

Das Standardmodell der Elementarteilchen

HANSRUEDI VÖLKLE
Physikdepartement der Universität

Zusammenfassung

Bei der Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre sowie in Teilchenbeschleunigern entsteht eine Vielfalt von Elementarteilchen. Das «Standardmodell der Elementarteilchen», das hier präsentiert wird, erlaubt Ordnung in diesen «Teilchenzoo» zu bringen und die Systematik zu verstehen, die dahinter steckt. Dabei wird unterschieden zwischen den Elementarteilchen im eigentlichen Sinne als primäre Bausteine der Materie, den aus diesen zusammengesetzten Teilchen sowie den Teilchen, die für den Austausch der Kräfte verantwortlich sind. Am Schluss wird auch auf die Erhaltungsgrößen und die Symmetrien der Teilchenphysik eingegangen [PDG].

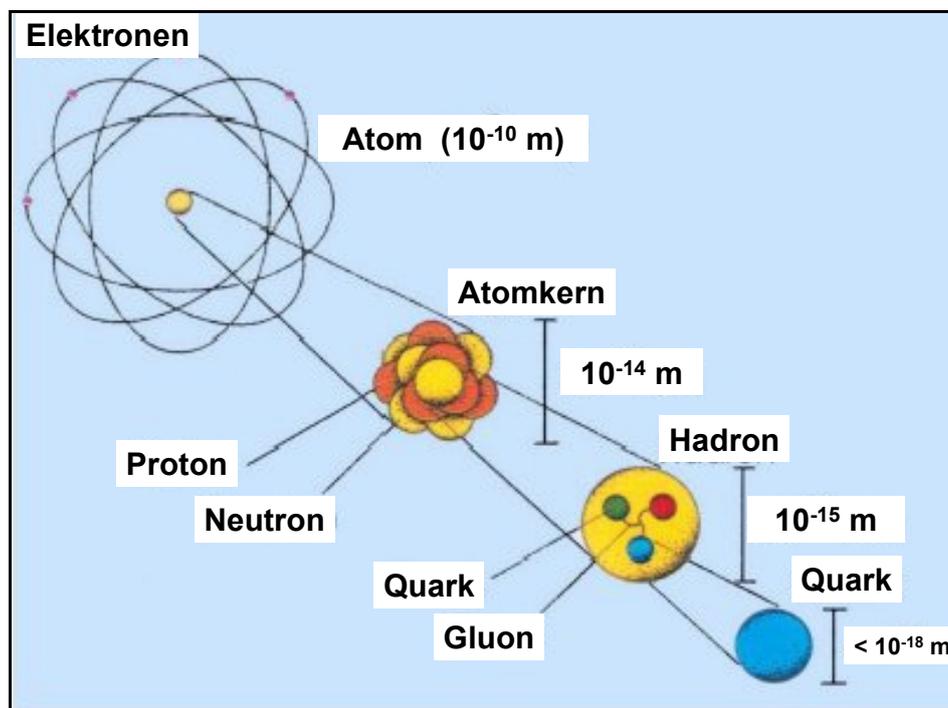


Abb. 1: Das Atom und seine Bestandteile

Quelle: <http://pauli.uni-muenster.de/tp/typo3temp/pics/71c464db7e.jpg>

1. Vom Makrokosmos in die Welt der Atome und Teilchen

Zwischen der uns bekannten Welt und derjenigen der Atome und Teilchen bestehen wesentliche Unterschiede; vieles ist anders als wir es gewohnt sind, beziehungsweise uns vorstellen können.

- 1) Grundsätzlich ist der atomare und subatomare Mikrokosmos eine **Blackbox**: Man kann zwar beobachten was hineingeht und was herauskommt; über das was drin passiert, weiss man a priori nichts. Man hilft sich also mit **Modellen** aus; diese können die Wirklichkeit aber nie exakt beschreiben, sind somit immer etwas falsch, dies gemäss dem oft zitierten Diktum: „*All models are wrong: But some are useful*“.
- 2) Teilchen sind **nicht unterscheidbar**. Man kann sie nur nachweisen, indem man sie in ein Experiment einbezieht, wodurch man sie in ihrem Verhalten beeinflusst. Es können nur Aussagen über ein Ensemble von Teilchen gemacht werden: Ihr Verhalten ist stochastisch. Man kann also nicht vorhersagen, wie sich ein **einzelnes** Teilchen verhält, sondern kann nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung angeben.
- 3) **Welle-Teilchen-Dualität**: Wellen können sich wie Teilchen und Teilchen wie Wellen verhalten. Je nach Experiment eignet sich das eine Bild besser als das andere, mit der bereits erwähnten Beschränktheit von physikalischen Modellen. Stellt man sich ein Teilchen als Wellenpaket vor, dann hat dieses eine gewisse räumliche Ausdehnung und hat alle Eigenschaften einer physikalischen Welle wie Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz. Das Quadrat der Wellenfunktion ergibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens an einem bestimmten Ort.
- 4) **Quantelung**: Gewisse physikalische Grössen der Elementarteilchen sind gequantelt, was heisst, dass deren Wert ein ganzzahliges Vielfaches einer Grundeinheit beträgt. Beispiele sind die Elementarladung $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Clb}$ (nach CHARLES AUGUSTIN DE COULOMB, 1736–1806), und der Spin \vec{s} als Vielfaches von $\frac{1}{2} \hbar$. Letzterer ist bildlich gesprochen eine Art Eigendrehimpuls des Teilchens und dieses hat damit auch ein magnetisches Moment $\vec{\mu}$.
- 5) **Spezielle Relativitätstheorie** von ALBERT EINSTEIN (1879-1955): Relativistische Effekte müssen berücksichtigt werden. Für die relativis-

tische Massenzunahme, für die Lorentzkontraktion (nach HENDRIK ANTOON LORENTZ 1853 – 1928) genannte Verkürzung der Länge und für die Zeitdehnung genannte Verlangsamung der Eigenzeit, gelten die nachfolgenden Gleichungen bei denen das Verhältnis von Teilchengeschwindigkeit v zur Lichtgeschwindigkeit c eingeht. Im Vakuum beträgt $c = 2.997'924'48 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$.

$$\mathbf{m}_{\text{rel}} = \frac{\mathbf{m}_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}; \quad \mathbf{x}_{\text{rel}} = \mathbf{x}_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}; \quad \mathbf{t}_{\text{rel}} = \frac{\mathbf{t}_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Man erkennt daraus, dass die Masse eines Teilchens, das sich mit extrem hoher Geschwindigkeit bewegt, gegen unendlich geht, dass seine Länge aus der Sicht des ruhenden Beobachters auf Null verkürzt wird und dass seine Eigenzeit wesentlich langsamer abläuft als die Uhr des ruhenden Beobachters. Ein massebehaftetes Teilchen kann somit nie c erreichen; die dazu benötigte Energie wäre unendlich gross und seine Masse würde unendlich werden.

6) **Masse-Energie-Äquivalenz:** Masse kann sich in Energie und Energie in Masse umwandeln gemäss der Gleichung $E = mc^2$ von ALBERT EINSTEIN. In einem abgeschlossenen System ist somit nicht die Summe aller Massen, sondern die Summe aller Energien, inklusive die Summe aller in Energie umgerechneten Massen, eine physikalische Erhaltungsgrösse. Die Massen von Teilchen werden meist in Energieäquivalent (MeV/c^2) umgerechnet angegeben, mit $1 \text{ MeV}/c^2 \approx 1.78 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; meist schreibt man vereinfacht **MeV**.

7) **Raum-Zeit:** Aus der speziellen Relativitätstheorie folgt weiter, dass es kein absolutes Bezugssystem gibt, sowohl beim Raum wie bei der Zeit.

Die Geschwindigkeit, mit der Signale übertragen werden – die Lichtgeschwindigkeit c – ist nicht mehr eine Grösse, die man als annähernd unendlich betrachten kann: Die Signalübertragung braucht Zeit.

8) **Unschärferelation:** Schliesslich gilt die Heisenberg'sche Unschärferelation (nach WERNER HEISENBERG 1901-1976). Sie sagt, dass nicht gleichzeitig Ort \vec{x} und Impuls \vec{p} beziehungsweise Energie E und Zeit t eines Teilchens oder Systems exakt bekannt sein können. Es gilt:

$$|\Delta\vec{p}| \cdot |\Delta\vec{x}| \geq \frac{\hbar}{2} \approx \hbar \quad \text{und:} \quad |\Delta E| \cdot |\Delta t| \geq \frac{\hbar}{2} \approx \hbar .$$

Dabei ist $\hbar = h/2\pi = 6.62517 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$ das Planck'sche Wirkungsquantum (nach MAX PLANCK 1858-1957). Die Energie eines Photons der Frequenz ν ist $E = h\nu$, mit $\lambda\nu = c$. Die de-Broglie-Wellenlänge (nach LOUIS-VICTOR PIERRE RAYMOND DE BROGLIE 1892-1987). eines Masseteilchens mit dem Impuls \mathbf{p} ist $\lambda = h/p$. Also gilt $mc^2 = E = h\nu = h c/\lambda = pc$, man erhält damit $\mathbf{p} = \mathbf{mc}$. Die relativistische Energie-Impuls-Beziehung lautet: $E = \sqrt{\mathbf{m}^2 c^4 + \mathbf{p}^2 c^2}$.

Eine Konsequenz von Pkt. 8) ist, dass gemäss der Quantenfeldtheorie das Vakuum nicht leer sondern ein dynamisches Medium ist, in dem ständig virtuelle Teilchen-Antiteilchen-Paare entstehen und sich wieder vernichten. Da dies sehr schnell geschieht, ist die hierfür notwendige Energie über die Heisenbergsche Unschärferelation abgedeckt.

2. Das Standardmodell der Elementarteilchen [PDG, Fr1, 2, Ge, Ve, Wik]

Die Physik der Elementarteilchen begann mit der Entdeckung des Elektrons (**e**) gegen Ende des 19. Jh., dem Anfangs des 20. Jh. jene von Proton (**p**) und Neutron (**n**) und von weiteren Teilchen folgte. Bis Mitte der 60er-Jahre war daraus ein unübersichtlich grosser «Teilchen-Zoo» entstanden, und spätestens jetzt wurde die **Physik der Elementarteilchen** eine eigene Disziplin, losgelöst von der Kernphysik. Die Teilchenphysik ist auch eng mit der Astrophysik verknüpft. Viele der Beobachtungen der Astrophysik können ohne die Kernphysik und die Physik der Elementarteilchen nicht verstanden werden.

Die Physiker suchten diese Teilchenvielfalt zu ordnen und die Systematik, die sie dahinter vermuteten, zu ergründen. Daraus entstand das *Standardmodell der Elementarteilchen*. Hierzu gab MURRAY GELL-MANN (* 1929) wesentliche Impulse, unter anderem mit seinem Buch «*The Eightfold Way*» von 1964 (einer erste Klassifikation der Hadronen), für dessen Titel er sich vom «*Achtfachen Pfad*» des Buddhismus inspirieren liess.

