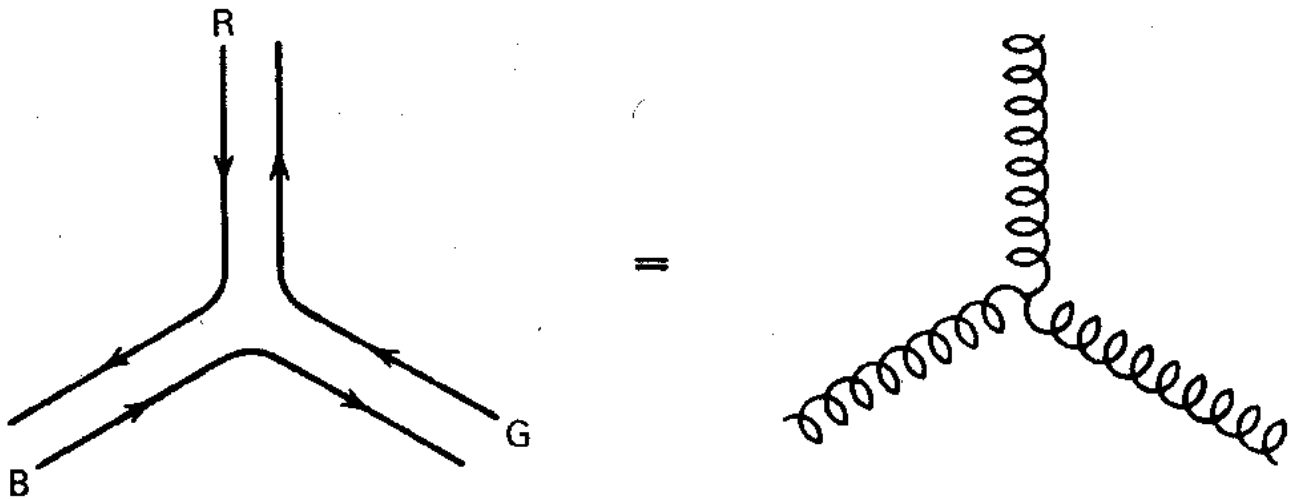
d.h. das Δ^{++} Teilchen besteht aus (u_R, u_G, u_B) . Alle bis heute beobachteten Teilchen lassen sich in diesem Schema klassifizieren.

Die Gluonen, die Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung, tragen selber eine Farbladung. Sie vermitteln die Bindungskräfte, die Mesonen und Baryonen gegen die elektromagnetische Abstoßung zusammenhalten.

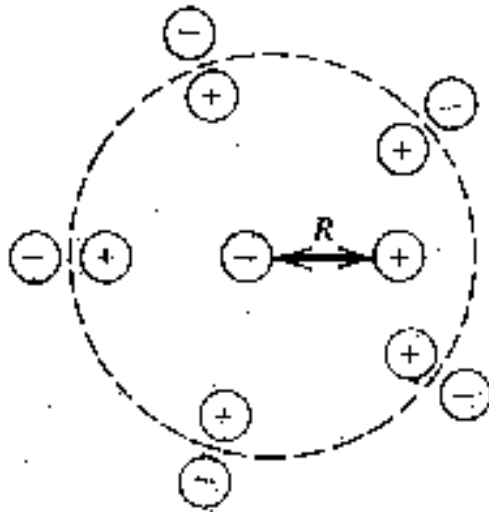
Mesonen und Baryonen zusammen werden als Hadronen bezeichnet.

In Analogie zur Quanten-Elektro-Dynamik (QED), die die elektromagnetische Wechselwirkungen beschreibt, erlaubt die Quanten-Chromo-Dynamik (QCD) eine Beschreibung der starken Wechselwirkung.

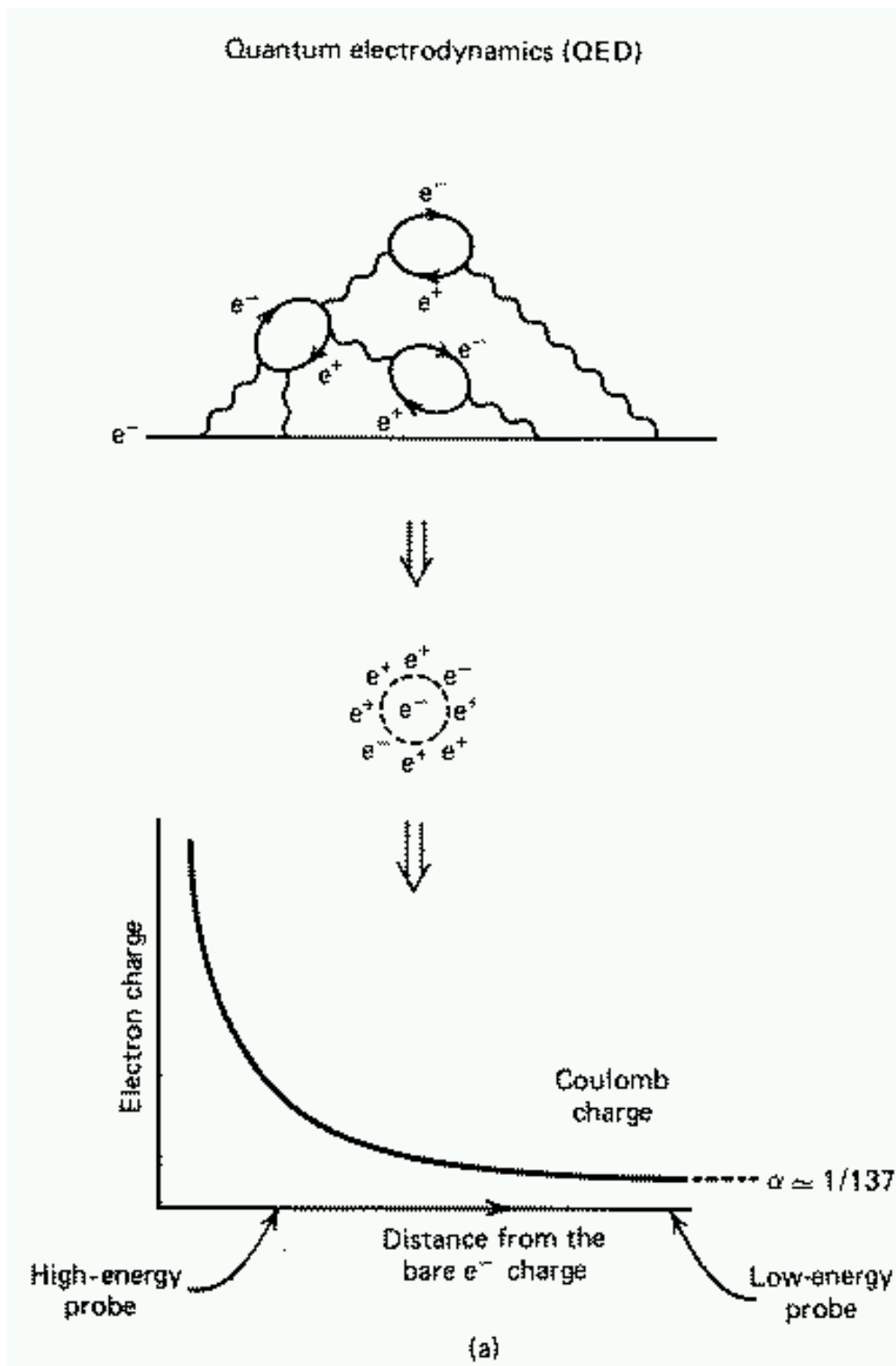
Die Tatsache, dass die Gluonen selber eine Farbladung haben hat entscheidende Konsequenzen für die Theorie.



