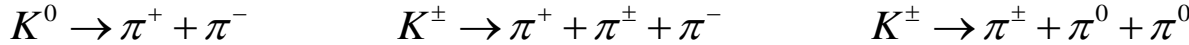
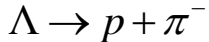


**Quarks (bis 1974)**

Mit dem Aufkommen von Teilchenbeschleunigern in den 1950er Jahren wurden immer mehr Teilchen entdeckt, die durch die Umwandlung von kinetischer Energie in Masse entstanden ("Elementarteilchen-Zoo"). Im Jahr 1949 wurden z.B. Teilchen mit Massen um 500 MeV entdeckt, die paarweise entstanden und in Pionen zerfielen:



Diesen sog. Kaonen wurde eine weitere Quantenzahl, die "**Seltsamkeit**" *S* (*strangeness*) zugeschrieben. Es wurden auch Teilchen entdeckt, die schwerer als das Proton und Neutron sind, z.B. das neutrale Lambda mit 1116 MeV



Aufgrund des Umstands, dass Protonen stabil sind (und nicht z.B. in Positronen zerfallen), wurde als weitere Quantenzahl, für die ein Erhaltungssatz gilt, die "**Baryonenzahl**" *B* postuliert. Baryonen unterliegen der starken Wechselwirkung und haben halbzahligen Spin (Fermionen). Das Lambda ein Baryon. Für Mesonen gibt es keine Erhaltungsgröße.

Die Gültigkeit mancher Erhaltungsgrößen hängt von der Wechselwirkung ab, z.B. werden Teilchen mit  $S \neq 0$  durch die starke Wechselwirkung immer paarweise mit  $\Sigma S = 0$  erzeugt, während die *S*-Erhaltung bei Zerfällen aufgrund der schwachen Wechselwirkung dieser Teilchen verletzt wird.

Um 1960 wurde begonnen, die Teilchen nach gruppentheoretischen Erwägungen gemäß verschiedenen Quantenzahlen anzuordnen, z.B. das Baryon-Oktett (rechts), vertikal *S*, horizontal Isospin  $I_z$ . Der **Isospin** wurde in die Kernphysik eingeführt, um Proton und Neutron einheitlich zu beschreiben: analog zum Spin haben sie Isospin  $I = 1/2$  und unterscheiden sich in dessen Richtung  $I_z = \pm 1/2$ . Es gibt aber auch Teilchen mit  $I = 1, 3/2$  und  $2$ .

Dieser "eightfold way" (ein Ausdruck aus dem Buddhismus) führte zur Entwicklung des Quark-Modells (M. Gell-Mann, J. Ne'emann, G. Zweig). Der Name "**Quarks**" stammt aus dem Roman "Finnegan's Wake" von James Joyce ("three quarks for Muster Mark") und bezeichnet Spin-1/2-Teilchen mit Ladung  $\pm 1/3e$  oder  $\pm 2/3e$ , die nur in gebundener Form in Baryonen und Mesonen (Hadronen) existieren.

$$Q = \frac{1}{2}(B + S) + I_z = \frac{1}{2}Y + I_z$$

- Q*: Ladung
- B*: Baryonenzahl
- S*: Strangeness
- $I_z$ : Isospin
- $Y = B + S$ : Hyperladung (seltener verwendet)

Das Quark-Modell erklärt die Systematik der Hadronen. Es gewinnt u.a. Realität durch die Beobachtung von "Jets" (Bündel von Teilchen mit ähnlicher Flugrichtung) in Teilchenkollisionen bei hoher Energie sowie durch Streuexperimente mit hoher Energie, die (ähnlich den Rutherford'schen Streuversuchen) Hinweise auf die Bestandteile der Nukleonen geben.

Nach heutigem Verständnis sind Hadronen, d.h. Baryonen und Mesonen zusammengesetzte Teilchen:

**Baryonen bestehen aus 3 Quarks oder 3 Antiquarks**

**Mesonen bestehen aus 1 Quark und 1 Antiquark**

**Leptonen dagegen sind elementare Teilchen.**

Bis 1974 bekannte Quarks:

**up (u) Q = + 2/3**

**down (d) Q = - 1/3**

**strange (s) Q = - 1/3**

und die entsprechenden Antiquarks.