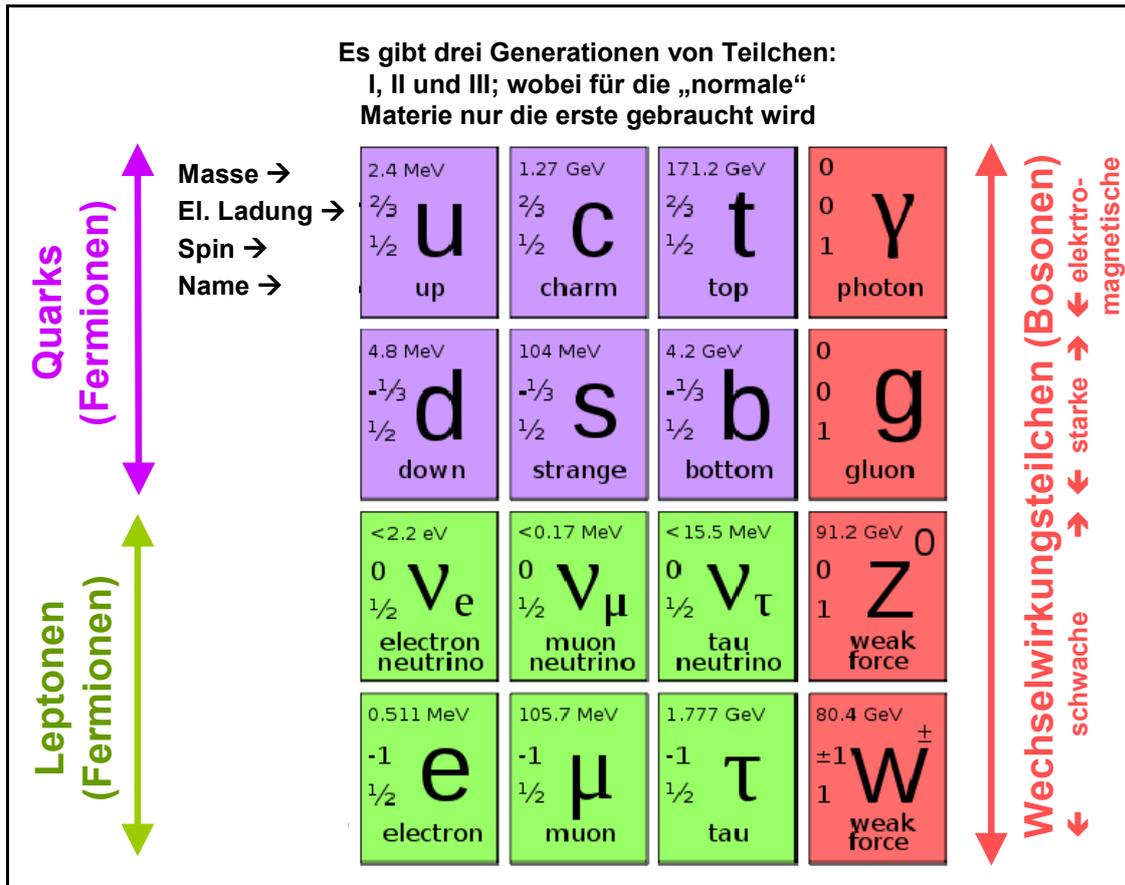


Abb. 2: Die System der Elementarteilchen gemäss dem Standardmodell

Quelle:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1c/Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg/220px-Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg.png

Abb. 2 zeigt die Bausteine der Materie gemäss dem Standardmodell, also die Elementarteilchen im engeren Sinne (Antiteilchen sind unterstrichen).

Quarks: Es gibt einerseits in den **blauen** Feldern 6 **Quarks** in 3 Paaren *Up-Down* (**u**, **d**), *Charmed-Strange* (**c**, **s**) und *Top-Bottom* (**t**, **b**) mit Ladungen von jeweils $+\frac{2}{3} e$ und $-\frac{1}{3} e$. Die Quarks sind Fermionen und haben Spin $\frac{1}{2}$. Sie können sich nur innerhalb eines Teilchens, etwa eines Protons, frei bewegen – genannt *asymptotische Freiheit* oder *Confinement* – können dieses aber nicht verlassen und können somit nicht frei existieren, ausser ganz kurze Zeit nach dem Big-Bang. Man kann sich ein Quark wie ein Hund an einer Leine vorstellen: Es kann sich nur soweit bewegen, wie die Leine lang ist, nämlich nur so weit wie der Protonenradius. Für die «gewöhnliche» Materie werden nur das Up- und das Down-Quark benötigt (sog. *unflavored Quarks*).

Leptonen: In den **grünen** Feldern sind die 6 Leptonen, zu denen das negativ geladene Elektron (e^-) und seine schwereren «Brüder» **Myon** (μ^-) und **Tau** (τ^-) gehören, mit gleicher Ladung wie das Elektron. Das Elektron hat vermutlich keine innere Struktur und kann als punktförmig angenommen werden (Radius $<10^{-19}$ m). Sein Ladungsradius beträgt $2.817 \cdot 10^{-15}$ m, seine Masse $9.109 \cdot 382 \cdot 91 \cdot 10^{-31}$ kg entsprechend $0.510 \cdot 998 \cdot \text{MeV}/c^2$. Im Gegensatz zum Elektron sind weder **Myon** ($105.658 \cdot 367 \text{ MeV}/c^2$) noch **Tau** ($1 \cdot 776.82 \text{ MeV}/c^2$) stabil. Ihre mittleren Lebensdauer beträgt $2.197 \mu\text{s}$ bzw. $2.9 \cdot 10^{-17}$ s. Sie können folgendermassen zerfallen: $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \underline{\nu}_e$, bzw. $\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \mu^- + \underline{\nu}_\mu$ oder auch $\tau^- \rightarrow \nu_\tau + e^- + \underline{\nu}_e$.

Hinzu kommen noch die drei **Neutrinos** ν_e , ν_μ , ν_τ . Sie haben keine elektrische Ladung und eine extrem kleine Masse (für das Elektronen-Neutrino < 0.2 eV, bestimmt aus der fehlenden Energie beim β -Zerfall des Tritium). Sie können demzufolge kaum mit andern Teilchen wechselwirken. So «sauen» die Sonnenneutrinos mit bis 10 MeV fast ungehindert durch die Erde hindurch. Sie haben noch eine weitere Eigenschaft: Sie können sich von einer Generation (Familie) in eine andere umwandeln (man nennt das oszillieren): $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$. Damit konnte die Diskrepanz bei den Sonnenneutrinos geklärt werden. Offen bleibt die Frage, ob das Neutrino mit seinem Antiteilchen identisch ist, also ein *Majorana-Teilchen* ist (ETTORE MAJORANA 1906-1938). Dies wäre im Widerspruch zum Standardmodell (Neutrinomasse $\cong 0$) und würde die Erhaltung der Leptonenzahl verletzen. Nachgewiesen werden könnte dies beim doppelten Beta-Zerfall, bei dem sich die beiden Neutrinos gegenseitig vernichten: $2p \rightarrow 2n + 2e^- + 2\underline{\nu} \Rightarrow (\text{falls } \nu \equiv \underline{\nu}) = 2n + 2e^-$.

Fermionen gehorchen dem von WOLFGANG PAULI (1900-1958) formulierten Ausschlussprinzip. Dieses legt fest, dass zwei Fermionen nicht gleichzeitig am selben Ort den gleichen Quantenzustand besetzen können. Für Elektronen in einem Atom bedeutet dies, dass nicht alle Elektronen in den gleichen Grundzustand fallen können, sondern paarweise, mit antiparallelem Spin, die verschiedenen Orbitale eines Atoms auffüllen. Analog ist es bei den Nukleonen im Kern. Daraus folgt, dass deren quantenmechanische Wellenfunktion nach einer Rotation um 180° das Vorzeichen ändert und erst nach einer weiteren Rotation wieder gleich wie der Ausgangszustand ist. Zu den Fermionen gehören die Quarks, die Leptonen und die Baryonen. Fermionen tragen den Namen des italienischen Physikers ENRICO FERMI (1901-1954).

Diese Regel gilt nicht für **Bosonen**: Diese haben ganzzahligen Spin. Bosonen tragen den Namen von SATYENDRANATH BOSE (1894 -1974). Zu den Bosonen gehören die Mesonen und die Austauschteilchen der Kräfte: das Photon (γ), die W^\pm - und Z^0 -Bosonen, die Gluonen (g) und das Graviton (G).

Teilchen – Antiteilchen: Elementarteilchen können als „normale“ und als Antiteilchen vorkommen. Das Positron e^+ beispielsweise ist das Antiteilchen des Elektrons e^- . Teilchen in der uns umgebenden Materie sind normale Teilchen, während Antimaterie aus Antiteilchen besteht. Die nicht-additiven Quantenzahlen wie Spin, Masse, Lebensdauer und magnetisches Moment sind bei Teilchen und Antiteilchen gleich, nicht hingegen die additiven wie Ladung, Baryonenzahl, Leptonenzahl. Sind alle additiven Quantenzahlen Null, so ist das Teilchen identisch mit seinem Antiteilchen, z.B. beim Photon, beim Z^0 oder beim Pion π^0 . Schreibweise für Antiteilchen: \bar{p} oder \underline{p} .

Annihilation und Paarerzeugung von Teilchen: Trifft ein Teilchen auf sein **Antiteilchen**, etwa e^+ auf ein e^- , so vernichten sie sich gegenseitig und die dabei freiwerdende Energie, bestehend aus Masse plus Bewegungsenergie, wird in zwei Photonen (γ) umgewandelt. Umgekehrt kann aus einem Gamma-Quant, wenn es genügend Energie hat, ein Teilchen-Antiteilchen-Paar entstehen. Die Paarbildung kann allerdings nur in der Nähe eines Kerns stattfinden. Nebst der Gesamtenergie muss auch der Gesamtimpuls erhalten bleiben. Der Kern übernimmt einen Teil des Photonen-Impulses. Dessen Masse ist jedoch wesentlich grösser, sodass er sich praktisch nicht bewegt. Bei der Annihilation werden aus demselben Grunde **zwei** Photonen erzeugt, die im bewegten System in einem Winkel von 180° gegeneinander wegfliegen.

Es gibt nur drei Teilchengenerationen: Dass es drei – und wie man heute weiss, genau drei – Familien oder Generationen von Quarks und Leptonen gibt, hat einige Physiker erstaunt. Für die «normale» Materie braucht es nämlich nur die erste Generation, also (u, d) und (e, ν_e) und man fragte sich mit Recht, wozu es noch zwei weitere Familien gibt. Als das Myon μ^\pm 1936 von CARL D. ANDERSON (1905-1991) entdeckt wurde, stellte ISIDOR ISAAC RABI (1898-1988) die berühmte Frage « *Who ordered that ? – Wer hat das bestellt ?* ». Teilchen, die nur u - und d -Quarks enthalten, also keine s -, c -, t - und b -Quarks, nennt man *unflavored Particles*.

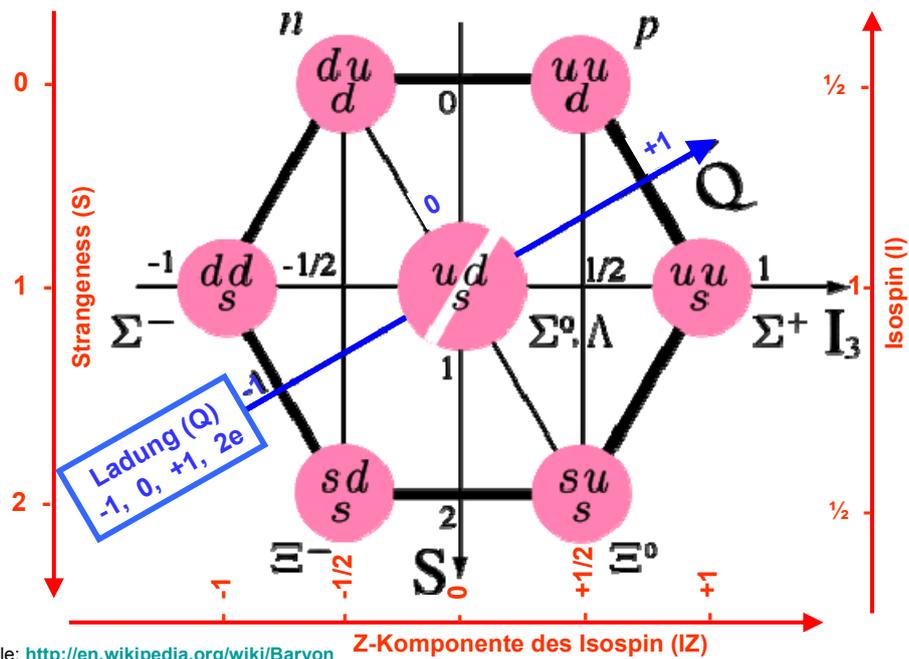


Abb.: 3: Das uds-Baryonen-Oktett (Spin = 1/2)