Was ist die elektrische Ladung eines Elektrons bzw. die Farbladung eines Quarks ?



Die Vakuum-Polarisation schirmt die elektrische Ladung ab.



Die Elektronladung hängt vom Abstand der Probe ab.
 Kleine Abstände $\Leftrightarrow$ hoher Impulsübertrag ($\Delta p \Delta x \geq \hbar$)

Die Kopplungskonstante der elektromagnetischen Wechselwirkung ist

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137}$$

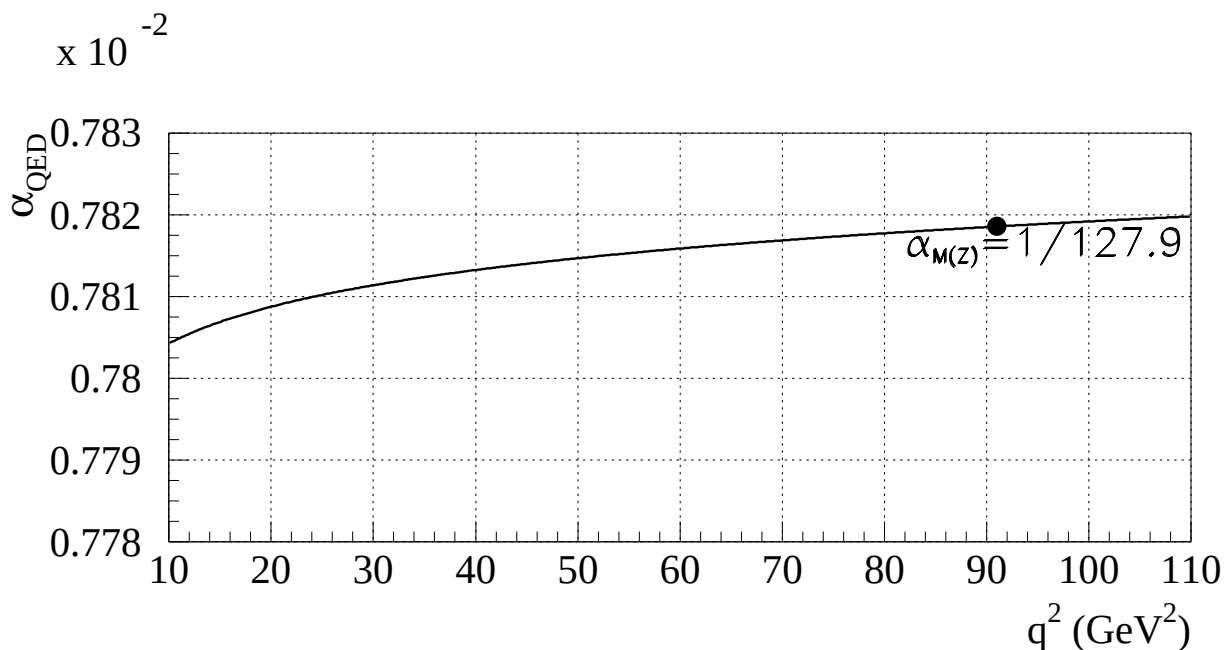
Wir haben gesehen, daß die Elektronladung vom Impulsübertrag q^2 abhängt:

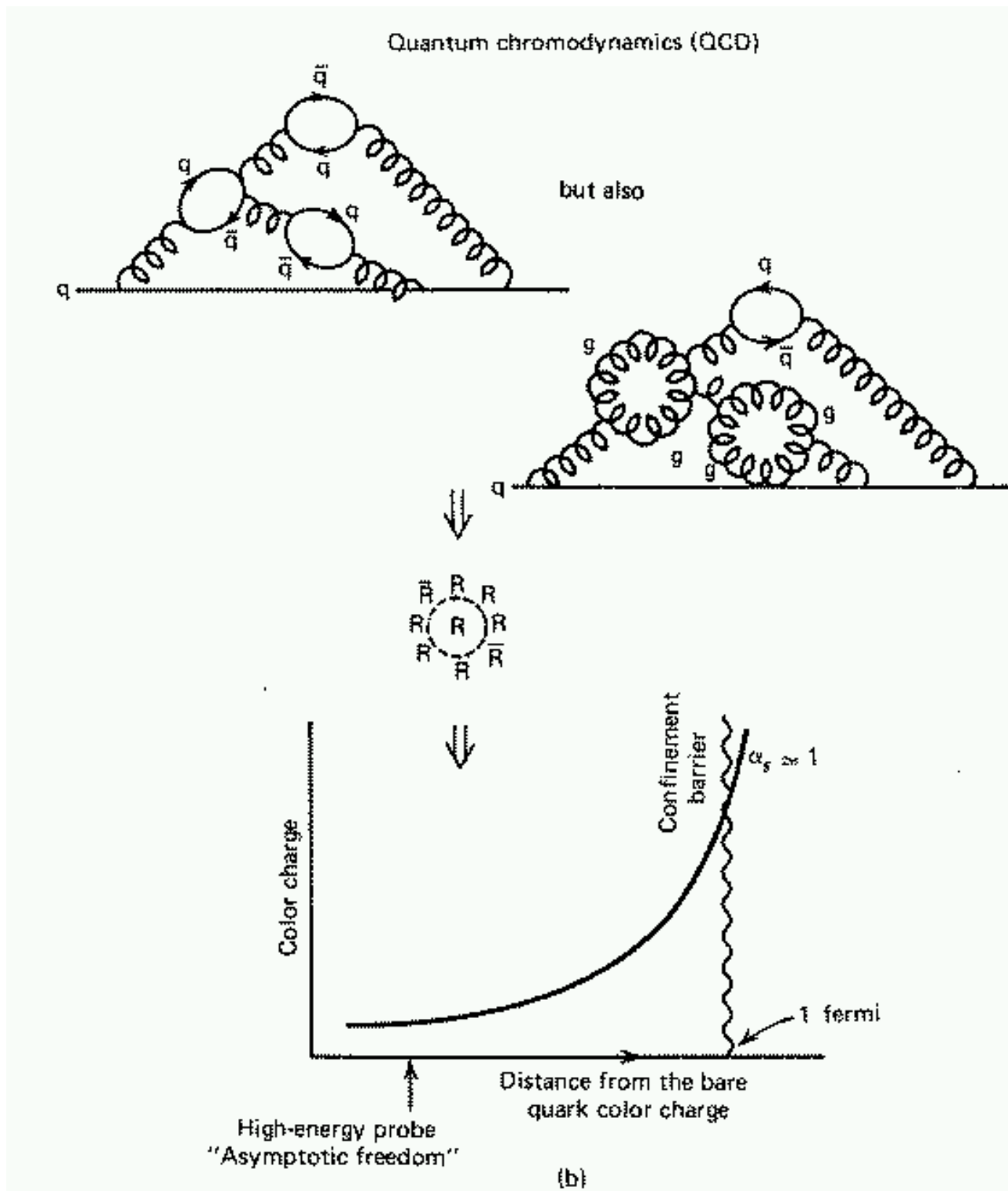
$$e^2(q^2) = e_0^2 \left(\frac{1}{1 - I(q^2)} \right)$$

d.h. $\alpha = \alpha(q^2)$:

$$\alpha(q^2) = \frac{\alpha(\mu^2)}{1 - \frac{\alpha(\mu^2)}{3\pi} \log \left(\frac{q^2}{\mu^2} \right)}$$

Wenn α bei einer definierten Skala μ^2 gemessen wurde, z.B. bei der Rutherford Streuung kann man $\alpha(q^2)$ bei einer anderen Skala (q^2) vorhersagen.