Quelle: <http://en.wikipedia.org/wiki/Baryon>

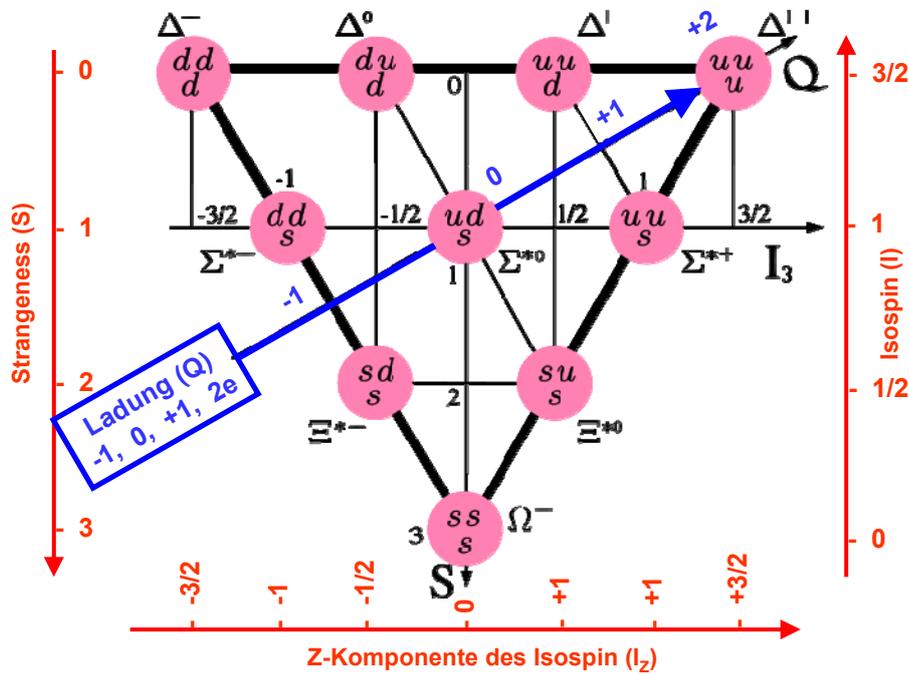


Abb.: 4: Das uds-Baryonen-Dekuplett (Spin = 3/2)

Quelle: <http://en.wikipedia.org/wiki/Baryon>

Tabelle 1: Eine kleine Auswahl von Baryonen: Oben mit Spin 1/2; Unten mit Spin 3/2

Name	Symbol	Quark	Masse [MeV/c ²]	Q [e]	Lebensdauer [s]	Zerfallsart
Nukleon Proton	N $\text{p (p}^+)$	uud	938.272'013	+1	∞ (stabil) oder $>10^{31}$ Jahre	nicht beobachtet ($e^+ + \pi^0$?)
Nukleon Neutron	N $\text{n (n}^0)$	udd	939.565'346	0	8.857×10^2	$p^+ + e^- + \nu_e$
Lambda	Λ^0	uds	1'115.683	0	2.631×10^{-10}	$p^+ + \pi^-$; oder: $n^0 + \pi^0$
Sigma	Σ^+	uus	1'189.37	+1	8.018×10^{-11}	$p^+ + \pi^0$; oder: $n^0 + \pi^+$
Sigma	Σ^0	uds	1'192.642	0	7.4×10^{-20}	$\Lambda^0 + \gamma$
Sigma	Σ^-	dds	1'197.449	-1	1.479×10^{-10}	$n^0 + \pi^-$
Xi	Ξ^0	uss	1'314.86	0	2.90×10^{-10}	$\Lambda^0 + \pi^0$
Xi	Ξ^-	dss	1'321.71	-1	1.639×10^{-10}	$\Lambda^0 + \pi^-$ od. $n^0 + \pi^-$

Name	Symbol	Quark	Masse [MeV/c ²]	Q [e]	Lebensdauer[s]	Zerfallsart
Delta	Δ^{++}	uuu	1'232	+2	5.58×10^{-24}	$p^+ + \pi^+$
Delta	Δ^+	uud	1'232	+1	5.58×10^{-24}	$\pi^+ + n^0$ oder $\pi^0 + p^+$
Delta	Δ^0	udd	1'232	0	5.58×10^{-24}	$\pi^0 + n^0$ oder $\pi^- + p^+$
Delta	Δ^-	ddd	1'232	-1	5.58×10^{-24}	$\pi^- + n^0$
Sigma	Σ^{*+}	uus	1'382.8	+1	1.84×10^{-23}	$\Lambda^0 + \pi^+$ oder $\Sigma^+ + \pi^0$ oder $\Sigma^0 + \pi^+$
Sigma	Σ^{*0}	uds	1'383.7	0	1.8×10^{-23}	$\Lambda^0 + \pi^0$ oder $\Sigma^+ + \pi^-$ oder $\Sigma^0 + \pi^0$
Sigma	Σ^{*-}	dds	1'387.2	-1	1.67×10^{-23}	$\Lambda^0 + \pi^-$ oder $\Sigma^0 + \pi^-$ oder $\Sigma^- + \pi^0$
Xi	Ξ^{*0}	uss	1'531.80	0	7.2×10^{-23}	$\Xi^0 + \pi^0$ oder $\Xi^- + \pi^+$
Xi	Ξ^{*-}	dss	1'535.0	-1	6.7×10^{-23}	$\Xi^0 + \pi^-$ oder $\Xi^- + \pi^0$
Omega	Ω^-	sss	1'672.45	-1	8.21×10^{-11}	$\Lambda^0 + K^-$ oder $\Xi^0 + \pi^-$ oder $\Xi^- + \pi^0$

Quelle: Bearbeitet und vereinfacht aus: http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Baryonen

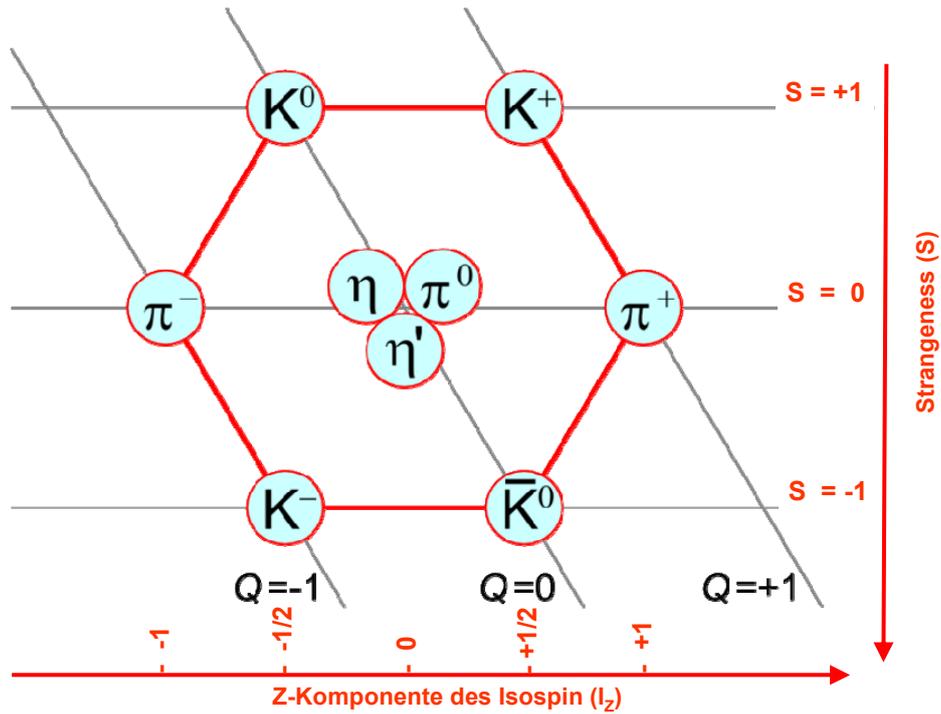


Abb.: 5: Das *uds*-Nonett der pseudoskalaren Mesonen (Spin = 0)

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Meson>

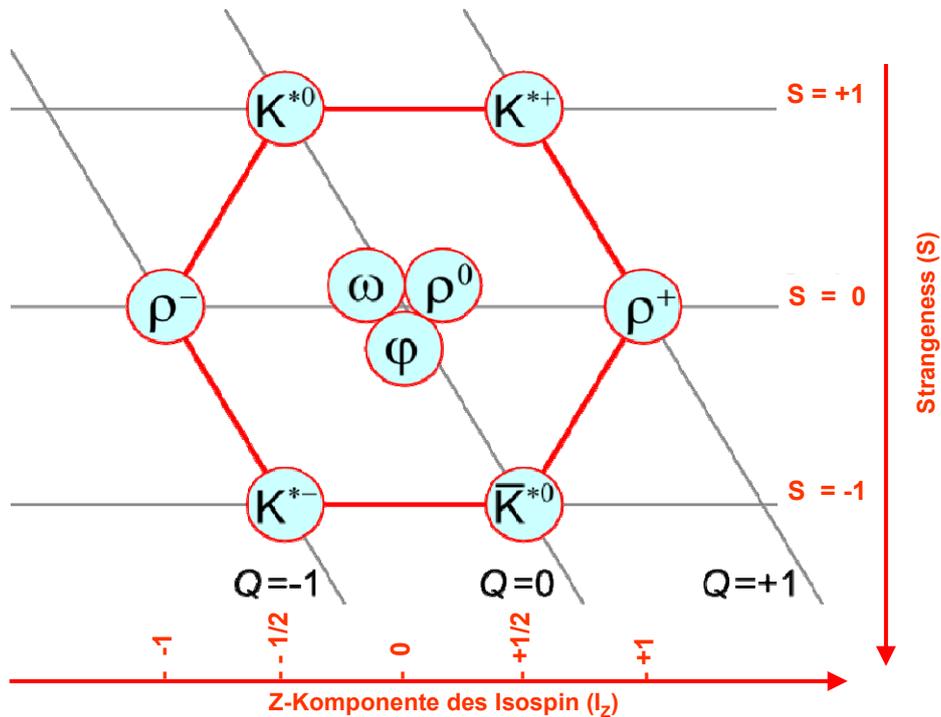


Abb.: 6: Das *uds*-Nonett der Vektor-Mesonen (Spin = 1)

Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Meson>

Tabelle 2: Eine kleine Auswahl von Mesonen mit u-, d- und s-Quarks

	Name	Symbol	Quark-Bild	Masse [MeV]	mittl. Lebensdauer [s]	Zerfallsart *)
Pseudoskalare Mesonen aus d-, u- und s-Quarks	Pion [±]	π^+, π^-	$\underline{u}\underline{d}, \underline{d}\underline{u}$	139.570	2.6033×10^{-8}	$\mu^+ + \nu_\mu$ ($\mu^- + \nu_\mu$)
	Pion ⁽⁰⁾	π^0 a)	$\frac{(\underline{u}\underline{u} - \underline{d}\underline{d})}{\sqrt{2}}$	134.977	8.4×10^{-17}	$\gamma + \gamma$
	Kaon [±]	K^+, K^-	$\underline{u}\underline{s}, \underline{s}\underline{u}$	493.677	1.238×10^{-8}	$\mu^+ + \nu_\mu$ ($\mu^- + \nu_\mu$) $\pi^+ + \pi^0$ oder $\pi^0 + e^+ + \nu_e$
	Kaon ⁽⁰⁾ (short)	K_S^0 a)	$\frac{(\underline{d}\underline{s} - \underline{s}\underline{d})}{\sqrt{2}}$	497.614	8.953×10^{-11}	$\pi^+ + \pi^-$ oder $\pi^0 + \pi^0$
	Kaon ⁽⁰⁾ (long)	K_L^0 a)	$\frac{(\underline{d}\underline{s} + \underline{s}\underline{d})}{\sqrt{2}}$	497.614	5.116×10^{-8}	$\pi^+ + e^- + \nu_e$ oder $\pi^+ + \mu^- + \nu_\mu$ $\pi^- + e^+ + \nu_e$ oder $\pi^- + \mu^+ + \nu_\mu$ $\pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ oder $\pi^+ + \pi^0 + \pi^-$
	η -Meson ⁽⁰⁾	η a)	$\frac{(\underline{u}\underline{u} + \underline{d}\underline{d} - 2\underline{s}\underline{s})}{\sqrt{6}}$	547.853	5.0×10^{-19}	$\gamma + \gamma$; oder $\pi^0 + \pi^0 + \pi^0$ oder $\pi^+ + \pi^0 + \pi^-$
	η' -Meson ⁽⁰⁾	η' a)	$\frac{(\underline{u}\underline{u} + \underline{d}\underline{d} + \underline{s}\underline{s})}{\sqrt{3}}$	957.78	3.39×10^{-21}	$\pi^+ + \pi^- + \eta$ oder $(\rho^0 + \gamma) / (\pi^+ + \pi^- + \gamma)$ oder $\pi^0 + \pi^0 + \eta$
Vektor-Mesonen aus d-, u- und s-Quarks	ρ -Meson [±]	ρ^+, ρ^-	$\underline{u}\underline{d}, \underline{d}\underline{u}$	770.11	$\approx 4.5 \times 10^{-24}$	$\pi^+ + \pi^0$ ($\pi^- + \pi^0$)
	ρ -Meson ⁽⁰⁾	ρ^0 a)	$\frac{(\underline{u}\underline{u} - \underline{d}\underline{d})}{\sqrt{2}}$	775.49	$\approx 4.5 \times 10^{-24}$	$\pi^+ + \pi^-$
	Kaon [±]	K^{*+}, K^{*-}	$\underline{u}\underline{s}, \underline{s}\underline{u}$	891.7	$\approx 7.35 \times 10^{-20}$	sehr viele verschiedene Zerfallsmöglichkeiten
	Kaon ⁽⁰⁾	$K^{*0}, \underline{K}^{*0}$	$\underline{d}\underline{s}, \underline{s}\underline{d}$	896.0	7.346×10^{-20}	
	ω -Meson ⁽⁰⁾	ω a)	$\frac{(\underline{u}\underline{u} + \underline{d}\underline{d})}{\sqrt{2}}$	782.65	7.75×10^{-23}	$\pi^+ + \pi^0 + \pi^-$ oder $\pi^0 + \gamma$
ϕ -Meson ⁽⁰⁾	ϕ a)	$\underline{s}\underline{s}$	1'019.445	$1.55 \cdot 10^{-22}$	$K^+ + K^-$ oder $K_S^0 + K_L^0$ oder $(\rho + \pi) / (\pi^+ + \pi^0 + \pi^-)$	
einige weitere Mesonen mit c- und b-Quarks	D-Meson [±]	D^+, D^-	$\underline{c}\underline{d}, \underline{d}\underline{c}$	1'869.60	1.040×10^{-12}	sehr viele verschiedene Zerfallsmöglichkeiten
	D-Meson ⁽⁰⁾	D^0, \underline{D}^0	$\underline{c}\underline{u}, \underline{u}\underline{c}$	1'864.83	4.101×10^{-13}	
	D _s -Meson [±]	D_s^+, D_s^-	$\underline{c}\underline{s}, \underline{s}\underline{c}$	1'968.47	5.00×10^{-13}	
	J/ψ-Meson ⁽⁰⁾	J/ψ a)	$\underline{c}\underline{c}$	3'096.916	8×10^{-19}	
	B-Meson [±]	B^+, B^-	$\underline{u}\underline{b}, \underline{b}\underline{u}$	5'279.15	1.638×10^{-12}	
	B-Meson ⁽⁰⁾	B^0, \underline{B}^0	$\underline{b}\underline{d}, \underline{d}\underline{b}$	5'279.50	1.530×10^{-12}	
	Y-Meson ⁽⁰⁾	Y a)	$\underline{b}\underline{b}$	9'460.30	1.22×10^{-20}	

a) Teilchen ist identisch mit seinem Antiteilchen; ⁽⁰⁾ Teilchen hat keine Ladung

*) gilt bei zwei Teilchen nur für das erste; Beispiele in Klammern

z.T. Teilchen und Antiteilchen im selben Feld: z.B. π^+ und π^- ; Antiteilchen unterstrichen;

Quelle: bearbeitet und vereinfacht aus: <http://en.wikipedia.org/wiki/Meson>

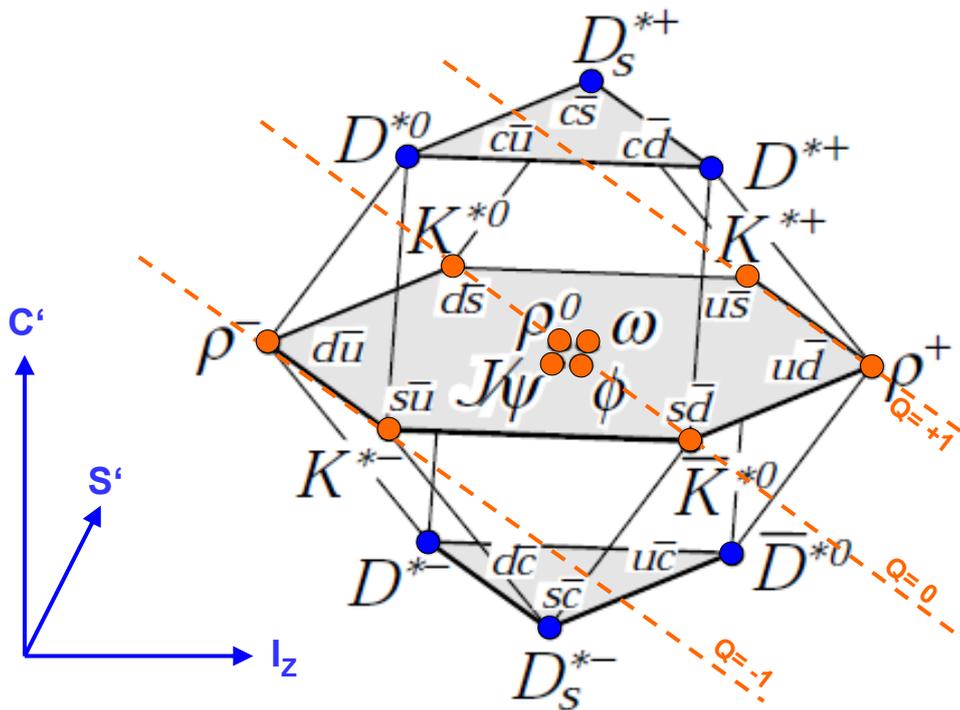
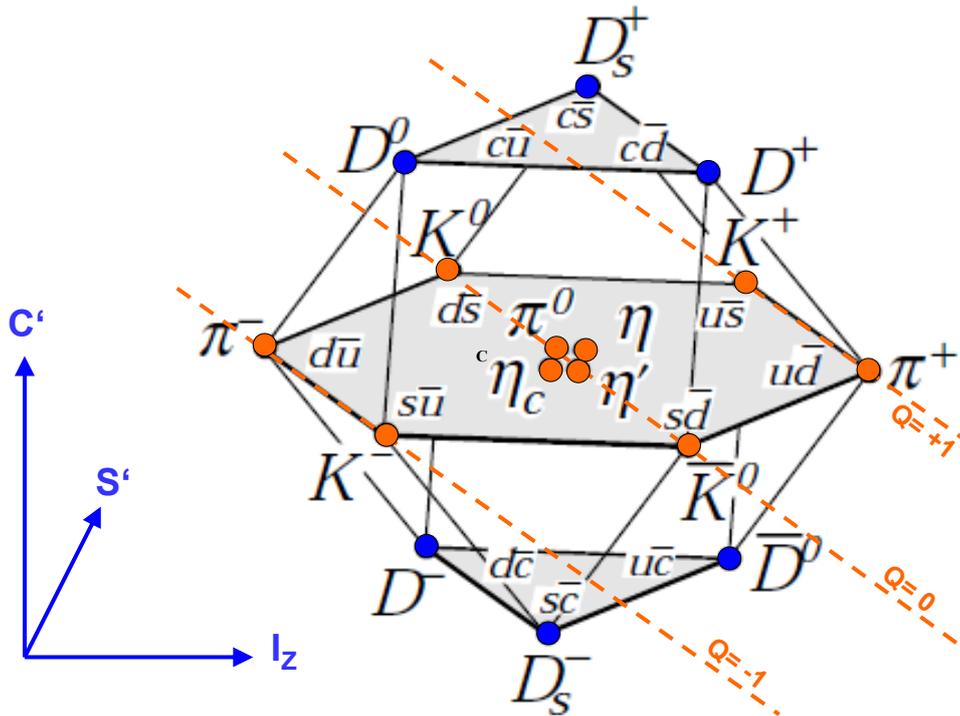


Abb. 7: Übersicht: Klassierung von Elementarteilchen nach Quantenzahlen [PDG]

Tab. 3: Liste der Mesonen und Baryonen gemäss [PDG] (Stand 2010; ohne t-Quarks)
 Zahlen in Klammern: gerundete Werte der Massen [MeV/c²]; Quantenzahlen s. Tab. 6

Light unflavored Mesons (S' = C' = B' = T' = 0)
$\pi^\pm, \pi^0, \eta, f_0(600), \rho(770), \omega(782), \eta'(958), f_0(980), a_0(980), \phi(1020), h_1(1170),$ $b_1(1235), a_1(1260), f_2(1270), f_1(1285), \eta(1295), \pi(1300), a_2(1320), f_0(1370), \pi_1(1400),$ $\eta(1405), f_2(1420), \omega(1420), a_0(1450), \rho(1450), \eta(1475), f_0(1500), f_2'(1525),$ $\pi_1(1600), \eta_2(1645), \omega(1650), \omega_3(1670), \pi_2(1670), \phi(1680), \rho_3(1690), \rho(1700),$ $f_0(1710), \pi(1800), \phi_3(1850), \pi_2(1880), f_2(1950), f_2(2010), a_4(2040), f_4(2050), \phi(2170),$ $f_2(2300), f_2(2340)$
Strange Mesons (S' = ± 1, B' = 0)
$K^\pm, K^0, K_s^0, K_L^0, K^*(892), K_1(1270), K_1(1400), K^*(1410), K^*_0(1430), K^*_2(1430),$ $K^*(1680), K_2(1770), K^*_3(1780), K_2(1820), K^*_4(2045)$
Charmed Mesons (C' = ± 1)
$D^\pm, D^0, D^*(2007)^0, D^*(2010)^\pm, D^*_0(2400)^0, D_1(2420)^0, D^*_2(2460)^0, D^*_2(2460)^\pm$
Charmed, Strange Mesons (C' = S' = ± 1)
$D^*_s, D^*_s^\pm, D^*_{s0}(2317)^\pm, D_{s1}(2460)^\pm, D_{s1}(2536)^\pm, D^*_{s2}(2573)$
Bottom Mesons (B' = ± 1)
$B^\pm, B^0, B^\pm/B^0$ Admixture, $B^\pm/B^0/B^0_s/b$ -Baryon Admixture, $B^*, B_1(5721)^0, B^*_2(5747)^0$
Bottom, Strange Mesons (B' = ± 1, S' = $-\pm 1$)
$B^0_s, B^*_s, B_{s1}(5830)^0, B^*_{s2}(5840)^0$
Bottom, Charmed Mesons (B' = C' = ± 1)
B^\pm_c
cc-Mesons
$\eta_c(1S), J/\psi(1S), \chi_{c0}(1P), \chi_{c1}(1P), h_c(1P), \chi_{c2}(1P), \eta_c(2S), \psi(2S), \psi(3770),$ $\chi(3872), \psi(4040), \psi(4160), \chi(4260), \psi(4415)$
bb-Mesons
$T(1S), \chi_{b0}(1P), \chi_{b1}(1P), \chi_{b2}(1P), T(2S), \chi_{b0}(2P), \chi_{b1}(2P), \chi_{b2}(2P), T(3S), T(4S),$ $T(10860), T(11020),$
N Baryons (S' = 0, I = $\frac{1}{2}$)
$p, n, N(1440)P_{11}, N(1520)D_{13}, N(1535)S_{11}$
Δ Baryons (S' = 0, I = $\frac{3}{2}$)
$\Delta(1232)P_{33}, \Delta(1600)P_{33}, \Delta(1620)S_{31}$
Λ Baryons (S' = -1, I = 0)
$\Lambda, \Lambda(1405)S_{01}, \Lambda(1520)D_{03}$
Σ Baryons (S' = -1, I = 1)
$\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Sigma(1385)P_{13}, \Sigma(1660)P_{11}$
Ξ Baryons (S' = -2, I = $\frac{1}{2}$)
$\Xi^0, \Xi^-, \Xi(1530)$
Ω Baryons (S' = -3, I = 0)
$\Omega^-, \Omega(2250)^-$
Charmed Baryons (C' = 1)
$\Lambda^+_c, \Lambda_c(2595)^+, \Lambda_c(2625)^+, \Lambda_c(2880)^+, \Lambda_c(2940)^+, \Sigma_c(2455), \Sigma_c(2520), \Sigma_c(2800),$ $\Xi^+_c, \Xi^0_c, \Xi^{'+}_c, \Xi^{'0}_c, \Xi_c(2645), \Xi_c(2790), \Xi_c(2815), \Xi_c(2980), \Xi_c(3080), \Omega^0_c,$ $\Omega_c(2770)^0$
Bottom Baryons (B' = -1)
$\Lambda^0_b, \Sigma_b, \Sigma^*_b, \Xi^0_b, \Xi^-_b, \Omega^-_b, b$ -Baryon Admixture ($\Lambda_b, \Xi_b, \Sigma_b, \Omega_b$)

Die **Wechselwirkungsteilchen** (rote Felder) sind für den **Austausch der Kräfte** verantwortlich und haben als Bosonen ganzzahligen Spin:

- 1) Für die elektromagnetische Kraft: das **Photon** (γ) mit Ruhemasse Null;
- 2) Für die starke Wechselwirkung – die Kernkraft im Innern von Nukleonen – acht **Gluonen** (**g**);
- 3) Für die schwache Wechselwirkung – verantwortlich für den Beta-Zerfall – die geladenen, virtuellen und massetragenden **W[±]-Bosonen** und das neutrale **Z⁰-Boson** (Massen 80'399 bzw. 91'187.6 MeV/c²);
- 4) Analog müsste es dann für die Gravitation das **Graviton** (**G**) geben mit Spin 2; dieses wurde jedoch bisher noch nicht gefunden.