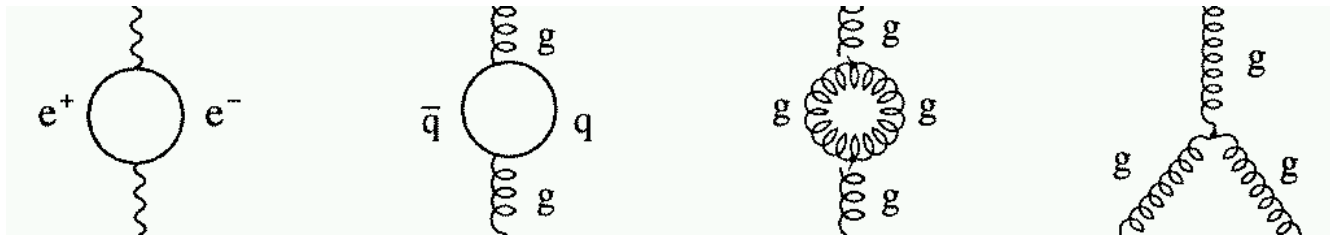




Die Farbladung wächst mit zunehmendem Abstand der Probe an.

Kleine Abstände $\Leftrightarrow$ hoher Impulsübertrag ($\Delta p \Delta x \geq \hbar$)

Die Farbladung der Gluonen in der QCD



ergibt für α_s , die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung:

$$\alpha_s(q^2) = \frac{12\pi}{(33 - 2n_f) \log\left(\frac{q^2}{\Lambda^2}\right)}$$

dabei ist n_f die Anzahl der Quarkflavour:

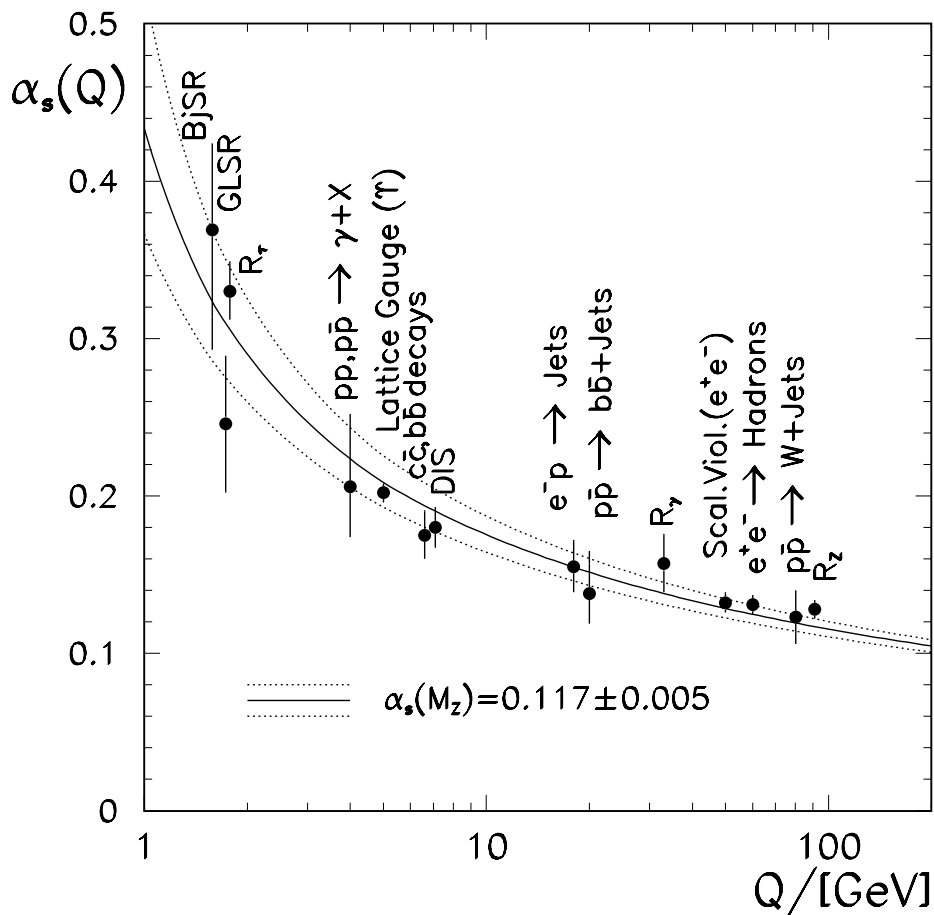
$n_f = 3$ für $q^2 < 1.5 \text{ GeV}^2$ $q=u,d,s$

$n_f = 4$ für $q^2 < 4.5 \text{ GeV}^2$ $q=u,d,s,c$

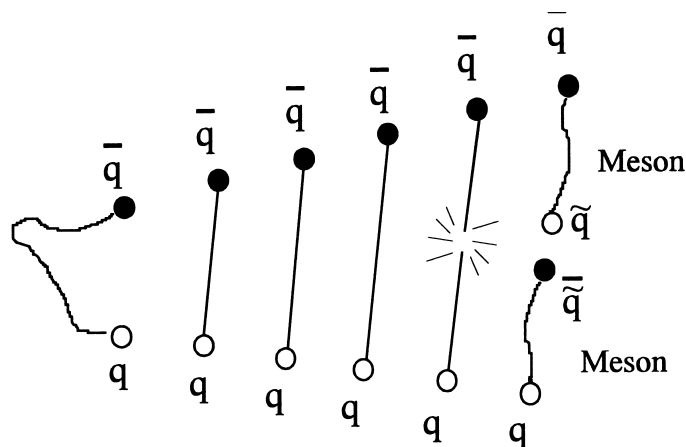
$n_f = 5$ für $q^2 < 170 \text{ GeV}^2$ $q=u,d,s,c,b$

$n_f = 6$ für $q^2 > 170 \text{ GeV}^2$ $q=u,d,s,c,b,t$

- Für $n_f \leq 16$ fällt α_s mit wachsendem Impulsübertrag !
- Für $q^2 \leq \Lambda^2$ ist α_s nicht definiert, $\Lambda = (209 \pm 40) \text{ MeV}$. Die quantenmechanische Beschreibung für die QCD mit Hilfe der für die QED entwickelten Störungstheorie bricht für $\alpha_s \geq 1$, d.h. $q \approx 500 \text{ MeV}$, zusammen.