Hadronen: Diese sind aus Quarks zusammengesetzt sind und bestehen aus zwei Untergruppen: Baryonen und Mesonen. **Baryonen** sind Teilchen aus drei Quarks, Antibaryonen solche aus drei Antiquarks. So besteht etwa das Proton aus den Quarks **u+u+d**; und damit dessen Ladung $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1e$; entsprechend gilt für das Neutron: **u+d+d** und die Ladung $\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0e$. Die Baryonen werden noch unterteilt in Nukleonen (**n, p**), Hyperonen (mit **s**-Quark) und weitere Teilchengruppen. **Mesonen** bestehen aus einem Quark und einem Antiquark. Das π^+ beispielsweise besteht aus **u+d**, das π^- aus **u+d**, während das neutrale π^0 eine Mischung aus **uu+dd** ist. Damit haben Baryonen Spin $\frac{1}{2} \hbar$ oder $\frac{3}{2} \hbar$, und sind Fermionen, während Mesonen einen solchen von $0 \hbar$ oder $1 \hbar$ haben und folglich Bosonen sind. Den Quarks wird als neue physikalische Grösse eine **Farbe** zugeordnet: **rot, grün** oder **blau**, entsprechend den Antiquarks: **antirod, antigrün** und **antiblau**. Dies, damit sich, beispielsweise beim Ω -Baryon (**sss**), die einzelnen Quarks voneinander unterscheiden, um dem Pauli-Prinzip zu genügen. Zusammengesetzte Teilchen sind farbneutral: Sie müssen somit bei Baryonen alle drei Farben enthalten, bei den Mesonen eine Farbe und deren Antifarbe. Gemäss [PDG] sind bis heute etwa 120 Mesonen und etwa 40 Baryonen bekannt (Tab. 3). Wie diese Teilchen mittels der Gruppentheorie anhand ihrer Quantenzahlen klassiert werden können, zeigen die Abb. 3 – 4 und 7 – 8.

Der Radius des **Protons** beträgt nach den neuesten Messungen mittels myonischer Atome 0.84184 fm oder rund $8.4 \cdot 10^{-16}$ m (s. [Mu] in diesem Heft) und ist damit etwas kleiner als der bisher angenommen Wert von 0.87 fm. Seine Masse beträgt $1.672'621'637 \cdot 10^{-27}$ kg oder $938.272'013$ MeV/c². Das **Neutron** ist geringfügig schwerer mit $1.674'927'351 \cdot 10^{-27}$ kg oder

939.565'346 MeV/c². Die mittlere Lebensdauer des ungebundenen Neutrons beträgt 885.7 Sekunden.

3. Die vier Grundkräfte der Natur → [PDG, Fr1, Fr2, Ge, Ve, Wik]

In der Natur gibt es **vier Kräfte**: *Gravitationskraft*, *elektromagnetische Kraft*, *schwache* und *starke* Kraft. Jede dieser Kräfte wirkt auf bestimmte Eigenschaften der Materie, nämlich auf die *Masse*, bzw. die *elektrische Ladung*, die *schwache* Ladung oder die *Farbladung* der Teilchen. Zu jeder Kraft gibt es eines oder mehrere Wechselwirkungsteilchen (**Bosonen**) sowie eine **Kopplungskonstante** (α , α_s , α_w , α_G), die für deren Stärke verantwortlich ist. Die Gravitation und die elektromagnetische Kraft wirken bis unendlich; ihre Stärke nimmt mit $1/r^2$ ab, dies weil bei diesen Kräften die Austauscheteilchen, das Photon und das hypothetische Graviton, keine Masse tragen. Die Gravitation ist nur anziehend; die elektromagnetische Kraft kann anziehend und abstossend sein. Elektrische Ladungen kompensieren sich gegenseitig: Ein Atom mit gleich vielen positiven wie negativen Ladungen erscheint aus einer gewissen Distanz als elektrisch neutral, weshalb in diesem Fall keine Coulomb-Kraft mehr wirkt.

Tabelle 4: Die vier Grundkräfte der Natur und deren wichtigste Eigenschaften

Kraft (Wechselwirkung)	wirkt auf	Teilchen	Austausch- teilchen (Bosonen)	relative Stärke	Kopplungs- konstante	Reichweite der Kraft
Gravitation	Masse	alle ; auch Photonen, haben eine dynamische Masse	Graviton (?) (s = 2?)	$\approx 10^{-39}$	α_G	$\rightarrow \infty$: $\sim 1/r^2$
Schwache Kraft	schwache Ladung	Leptonen und Quarks	W^+ , W^- und Z^0 -Boson (Masse $\neq 0!$)	$\approx 10^{-6} \dots -7$	α_w (weak)	$\approx 10^{-18}$ m ≈ 0.001 fm
Elektromagnetische	elektrische Ladung	geladene Teilchen	Photon	1/137	α (*)	$\rightarrow \infty$: $\sim 1/r^2$ (anziehend und abstossend !)
Starke Kernkraft	Farbladung	Quarks im Hadron	Gluonen	≈ 1	α_s (strong)	$\approx 10^{-15}$ m ≈ 1 fm
		wirkt zwischen Nukleonen auf sehr kurze Distanzen (≤ 1 fm), analog zur Van-der-Waals-Kraft	Pion			

(*) $\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) = 1 / 137.036$ ist die Feinstrukturkonstante der Atomphysik
Für die rel. Stärke der schwachen Kraft findet man, je nach Experiment, höhere Werte

Die **starke** und die **schwache** Kraft haben dagegen eine extrem kurze **Reichweite** von etwa 1 fm (10^{-15} m) bzw. 1/1000 eines fm (10^{-18} m). Hierfür wurde das Yukawa-Potenzial vorgeschlagen (YUKAWA HIDEKI 1907-1981), bei dem der $1/r$ -Term durch eine Exponentialfunktion mit $-m_B r$ im Exponenten ergänzt wird. Ist die Masse des Austauschteilchens $m_B=0$, wird die Exponentialfunktion = 1, und man erhält wieder das Coulomb-Potenzial. Da die Austauschteilchen W^\pm und Z^0 bei der schwachen Kraft sowie das Pion (π^\pm) bei der starken Kraft zwischen Nukleonen im Kern eine Masse tragen, haben diese Kräfte eine kurze Reichweite. Wie ist es nun aber innerhalb eines Hadrons, zwischen den Quarks, da hier die Gluonen als Austauschteilchen masselos sind? Da diese aber nur auf farbetragende Teilchen wirken, welche ausserhalb eines Hadrons nicht vorkommen können, existiert diese Wechselwirkung auch nur innerhalb von Hadronen. Nukleonen wie Protonen und Neutronen im Kern «spüren» auf sehr kurze Distanzen – analog zur VAN-DEER-WAALS-Kraft bei elektrisch neutralen Atomen – eine Restkraft der starken Wechselwirkung, die durch den Austausch eines π^\pm übertragen wird.

Kernkraft: Innerhalb des Atomkerns dominiert die starke Kernkraft, durch den Austausch von Gluonen („*Glue*“ heisst Klebstoff auf Englisch) zwischen Quarks bzw. Pionen (π^\pm) zwischen den Nukleonen im Kern. Dabei spüren Protonen und Neutronen allerdings nur die anziehende starke Kernkraft der unmittelbaren Nachbarn. Die positiv geladenen Protonen spüren zusätzlich auch die abstossende, aber schwächere, Coulomb-Kraft aller andern Protonen im Kern. Deshalb ist das Proton etwas schwächer im Kern gebunden als das Neutron und sein Energieniveau im Potentialtopf ist daher etwas höher.

Die **Gravitation** als vierte Kraft spielt auf dem atomaren Niveau keine Rolle. In der Astrophysik, wo die Massen und Distanzen sehr gross sind, dominiert sie hingegen.

Die Stärke der vier Kräfte im Vergleich: Normiert man die starke Kraft auf 1, dann ist die elektromagnetische 137-mal, die schwache Kraft über eine Million mal und die Gravitation gar um 40 Grössenordnungen schwächer.

Vereinheitlichung der vier Kräfte: Die Physiker möchten alle vier Kräfte in eine einheitliche Theorie einbeziehen: die **GUT** (*Grand Unified Theory*) für die Vereinheitlichung der elektro-schwachen mit der starken Kraft, sowie die **TOE** (*Theory of Everything*), wenn die Gravitation auch noch einbezogen wird. Dies würde bedeuten, dass die Kopplungskonstanten nicht konstant

sind, sondern sich für sehr hohe Energien ($> 10^{25}$ eV) oder extrem kurze Distanzen ($< 10^{-31}$ m) einem gemeinsamen Wert annähern.

Die elektroschwache Kraft: Bisher ist eine solche Vereinheitlichung allerdings erst für die *elektromagnetische* und die *schwache* Wechselwirkung in der so genannten elektro-schwachen Kraft gelungen: 1967 durch SHELDON GLASHOW (* 1932), ABDUS SALAM (1926-1996) und STEVEN WEINBERG (* 1933). Diese Theorie wurde 1973 experimentell durch die Entdeckung der neutralen Ströme (Z^0) bestätigt.

4. Prozesse mit Elementarteilchen und deren Darstellung als Feynman-Diagramme

Prozesse mit Elementarteilchen lassen sich mit den so genannten **Feynman-Diagrammen** bildhaft darstellen (s. Abb. 9–18). Sie sind nach dem amerikanischen Physiker RICHARD FEYNMAN (1918–1988) benannt.

Tabelle 5: Prozesse mit Elementarteilchen

Prozesse		elektro-magnetische	schwache		starke
			geladene	neutrale	
Austauschteilchen (Boson)		Photon (γ)	W^+, W^-	Z^0	Gluon (g) Pion (π) *)
wirkt auf:	Nukleonen	nur Protonen	---		ja (< 1 fm)
	nur Leptonen	nur e^- , μ^- und τ^-	leptonische		---
	Leptonen und Quarks	---	semi-leptonische		
	nur Quarks		hadronische		ja

*) Im Nukleon durch Austausch von Gluonen (g); zwischen Nukleonen (z.B. n und p) auf kurze Distanzen (≤ 1 fm) durch den Austausch von Pionen (π^\pm)

Vier verschiedene Prozesse: Je nachdem, welche Kräfte und Austauschteilchen beteiligt sind, nennt man diese *elektromagnetische*, *schwache* (geladene mit W^\pm -Teilchen und neutrale mit Z^0 -Teilchen) oder *starke* Prozesse (s. Tabelle 5). Dabei sind auch Mischformen möglich.

Bei **elektromagnetischen Prozessen** kann Energie in Form eines **Photons** aus einem Kern emittiert werden ebenso bei der Annihilation eines Teilchen-Antiteilchen-Paares, oder aus dem Photon kann ein Teilchen-Antiteilchen-Paar entstehen.

Bei **schwachen Prozessen** wird ein Quark-Antiquark- oder ein Lepton-Antilepton-Paar in ein virtuelles und geladenes **W⁺-** oder **W⁻-Boson** umgewandelt (geladene Ströme), und diese erzeugen wiederum ein anderes Quark-Antiquark-Paar (etwa 67.6%) oder ein Lepton-Antilepton-Paar (etwa 23.6%). Beim Austausch von **Z⁰-Bosonen** redet man von neutralen Strömen. Diese Bosonen trägt keine Ladung weg. Möglich ist beispielsweise (**e⁺,e⁻**) oder (**u, u**) \rightarrow **Z⁰** \rightarrow (**u, u**), (**μ^+ , μ^-**) oder (**e⁻, e⁺**).

Bei **starken Prozessen** werden **Gluonen** ausgetauscht. Diese tragen eine Farbe weg und bringen eine andere Farbe hinzu. Ein Gluon **g_{rb}** bringt beispielsweise die Farbe rot und trägt die Farbe blau weg. Gluonen können ein Quark-Antiquark-Paar absorbieren oder erzeugen; diese müssen allerdings von **derselben** Teilchenfamilie sein. Da Gluonen keine Ladung haben, muss es sich jeweils um das Antiteilchen desselben Quarks handeln, speziell bei folgendem Beispiel: (**u, u**) \rightarrow **g** \rightarrow (**d, d**).

Regeln der Feynman-Diagramme: Diese Diagramme ermöglichen auch die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, mit der der betreffende Prozess stattfinden kann. Die Zeitachse läuft dabei von links nach rechts. Linien stehen für Teilchen, unterbrochene Linien (---) für **W[±]-** und **Z-Bosonen**, Wellenlinien für Photonen und Linien mit Kringeln für Gluonen (**g**). Pfeile in Richtung der Zeitachse bezeichnen Teilchen; Pfeile in umgekehrter Richtung stehen für Antiteilchen. Wird ein Pfeil um 180° gedreht, wandelt sich das betreffende Teilchen in sein Antiteilchen um oder umgekehrt. Teilchen, welche in das Diagramm hineinlaufen oder heraustreten sind reelle Teilchen; solche zwischen zwei Wechselwirkungspunkten (*Vertex* bzw. *Vertices* in der Mehrzahl) sind virtuelle, nicht observable Teilchen. Sie entstehen und verschwinden gleich wieder, wie etwa die **W⁺, W⁻** oder **Z⁰-Bosonen**. Viele der Prozesse von Elementarteilchen können auf verschiedene Arten ablaufen, es gibt somit für bestimmte Anfangs- und Endzustände oft mehrere mögliche Feynman-Diagramme. Je komplizierter jedoch ein Diagramm ist, also je mehr Wechselwirkungspunkte es hat, umso kleiner ist seine Wahrscheinlichkeit. Die gesamte Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus der Summe aller möglichen Prozesse.

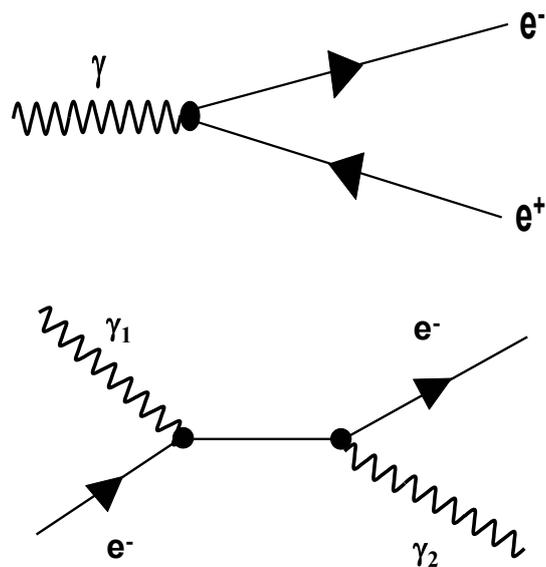


Abb. 9: Elektromagnetische Prozesse: e^+e^- -Paarerzeugung, Compton-Effekt ($\gamma_1 \neq \gamma_2$)

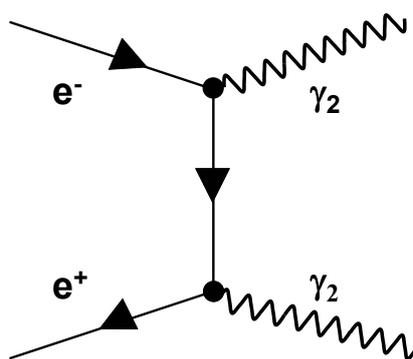


Abb. 10: Elektromagnetische Prozesse: e^+e^- -Annihilation ($\gamma_1 = \gamma_2$)

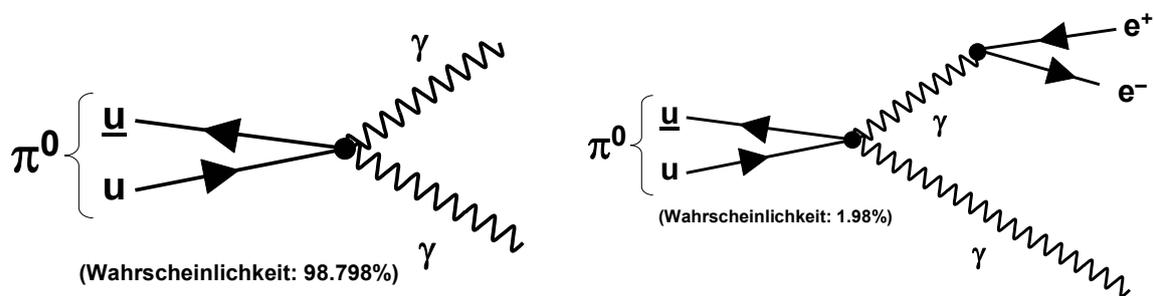


Abb. 11: Elektromagnetische Prozesse: Zwei mögliche Zerfallsarten des π^0

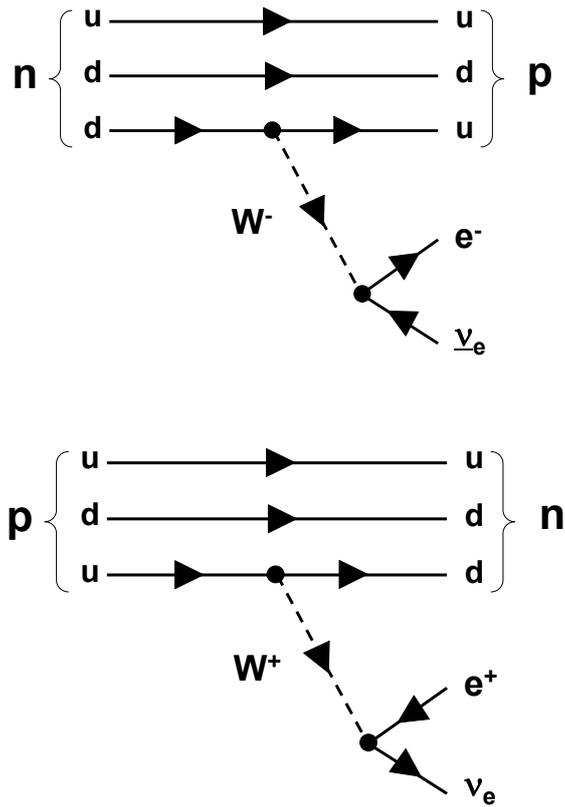


Abb. 12: Schwache, geladene Prozesse: β^\pm -Zerfälle des Neutrons und des Protons n, p

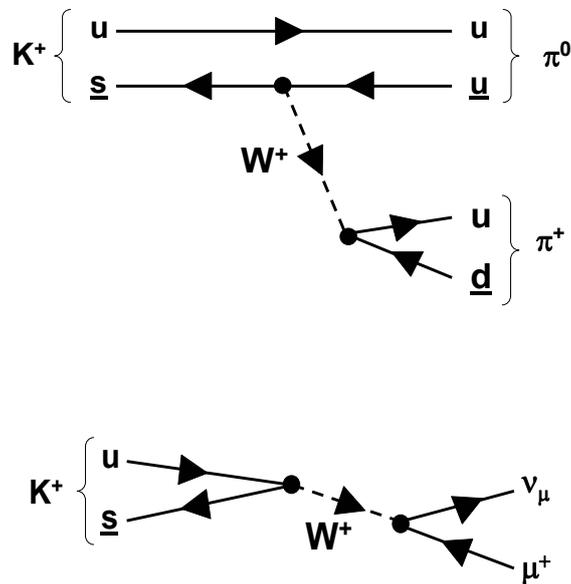


Abb. 13: Schwache, geladene Prozesse: Zerfälle von K-Mesonen

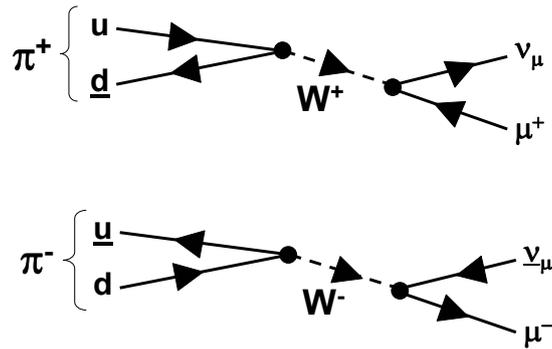


Abb. 14: Schwache, geladene Prozesse: Zerfälle der geladenen Pionen π^+

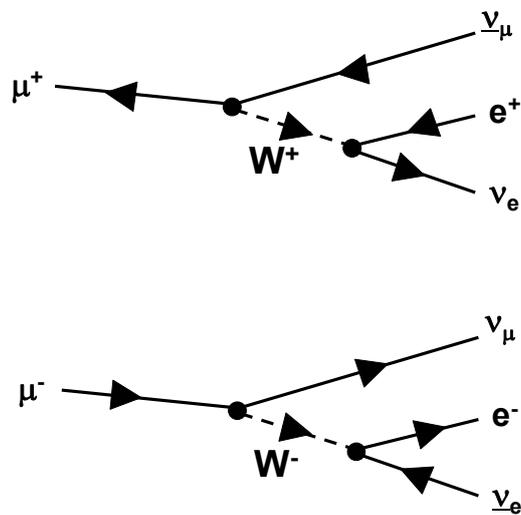


Abb. 15: Schwache, geladene Prozesse: Zerfälle der Myonen μ^+ und μ^- (entsprechend zerfällt das τ^- über ein W^- in ein ν_τ plus e^- und ν_{e^-})

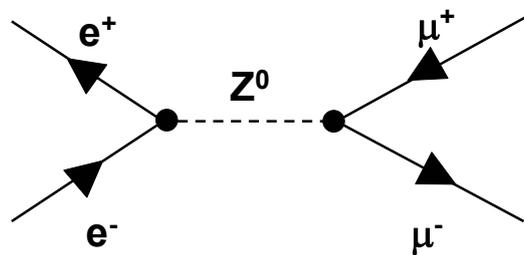


Abb. 16: Schwacher, neutraler Prozess: $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

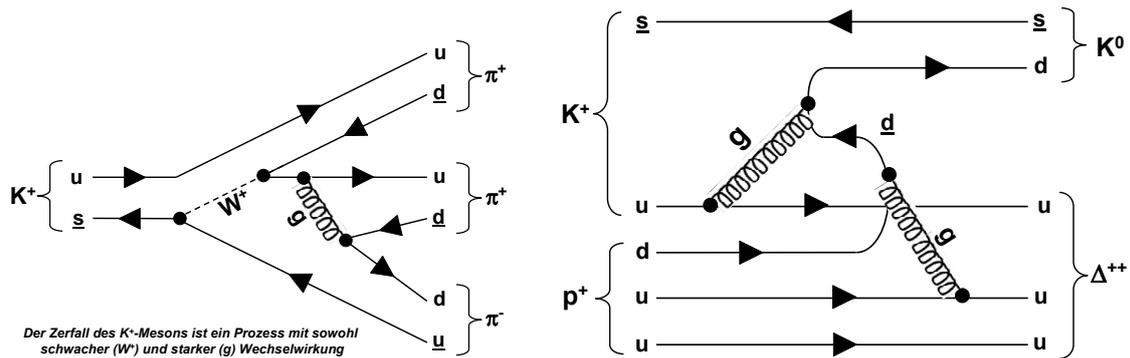


Abb. 17: gemischter Prozesse (K^+ -Zerfall) und starker Prozess: $K^+ + p^+ \rightarrow K^0 + \Delta^{++}$

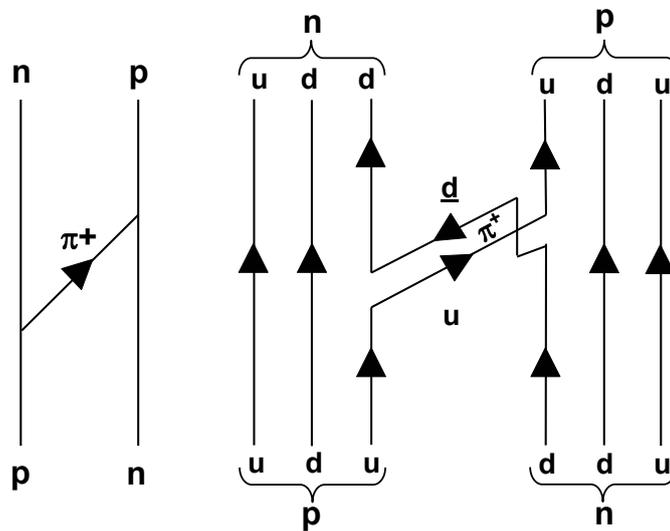


Abb. 18: Feynman-Diagramm zur Veranschaulichung der starken Kraft zwischen zwei Nukleonen durch den Austausch eines Pions (π^+).