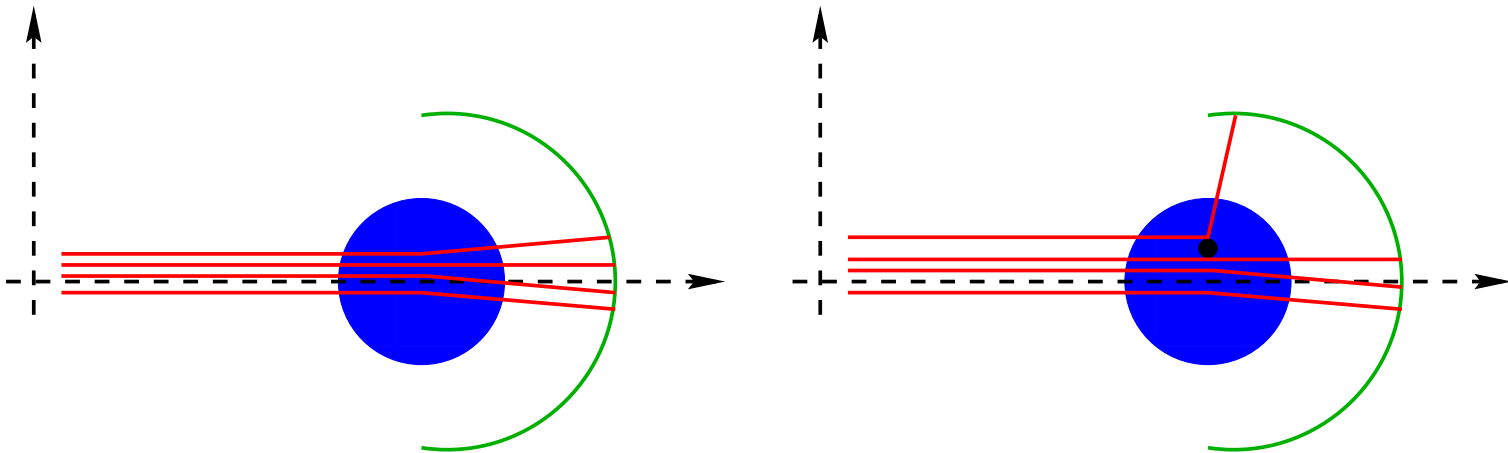
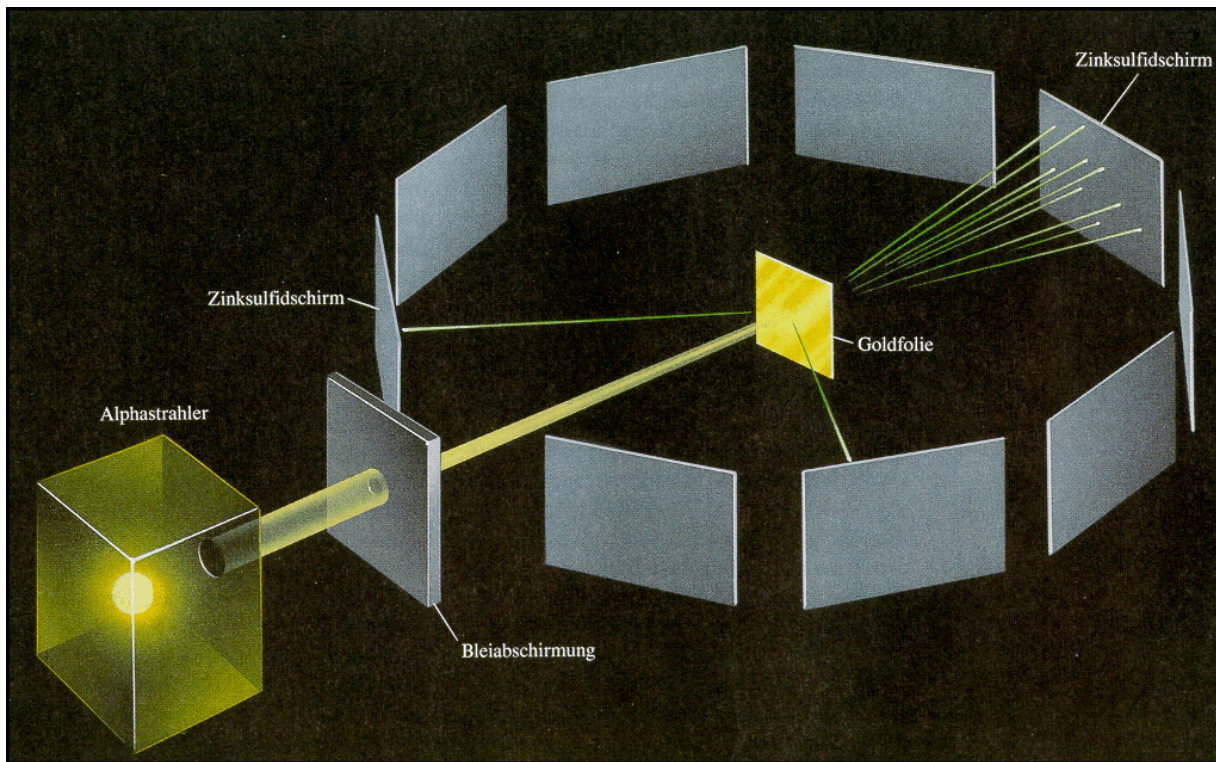


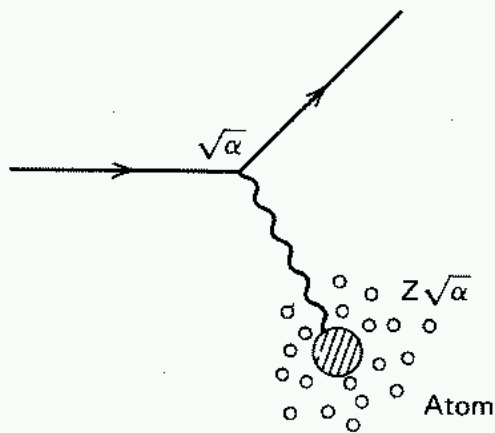
Für sehr kleine Abstände oder sehr hohe Energien können sich die Quarks frei bewegen ($\alpha_s \rightarrow 0$). Mit zunehmendem Abstand wächst die Energie die erforderlich ist, um ein Quark-Anti-Quark Paar zu trennen. Daher kann man keine einzelnen Quarks beobachten.



Woher wissen wir von der Existenz von Quarks, Gluonen und 3 Farbladungen ?