Beispiele: Abb. 9 bis 17 zeigen am Beispiel von Feynman-Diagrammen die Zerfälle von einigen durch die kosmische Strahlung oder in Teilchenbeschleunigern erzeugten Teilchen, wie etwa der Zerfall des Neutrons, des Pions (π^\pm), des Myons (μ^\pm) oder des K-Mesons (\mathbf{K}); Abb. 18 zeigt den π^\pm -Austausch zwischen zwei Nukleonen zur Veranschaulichung der starken Kraft.

Die CKM-Matrix: Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass die bei schwachen Prozessen erzeugten oder absorbierten Lepton-Antilepton-Paare immer von der derselben Familie sind, also (e^-, ν_e) oder (μ^-, ν_μ) oder allenfalls (τ^-, ν_τ) , beziehungsweise deren Antiteilchen wie (e^+, ν_e) . Für die Quark-Antiquark-Paare muss dies nicht der Fall sein. Die Wahrscheinlichkeit, dass sie nicht von der selben Familie (\mathbf{u}, \mathbf{d}), (\mathbf{c}, \mathbf{s}) und (\mathbf{t}, \mathbf{b}) sind, ist jedoch deutlich geringer als wenn beide aus derselben Familie stammen. Dass sich ein \mathbf{d} -Quark in ein \mathbf{u} -Quark umwandelt ist wahrscheinlicher, als dass sich ein \mathbf{s} -Quark in ein \mathbf{u} -Quark umwandelt. Mit noch geringer Wahrscheinlichkeit wandelt sich ein \mathbf{b} -Quark in ein \mathbf{u} -Quark um. Die dazugehörige Theorie ist in der **CKM-Matrix** der Physiker NICOLA CABIBBO (1935-2010), MAKOTO KOBAYASHI (* 1944) und TOSHIHIDE MASUKAWA (* 1940) enthalten. Die Masse des ersten Teilchens muss bei diesen Prozessen immer grösser sein als diejenige des zweiten, also: $m_d > m_u$ bzw. $m_s > m_u$. Bei der Umwandlung eines \mathbf{d} in ein \mathbf{u} wird $-1/3e$ eingebracht und $+2/3e$ weggetragen: Das W^- -Teilchen muss somit -1 Elementarladung übernehmen und gibt diese nachher an das erzeugte Elektron (e^-) weiter; umgekehrtes gilt für das W^+ .

5. Erhaltungsgrössen und Symmetrien in der Physik

Quantenzahlen: Bei allen Reaktionen von Elementarteilchen bleiben – allerdings mit einigen Ausnahmen – eine ganze Reihe von physikalischen Grössen erhalten (s. Tabelle 6), so etwa die Gesamtenergie E , der Impuls \vec{p} , die elektrische Ladung Q , der Gesamtspin \vec{J} , die Baryonenzahl B , die Leptonenzahlen L_e , L_μ und L_τ , und einige weitere mehr exotische Grössen wie Isospin \vec{I} und dessen Z-Komponente I_Z , und noch weitere Quantenzahlen (s. Tab. 6).

Der **Isospin** hat mit einem reellen Spin nichts zu tun. Man geht davon aus, dass gewissen Teilchen ein Duplett oder eine Triplette desselben Teilchen sind. Proton und Neutron (\mathbf{p}, \mathbf{n}) wäre beispielsweise ein Nukleonen-Duplett mit dem Isospin $I = 1/2$, und die Z-Komponente kann zwei Richtungen einnehmen: $I_Z = +1/2$ für das \mathbf{p} und $I_Z = -1/2$ für das \mathbf{n} . Entsprechend wären die drei Pionen π^+ , π^- und π^0 ein Triplette mit $I = 1$ und I_Z kann dann drei Richtungen einnehmen: $I_Z = -1$ für das π^- , $I_Z = 0$ für das π^0 und $I_Z = +1$ für das π^+ .

Quark-Quantenzahlen: Weitere Quantenzahlen berücksichtigen, ob ein Teilchen ein \mathbf{s} -Quark ($-S'$ oder $-\tilde{S}$), ein \mathbf{c} -Quark (C' oder \tilde{C}), ein \mathbf{t} -Quark

(\mathbf{T}' oder $\tilde{\mathbf{T}}$) oder ein \mathbf{b} -Quark ($-\mathbf{B}'$ oder $-\tilde{\mathbf{B}}$) enthält. Die Minuszeichen bei den \mathbf{s} - und den \mathbf{b} -Quarks wurden einzig aus Symmetriegründen gewählt.

Stabilität von Proton und Elektron und Neutrino-Oszillationen: Von der grossen Anzahl der bis heute bekannten Elementarteilchen sind lediglich das Elektron und das Proton stabil. Sollte das letztere instabil sein, müsste seine Halbwertszeit extrem lang sein: $T_{1/2p} > 10^{-32}$ Jahre, also wesentlich länger als das Alter des Universums von 13.75 Milliarden Jahren. Alle andern Teilchen, insbesondere das freie und in gewissen Fällen auch das in einem Kern gebundene Neutron zerfallen; letzteres mit 14.76 min. Neutrinos können sich zudem von einer Familie in eine andere umwandeln: $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$. Folge davon ist, dass die Neutrinos Masse haben (\Rightarrow Erweiterung des Standardmodells!). Die Wahrscheinlichkeit solcher Oszillationen wird seit 1962 durch die **PMNS-Matrix** beschrieben, benannt nach BRUNO PONTECORVO (1913-1993), ZIRO MAKI, MASAMI NAKAGAWA und SHOICHI SAKATA. Auch die von der Sonne kommenden ν_e -Neutrinos oszillieren beim Durchqueren der Erde. Damit konnte endlich das Rätsel der Sonnenneutrinos gelöst werden.

Symmetrieerhaltungen in der Teilchenphysik: Die Frage, ob bei physikalischen Experimenten die Raumsymmetrie nebst andern Symmetrien erhalten bleibt, ist für Physiker fundamental. Bei den Symmetrie-Operationen werden bei der Paritätsoperation \mathbf{P} die Ortsvektoren umgedreht, bei der Zeitumkehr \mathbf{T} lässt man die Zeit rückwärts ablaufen und bei der so genannten Ladungskonjugation \mathbf{C} werden die Teilchen durch ihre Antiteilchen ersetzt und das Vorzeichen der elektrischen Ladungen umgedreht. \mathbf{P} bedeutet somit, dass aus dem Vektor (x, y, z, t) der Vektor $(-x, -y, -z, t)$ wird; bei \mathbf{T} wird aus dem Vektor (x, y, z, t) der Vektor $(x, y, z, -t)$ (s. Tab. 6). Im dreidimensionalen Raum entspricht \mathbf{P} einer Spiegelung an einer Fläche, die senkrecht zur y -Achse steht und zusätzlich einer Drehung des Koordinatensystems um 180° um die y -Achse. Werden bei einem Experiment alle drei Operationen zusammen durchgeführt, also \mathbf{C} , \mathbf{P} und \mathbf{T} , kurz \mathbf{CPT} , dann gelten gemäss dem von WOLFGANG PAULI 1955 formulierten \mathbf{CPT} -Theorem alle Gesetze der Physik weiterhin. Dies konnte im Rahmen der erreichten Genauigkeit bis heute auch experimentell bestätigt werden.

Thermodynamik nicht \mathbf{T} -invariant: Bei thermodynamischen Prozessen und mechanischen Experimenten mit Reibung kann die Zeit nicht umgedreht werden, sie sind somit nicht invariant gegenüber der Operation \mathbf{T} . So kann beispielsweise das Auflösen eines Stückes Zucker in einer Tasse Kaffee nicht

rückwärts ablaufen. In einem geschlossenen System kann, ohne äussere Zufuhr von Energie, die «Entropie» als Mass für die Unordnung nur zunehmen: Der Zucker muss sich auflösen.

Der **Beta-Zerfall** ist **nicht P -invariant**: Dass hier die Parität P verletzt ist, hat Frau CHIEN-SHIUNG WU 1956 experimentell nachgewiesen, nachdem schon zuvor TSUNG-DAO LEE und CHEN NING YANG diese Verletzung theoretisch vorausgesagt haben. Das kann man folgendermassen verstehen: Aus Gründen der Impulserhaltung müssen die beim β -Zerfall emittierten Teilchen e^- und \underline{v}_e in entgegengesetzter Richtung wegfliegen. Deren \vec{p} -Vektoren sind also antiparallel, die \vec{s} -Vektoren hingegen parallel, da der Kernspin um eine Einheit abimmt. Die Helizität H_T – das Skalarprodukt von \vec{p} und \vec{s} dividiert durch deren Längen – ist bei massetragenden (linkshändigen, hier das e^-) Teilchen -1 , bei (rechtshändigen, hier das \underline{v}_e) Antiteilchen $+1$. Somit zeigt bei den ersteren der Spin nach hinten, also entgegen der Flugrichtung und ist damit antiparallel zu \vec{p} . Bei Antiteilchen sind die beiden Vektoren \vec{p} und \vec{s} parallel. Der Operator P dreht die Impulse \vec{p}_e und \vec{p}_v als polare Vektoren um; diese sind somit nicht P -invariant. Der Spinvektor \vec{s} ist als Axialvektor wie ein Vektorprodukt dagegen P -invariant und wird durch P nicht gedreht. Der Operator P würde somit einen Zustand schaffen, der physikalisch nicht möglich ist: \vec{p} und \vec{s} würden beim Elektron in die gleiche Richtung zeigen (positive Helizität), beim \underline{v}_e wären sie antiparallel (negative Helizität). Beim β -Zerfall ist aus ähnlichen Gründen auch C verletzt, jedoch nicht die Kombination der beiden, also PC . H_T ist PC -invariant, nicht jedoch invariant für P oder C allein, da P den Vektor \vec{p} umdreht und C das Vorzeichen der Ladung ändert und Teilchen zu Antiteilchen und umgekehrt macht.

Verletzung der PC -Symmetrie: Eine Verletzung von PC wurde – allerdings nur in geringem Ausmass ($\approx 10^{-3}$) – auch schon gefunden, nämlich beim Zerfall der K-Mesonen und neulich auch beim Zerfall der B-Mesonen.

Symmetriebruch beim Urknall: Einen ersten Symmetriebruch gab es bereits eine Millionstel Sekunde nach dem Urknall, als sich bei einer grossen «Vernichtungssorgie» alle bis dahin gebildeten praktisch gleichviele Teilchen wie Antiteilchen gegenseitig vernichtetet und in Energie umwandelten und nur ein winziger Rest von etwa 10^{-10} der gesamten Masse blieb übrig. Dieser winzige «Rest» ist die Materie, aus der unser heutiges Universum besteht.