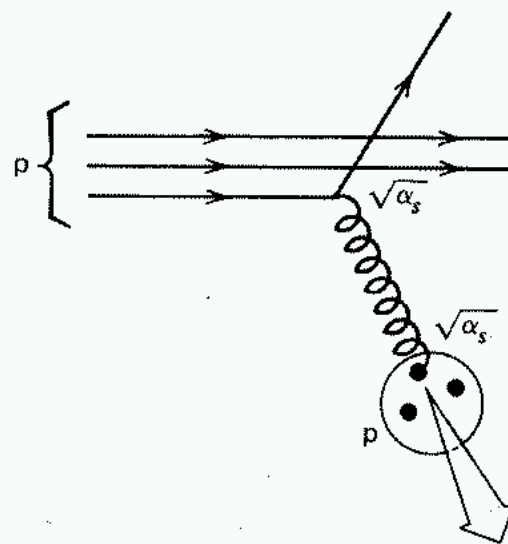
Rutherfordstreung, E. Rutherford 1912:





Probability $Z^2 \alpha^2$

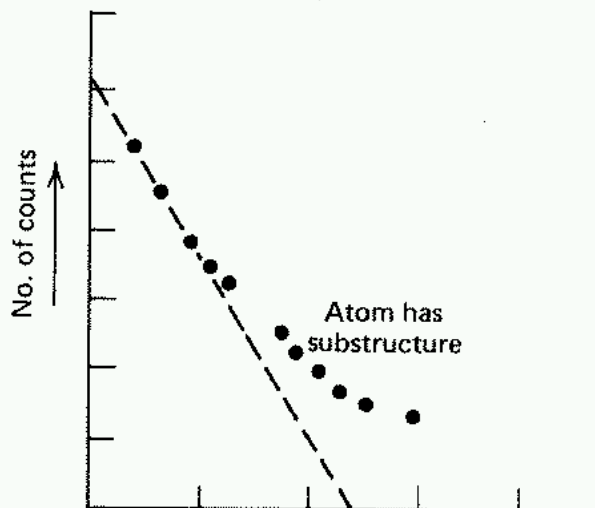
(a)



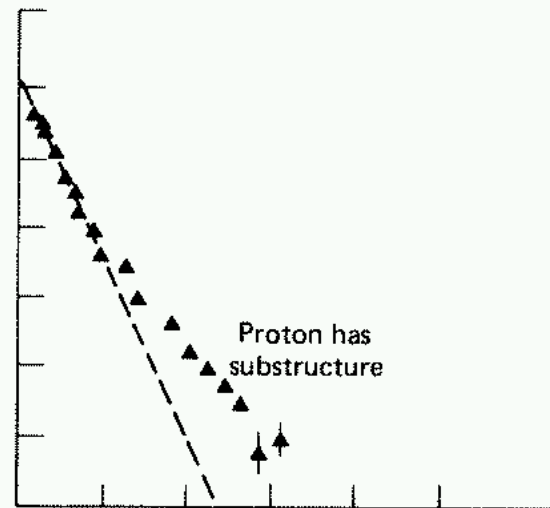
Probability α_s^2

(b)

Au target *Phil. Mag.* xxi, 669 (1911)



Proton target *Phys. Lett.* 46B, 471 (1973)



Transverse momentum
or scattering angle

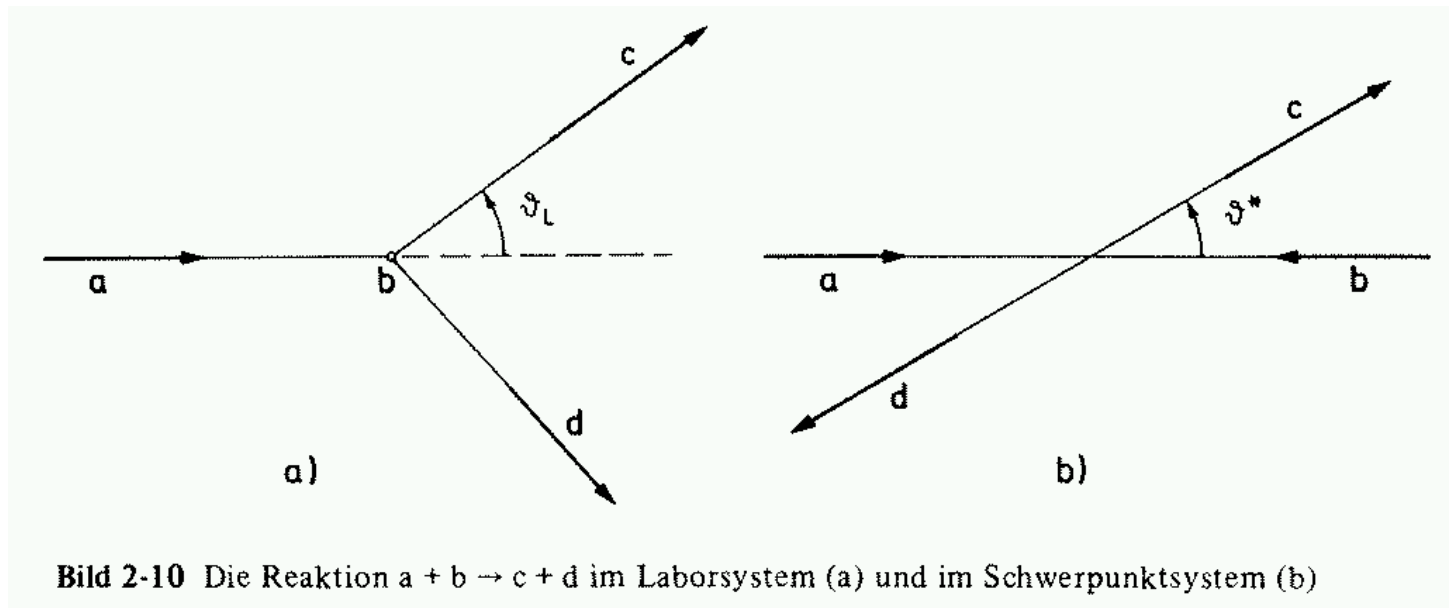
(c)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Z^2 \alpha^2}{4E^2} \cdot \frac{1}{\sin(\theta/2)^4}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \frac{\alpha_s^2}{4E^2} \cdot \frac{1}{\sin(\theta/2)^4}$$

Speicherringe erlauben höhere Schwerpunktsenergien !

Betrachten wir die 2-Teilchen Reaktion: $a + b \rightarrow c + d$.
Das Teilchen b sei im Laborsystem vor dem Stoß in Ruhe.



Die Viererimpulse sind dann:

$$p_a = \begin{pmatrix} E_L \\ \vec{p}_L \end{pmatrix}, \quad p_b = \begin{pmatrix} m_b \\ \vec{0} \end{pmatrix}, \quad p_c = \begin{pmatrix} E_c \\ \vec{p}_c \end{pmatrix}, \quad p_d = \begin{pmatrix} E_d \\ \vec{p}_d \end{pmatrix}.$$

Relativistisch invariant ist s , das Quadrat der Schwerpunktsenergie:

$$\begin{aligned} E_{cm}^2 = s &= (p_a + p_b)^2 = (p_a^* + p_b^*)^2 = (p_c + p_d)^2 \\ &= p_a^2 + 2(p_a, p_b) + p_b^2 \\ &= m_a^2 + 2E_L m_b + m_b^2 \\ \Rightarrow E_L &= \frac{s - m_a^2 - m_b^2}{2m_b^2} \end{aligned}$$

$$E_L = \frac{s - m_a^2 - m_b^2}{2m_b^2}$$

Betrachten wir nun die Kollision von einem Anti-Protonen mit einem Proton, jeweils mit einer Energie von 270 GeV. Die Schwerpunktsenergie ist dann:

$$\begin{aligned} s = E_{cm}^2 &= \left| \begin{pmatrix} E_a \\ \vec{p}_a \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_b \\ \vec{p}_b \end{pmatrix} \right|^2 \\ &= (E_a + E_b)^2 - (\vec{p}_a + \vec{p}_b)^2 \\ \Rightarrow \sqrt{s} = E_{cm} &= \left[(E_a + E_b)^2 - (\vec{p}_a + \vec{p}_b)^2 \right]^{1/2} \\ \vec{p}_a &= -\vec{p}_b \\ \Rightarrow \sqrt{s} = E_{cm} &= E_a + E_b = 540 \text{ GeV} \end{aligned}$$

Welche Energie müßte das Anti-Proton haben wenn das Proton in Ruhe wäre ?

$$E_L = \frac{(540 \text{ GeV})^2 - 2 \text{ GeV}}{2 \text{ GeV}} = 1.5 \cdot 10^5 \text{ GeV}$$

Bis heute können wir keine Teilchen auf diese Energie beschleunigen !