Tabelle 6: Erhaltungsgrößen der Elementarteilchen

Grösse	Symbol	Definition [Dimension]	Form ^{*)}
Energie	E	Gesamtenergie inklusive Massen [MeV]	S
Impuls	\vec{p}	Gesamtimpuls der beteiligten Teilchen [kg·m/s]	PV
elektrische Ladung	Q	Summe der Ladungen aller beteiligten Teilchen [C/b]: z.B.: e^- : +1; e^+ : -1; p : +1; n : 0, ...	S
Drehimpuls (Spin)	\vec{J} (\vec{s})	Gesamtspin aller beteiligten Teilchen [h]	AV
Baryonenzahl	B	Für: Baryonen: 1, Antibaryonen: -1; Quark: $1/3$; Antiquarks: $-1/3$; Mesonen & Leptonen: 0	S
Leptonenzahlen	L_e, L_μ und L_τ	Anzahl der Leptonen je Familie: L_e, L_μ, L_τ Lepton: +1; Antilepton: -1	S
Isospin	I	(u, d), (p, n): $I = 1/2$; (π^+, π^0, π^-): $I = 1$, etc.; für Leptonen und c -, s -, t -, b -Quarks: $I = 0$	PV
Z-Komponente des Isospin	I_Z	(u, d), (p, n) sind Doupletts mit $I_Z = (+1/2, -1/2)$ (π^+, π^0, π^-) sind Tripletts mit $I_Z = (1, 0, -1)$	S
Hyperladung	Y	$Y = 2(Q - I_Z) = (B + S' + C' + B')$	S
Schwacher Isospin	T	(ν_e, e^-), (ν_μ, μ^-), (ν_τ, τ^-), (u, d), (s, c), (t, b) sind Doupletts mit $T = 1/2$	PV
Z-Komponente des schwachen Isospin	T_Z	(ν_e, e^-), (ν_μ, μ^-), (ν_τ, τ^-), (u, d), (s, c), (t, b) sind Doupletts mit $T_Z = (+1/2, -1/2)$	S
schwache Hyperladg.	Y_W	$Y_W = 2(Q - T_Z)$	S
Strangeness	S' (-)	- Anzahl der s -Quarks (auch \tilde{S})	S
Charm-Zahl	C' (+)	+ Anzahl der c -Quarks (auch \tilde{C})	S
Bottom-Zahl	B' (-)	- Anzahl der b -Quarks (auch \tilde{B})	S
Top-Zahl	T' (+)	+ Anzahl der t -Quarks (auch \tilde{T})	S
Farbladung	-	Farbladungen der Quarks	S
Parität	P	(x, y, z, t) \rightarrow (-x, -y, -z, t)	m
Ladungskonjugation	C	Teilchen \rightarrow Antiteilchen und Ladung wechselt Vorzeichen: z.B.: $e^- \rightarrow e^+$	
Zeitumkehr	T	(x, y, z, t) \rightarrow (x, y, z, -t)	
CP	$C \cdot P$	Parität + Ladungskonjugation	
CPT	$C \cdot P \cdot T$	Parität + Zeitumkehr + Ladungskonjugation	

****) S = Skalar; AV = axialer Vektor; PV = Polarer Vektor; m = unitärer, multiplikativer Operator; Die Helizität als Skalarprodukt ist weder P- noch C-invariant, ist jedoch PC-invariant.***

Wirkungsquerschnitt und Zerfallskonstante: Bei einer Reaktion der Form $\mathbf{a+b} \rightarrow \mathbf{c+d}$ wird die Wahrscheinlichkeit, dass diese stattfindet, durch den Wirkungsquerschnitt σ [in barn = 10^{-24} cm²] gegeben. Dieser ist von den beteiligten Teilchen \mathbf{a} und \mathbf{b} und von der Energie abhängig, mit der sie aufeinander treffen. Ein Zerfall der Form $\mathbf{a} \rightarrow \mathbf{b+c}$ wird durch das Zerfallsgesetz bestimmt. Dieses legt fest, dass die Anzahl der Zerfälle des Teilchens \mathbf{a} pro Sekunde proportional zur Anzahl der \mathbf{a} -Teilchen ist. Es gilt somit die Differentialgleichung:

$$\frac{dN_a}{dt} = -\lambda N_a \text{ mit folgender Lösung: } N_a(t) = N_a(t=0) \cdot e^{-\lambda_a t}$$

λ_a [s⁻¹] ist die Zerfallskonstante, also die Wahrscheinlichkeit des Zerfalls pro Sekunde für das Teilchen \mathbf{a} . Die mittlere Lebensdauer des Teilchens \mathbf{a} beträgt $1/\lambda_a = \tau$. Für die Halbwertszeit, die Zeit bis die Hälfte der Teilchen \mathbf{a} zerfallen sind, erhält man aus obiger Gleichung: $T_{1/2} = \ln(2) / \lambda_a$.

6. Ausblick

Grenzen des Standardmodells: Das Standardmodell ist zwar eines der schönsten und perfektsten Modelle der Physik. Es lässt aber noch einige Fragen offen. Einerseits hat es noch zu viele freie Parameter und andererseits kann es nicht erklären, wie die Teilchen – auch das Neutrino – zu einer Masse kommen. Insbesondere sagt das Standardmodell nichts aus über die nicht sichtbaren 96 Prozent des Universums. Summiert man etwa die Massen der Quarks, die das Proton bilden ($\mathbf{u+u+d}$), so erhält man nur 9.6 MeV/c²; viel weniger als die wahre Masse des Protons von 938.272 MeV/c². Wahrscheinlich spielen bei der Masse der Hadronen auch die virtuellen Quark-Anti-Quark-Paare eine Rolle, die – als Folge der Unschärferelation – dauernd in den Nukleonen entstehen und wieder verschwinden.

Higgs-Feld und Higgs-Boson: Mögliche Kandidaten für die Masse der Hadronen sind das Higgs-Feld (vorgeschlagen durch dem schottischen Physiker PETER HIGGS (*1929), zusammen mit FRANCOIS ENGLERT, ROBERT BROUT, CARL R. HAGEN und GERALD GURALNIK), sowie die dadurch postulierten Higgs-Bosonen für den Austausch dieses Feldes. Gemäss dem *Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM)* vermutet man mehrere Higgs-Bosonen (davon zwei geladene: $\mathbf{H_1^0}$, $\mathbf{A^0}$, $\mathbf{H^+}$ und $\mathbf{H^-}$) mit Massen zwischen 114 und 145 MeV/c². Man hofft, diese demnächst am CERN mit dem

LARGE HADRON COLLIDER (LHC) nachweisen zu können, wo man Teilchen mit bis 7 TeV (10^{12} eV) aufeinanderschiesst und damit auch die Eigenschaften dieser Higgs-Teilchen ermitteln könnte. Damit würden einige offene Fragen geklärt, unter anderen wie die Teilchen (auch die W^\pm - und Z^0 -Bosonen) zu einer Masse kommen, und eventuell auch die Rolle der dunklen Materie im Universum und der WIMP's (weakly interacting massive particles). Gemäss einer Pressemitteilung des CERN vom 13. Dezember 2011 ist man der Entdeckung der Higgs-Bosonen etwas näher gekommen und kann den Massenbereich auf 124 bis 126 MeV/c² einschränken, da man in diesem Energiebereich einen leichten Überschuss an Ereignissen beobachtet hat, und dies bei zwei Experimenten, dem ATLAS und dem CMS. Man hofft, das Rätsel um das Higgs-Boson im Verlauf von 2012 zu klären.

Für die **Veranschaulichung des Higgs-Feldes** wird häufig das folgende Analogiebeispiel zitiert: Ein bekannter Politiker kommt auf eine Parteitagung. Sofort bildet sich um ihn eine Traube von Menschen. Nun will er zum Rednerpult. Dabei behindert ihn diese Menschentraube, die er nun „mitschleppen“ muss. Sie erhöht somit bildhaft gesprochen seine träge Masse. In analoger Weise erzeugt das Higgs-Feld die träge Masse von Teilchen und das Higgs-Boson überträgt diese Wechselwirkung.

Minimal Supersymmetric Standardmodel (MSSM): Eine weitere offene Frage ist ob das Standardmodell erweitert werden soll, indem alle Teilchen (auch die Higgs-Teilchen) noch einen *supersymmetrischen Partner* erhalten. Alle Fermionen mit Spin $\frac{1}{2}$ hätten dann supersymmetrische Partner mit Spin 1 und entsprechend alle Bosonen mit Spin 1 supersymmetrische Partner mit Spin $\frac{1}{2}$. Dem Namen würde im ersten Fall ein „S...“ vorangestellt und im zweiten ein Fall ein „...ino“ angehängt. Also: Quark \rightarrow Squark, Lepton \rightarrow Slepton, up \rightarrow Sup, down \rightarrow Sdown, Elektron \rightarrow Seletron, etc. bzw. Photon \rightarrow Photino, Gluon \rightarrow Gluino, $W \rightarrow$ Wino, $Z \rightarrow$ Zino. Dabei wird dem Symbol für das Teilchen ein „~“ aufgesetzt: $\tilde{e}, \tilde{u}, \tilde{d}, \tilde{\gamma}, \tilde{g}, \tilde{W}^\pm$, etc. Das MSSM konnte allerdings noch nicht experimentell bestätigt werden.

Universelle Kopplungskonstante: Im *Minimal Supersymmetric Standard Model* wird postuliert, dass sich die Kopplungskonstanten der drei (eventuelle gar aller vier) Grundkräfte α , α_s , α_w und α_G (der Index S steht für *strong*: stark, W für *weak*: schwach und G für *Gravitation*) für sehr hohe Energien ($> 10^{25}$ eV) bzw. bei extrem kurzen Distanzen ($< 10^{-31}$ m), wie es kurze Zeit nach dem Big-Bang der Fall war, sich einem gemeinsamen Wert

annähern. Die drei Kräfte vereinigen sich dann in der *Grand Unified Theory* (**GUT**) zu einer einheitlichen Kraft. Der nächste – und wahrscheinlich letzte Schritt – wäre dann, unter Einbezug der Gravitation, die *Theorie of Everything* (**TOE**). Ob dies aber die Lösung ist, bleibt gegenwärtig noch offen, ebenso ob das Proton stabil ist oder mit einer extrem langen Halbwertszeit von über 10^{32} Jahren zerfällt.

In der **String-Theorie** sind die fundamentalen Bausteine der Natur, im Gegensatz zum Standardmodell der Teilchenphysik, keine - vermutlich punktförmige - Objekte mehr, sondern werden als schwingende, eindimensionale Fäden oder Saiten (*Strings*) betrachtet und die einzelnen Teilchen werden dann als unterschiedliche Schwingungsanregungen (oder Energiezustände) desselben Strings angesehen. Auch das Graviton hätte hier seinen Platz, ebenso supersymmetrische Teilchen oder WIMPS. Strings können offen oder geschlossen sein und verlangen zusätzliche Dimensionen, die allerdings extrem klein sind, im Bereich der Planck-Länge (10^{-35} m). Ob die Entwicklungen der Physik in diese Richtung zum Erfolg führen werden, muss sich noch erweisen.

Verdankungen

Der Autor dankt Prof. em. LUKAS SCHALLER von der Universität Freiburg für die nützlichen Diskussionen und die wertvolle Hilfe bei der Korrektur des Manuskriptes.

Quellen und weiterführende, bzw. verwendete Fachliteratur:

- [PDG] «PARTICLE PHYSICS BOOKLET» July 2010 by the Particle Data Group:
<http://pdg.lbl.gov/> and: <http://pdg.lbl.gov/2011/download/rpp-2010-booklet.pdf>

- [Fr1] HARALD FRITZSCH: «Elementarteilchen – Bausteine der Materie»; C. Beck Wissen, Verlag C. Beck, 2004, ISBN 3-406-50846-4

- [Fr2] HARALD FRITZSCH: «Quarks – Urstoff unserer Welt». Piper München Zürich, 1992, ISBN 3-492-21655-2

- [Ge] HENNING GENZ: «Elementarteilchen». Fischer Taschenbuch 2003, ISBN 3-596-15354-9
- [Mu] FRANÇOISE MULHAUSER et PAUL KNOWLES: «Le Rayon du Proton». Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg, Bull. Soc. Frib. Sc. Nat. – Vol. 100 (2010; dieses Heft), pp. XX-YY; ISSN 0366-3256
- [Ve] MARTINUS VELTMAN: «Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics». World Scientific, 2003; ISBN 981-238-148-1
- [Vö] HANSRUEDI VÖLKLE: «Die kosmische Strahlung». Bulletin der Naturforschenden Gesellschaft Freiburg, Bull. Soc. Frib. Sc. Nat. – Vol. 100 (2010; dieses Heft), pp. XX-YY; ISSN 0366-3256
- [Wik] Im Weiteren wurden teilweise Informationen aus dem Internet (meistens aus Wikipedia) in bearbeiteter Form verwendet. Einige der wichtigsten benutzten Links sind im Folgenden aufgelistet:
- Electroweak Interaction: http://en.wikipedia.org/wiki/Electroweak_interaction
 - Elementary Particles: http://en.wikipedia.org/wiki/Elementary_particle
 - Fundamental interaction: http://en.wikipedia.org/wiki/Fundamental_interaction
 - Minimal Supersymmetric Standard Model:
http://en.wikipedia.org/wiki/Minimal_Supersymmetric_Standard_Model
 - Standard Model: http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model
 - String Theory: http://en.wikipedia.org/wiki/String_theory
 - Yukawa Potential: http://en.wikipedia.org/wiki/Yukawa_potential