Der größte Beschleuniger der Welt ist der
Large Electron Positron Collider (LEP)
am europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf.
Diese Anlage ging nach einer Planungs- und Bauphase von
10 Jahren am 14. Juli 1989 in Betrieb.

Ein Ring mit 26,7 km Umfang, in einer Tiefe von ca. 100 m. Elektronen und Positronen wurden in der ersten Ausbaustufe auf bis zu 50 Milliarden Elektronenvolt (50 GeV) beschleunigt. Damit ergibt sich eine Schwerpunktsenergie von

$$E_{cm} = E_1 + E_2 = 100 \text{ GeV}$$

Diese Energie wird bis zum Jahre 2000 auf 100 Milliarden Elektronenvolt (100 GeV) pro Strahl, d.h. $E_{cm} = 200 \text{ GeV}$ gesteigert. 1998 haben wir bereits $E_{cm} = 182 \text{ GeV}$ erreicht.

Warum immer höhere Energien ?

- Entsprechend Einsteins Formel $E = m_0 c^2$ könnten neue, bisher unbekannte Teilchen produziert werden.
- $E_{cm} = 200 \text{ GeV}$ entspricht Abständen von

$$x = \frac{\hbar c}{E_{cm}} = 1 \cdot 10^{-16} \text{ cm} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ f}$$

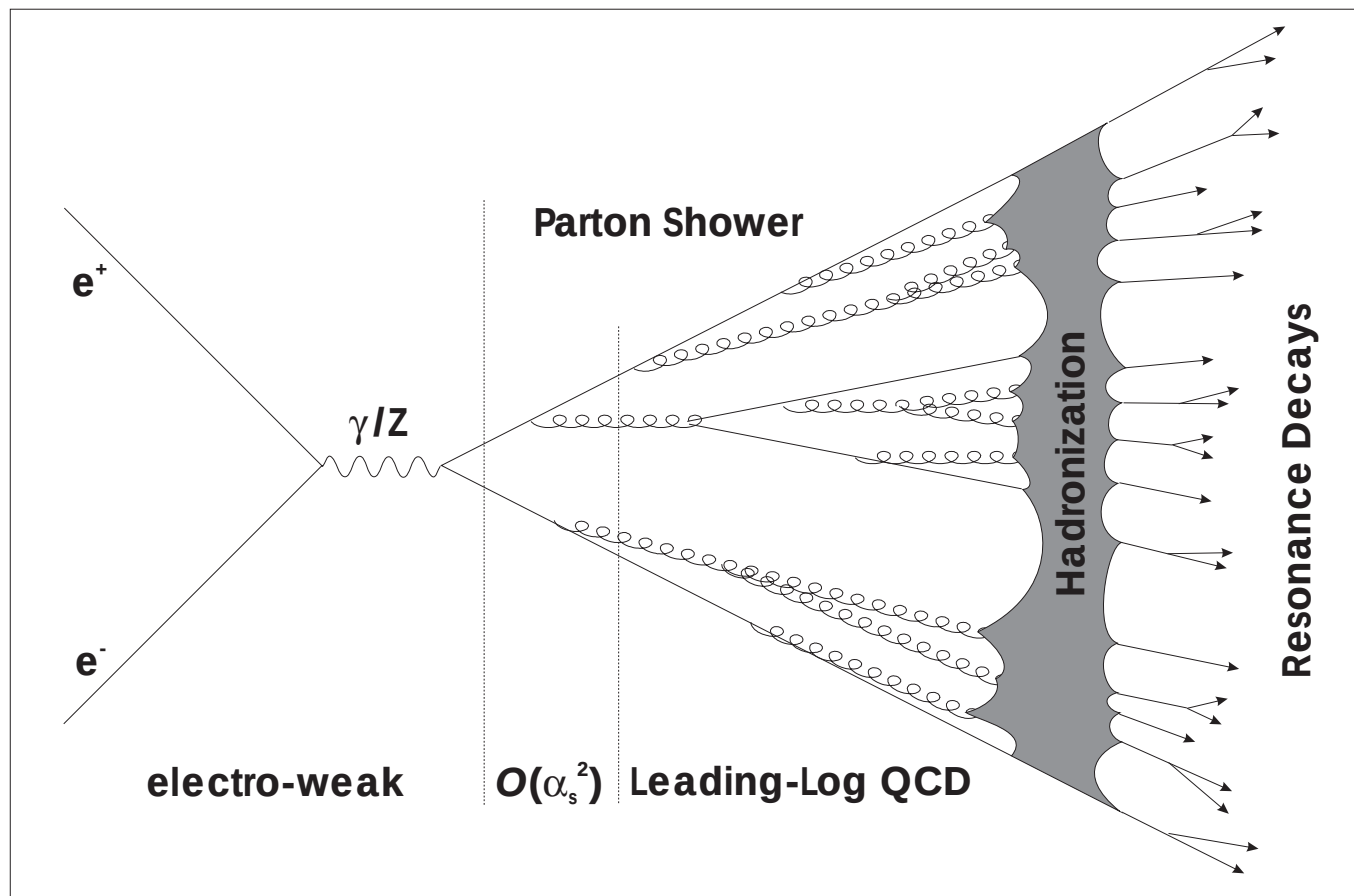
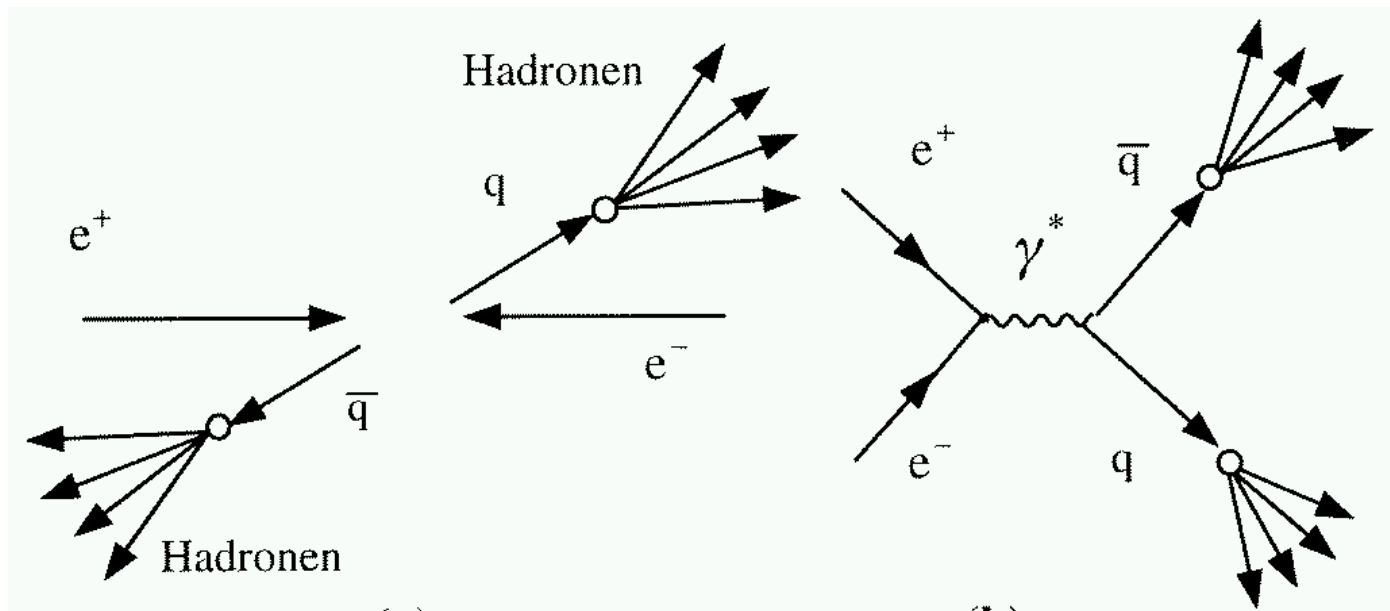
d.h. LEP ist das beste Mikroskop der Welt !

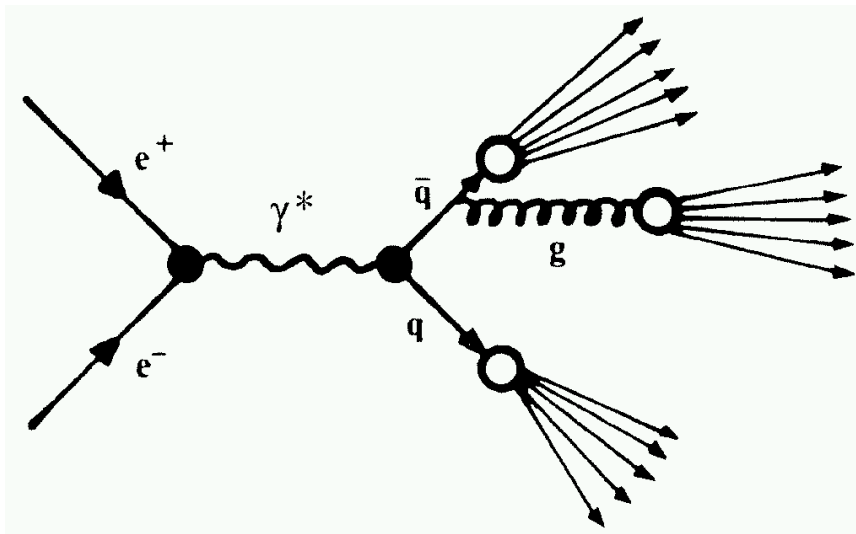
- Für ein ideales Gas gilt:

$$\langle E_{kin} \rangle = \left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle = \frac{3}{2} k T$$

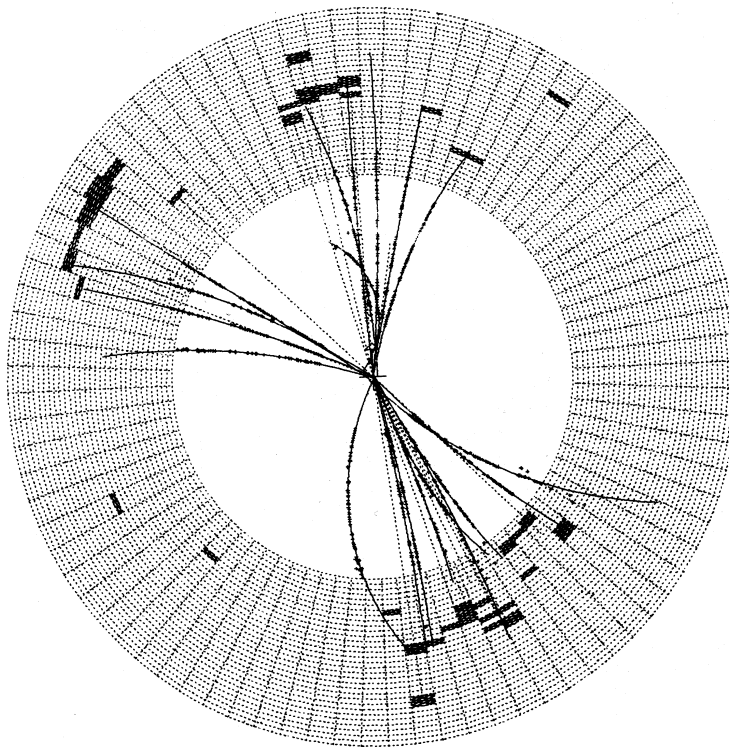
mit der Boltzmann Konstanten $k = 8.617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$.
D.h. $E_{cm} = 200 \text{ GeV}$ entspricht einer Temperatur von $2 \cdot 10^{15} \text{ K}$. Diese Temperatur hatte das Universum wahrscheinlich ca. 10^{-10} s nach dem Urknall !

Was passiert wenn Elektronen und Positronen bei hoher Energie aufeinander treffen ?





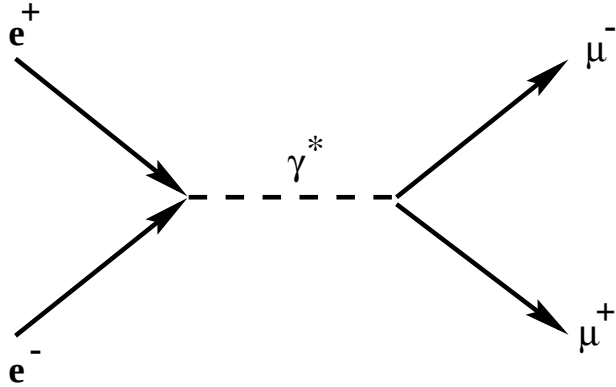
Das Gluon wurde erstmals direkt beobachtet am e^+e^- Speicherring PETRA am DESY in Hamburg 1987 ($E_{cm} = 20 \text{ GeV}$).



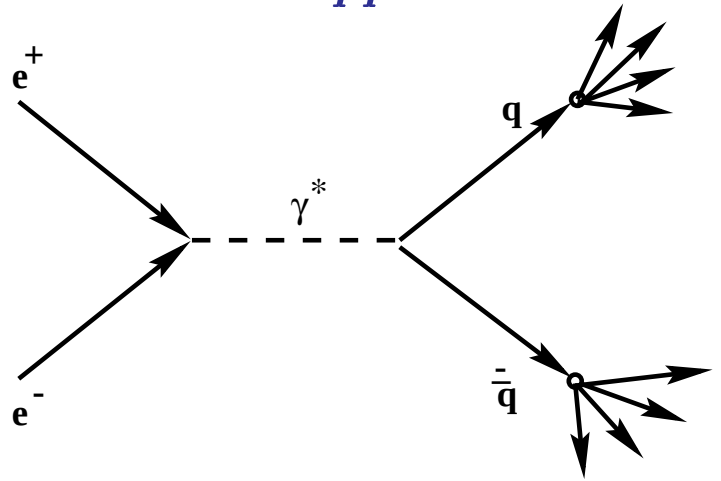
Die Wahrscheinlichkeit ein Gluon abzustrahlen ist proportional zu $\sqrt{\alpha_s}$. Aus der Anzahl der 2-Jet und 3-Jet Ereignisse läßt sich somit α_s bestimmen.

Warum 3 Farben ?

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



$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$$



$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q}) = N_C \cdot \sum e_i^2 \cdot \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$$

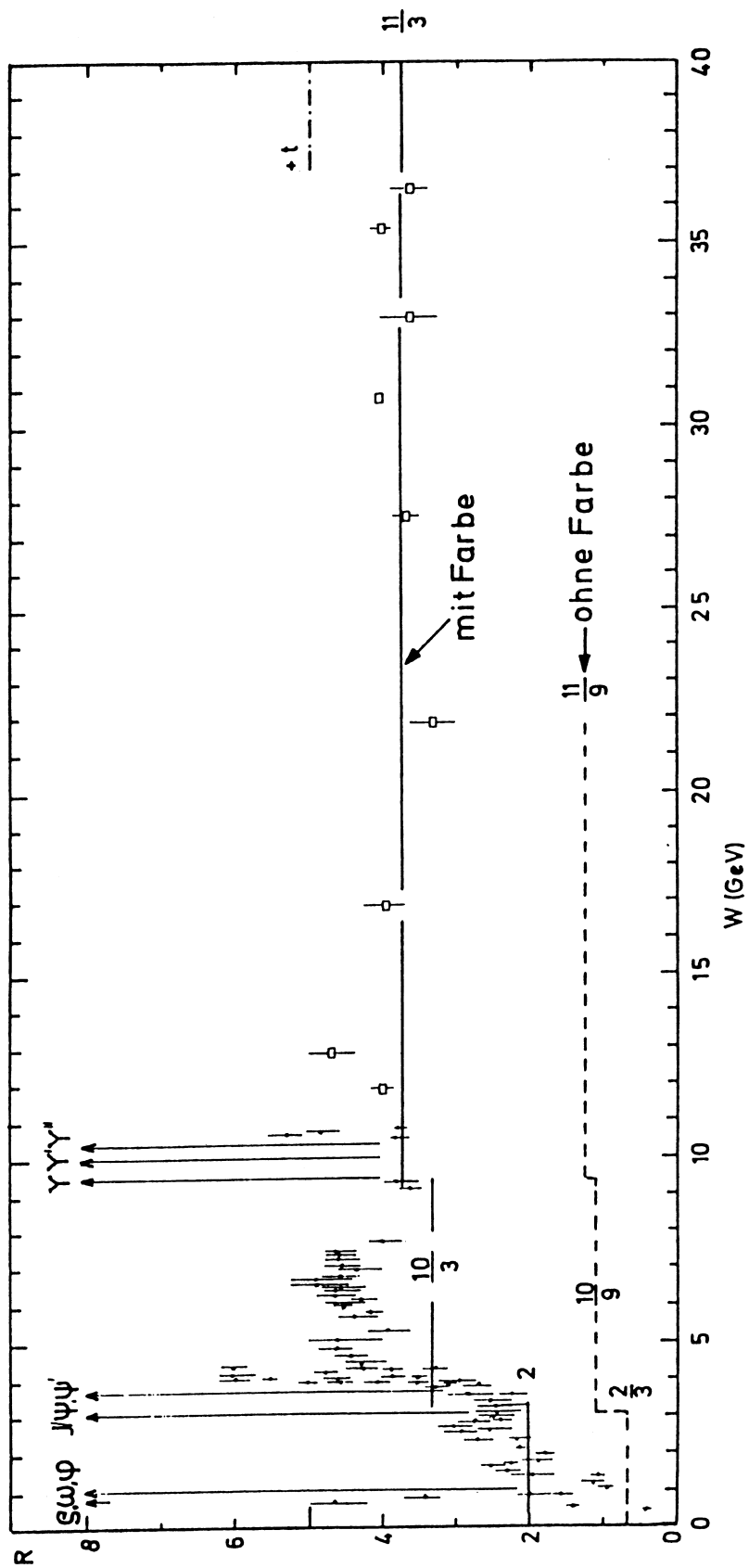
dabei ist N_C die Anzahl der Farbladungen.

$$R_{dsu}(E < 3 \text{ GeV}) = 3 \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 + 1 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^2 \right] = \frac{6}{3}$$

$$R_{dsuc}(E < 10 \text{ GeV}) = 3 \cdot \left[2 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^2 \right] = \frac{10}{3}$$

$$R_{dsbuc}(E < 360 \text{ GeV}) = 3 \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^2 \right] = \frac{11}{3}$$

$$R_{dsbuct}(E > 360 \text{ GeV}) = 3 \cdot \left[3 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^2 \right] = \frac{15}{3}$$



Zusammenfassung

Die Materie ist aus Leptonen und Quarks aufgebaut.

	Leptonen			
Generation	Name	Symbol	Masse [MeV]	elektr. Ladung
I	e-Neutrino	ν_e	$< 15 \cdot 10^{-6}$	0
	Elektron	e^-	0.511	-1
II	μ -Neutrino	ν_μ	< 0.17	0
	Müon	μ^-	105.7	-1
III	τ -Neutrino	ν_τ	< 24	0
	Tau	τ^-	1777	-1

	Quarks			
Generation	Name	Symbol	Masse [MeV]	elektr. Ladung
I	up	u	≈ 5	+2/3
	down	d	≈ 7	-1/3
II	charm	c	≈ 1500	+2/3
	strange	s	≈ 150	-1/3
III	top	t	≈ 180000	+2/3
	beauty	b	≈ 4500	-1/3

Um kleine Strukturen zu untersuchen benötigt man hohe Energien:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \hbar$$

Die Wechselwirkungen zwischen den Fermionen werden im Rahmen von Quantenfeldtheorien beschrieben. Die Vermittler der Kräfte sind Bosonen.

Wechselwirkung	Austauschteilchen	Spin	Masse [GeV]	Quelle	Reichweite [m]
Gravitation	Graviton	2	0	Masse	∞
Elektromagnetisch	Photon	1	0	elek. Ladung	∞
Schwach	$W^{\pm}, Z^0$	1	80-90	schwache Ladung	10^{-18}
Stark	8 Gluonen	1	0	Farbladung	$\leq 10^{-15}$

Diese Theorien brechen für

$$E_{Planck} = m_{Planck} = 10^{19} \text{ GeV}$$

oder Abständen und Zeiten von

$$l_{Planck} = 10^{-33} \text{ cm}, \quad t_{Planck} = \frac{l_{Planck}}{c} = 1 \cdot 10^{-43} \text{ s}$$

zusammen.