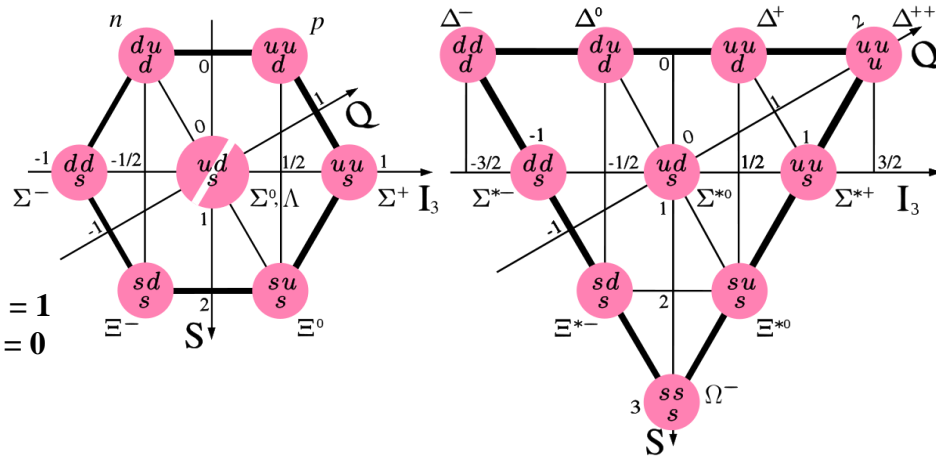
Beispiele für Baryonen:

Proton = up + up + down Q = +2/3+2/3-1/3 = 1

Neutron = up + down + down Q = +2/3-1/3-1/3 = 0

Baryonen-Oktett (Spin 1/2) und Baryonen-Dekuplett (Spin 3/2).

Hier ist  $I_3$  der Isospin. Manche Autoren verwenden  $T$ , um Verwechslungen mit dem Kernspin  $I$  vorzubeugen.

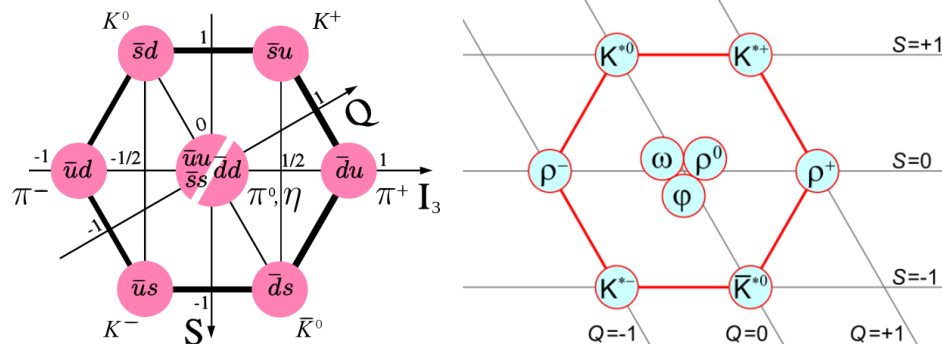


Ein Erfolg des "eightfold way" war die Vorhersage des  $\Omega^-$ -Baryons (sss mit Spin 3/2), das 1964 entdeckt wurde.

Beispiel für Mesonen: Pionen

$\pi^+$  = up + anti-down Q = +2/3+1/3 = 1

$\pi^-$  = anti-up + down Q = -2/3-1/3 = -1



(Freie drittelzahlige Ladungen wurden bislang nie beobachtet)

Pseudoskalare Mesonen (Spin 0) und Vektormesonen (Spin 1) - Wikipedia

Es gibt Baryonen mit drei gleichartigen Quarks , obwohl sie Spin-1/2-Teilchen (Fermionen) sind, z.B. die drei "Ecken" des Spin-3/2-Dekupletts:

$$\Delta^- (ddd) \quad \Delta^{++} (uuu) \quad \Omega^- (sss)$$

Dies gab Anlass zur Definition einer neuen Quantenzahl , der "Farbladung" (color) der Quarks: red, green, blue. Die Farbladung ist eine Eigenschaft der Teilchen wie die elektrische Ladung, existiert aber in drei Varianten. Außerdem sind alle beobachtbaren Teilchen (Baryonen und Mesonen) "farblos", d.h. ihre Quarks haben entweder eine Farbe plus die entsprechende Antifarbe (Mesonen) oder sie haben drei verschiedene Farben (Baryonen).

Die Wellenfunktion eines Baryons muss insgesamt antisymmetrisch sein (Fermion), daher sind für Spin-3/2-Baryonen drei gleiche Quarks erlaubt, für Spin-1/2-Baryonen nicht.

$$\psi = \psi(space) \cdot \psi(spin) \cdot \psi(flavor) \cdot \psi(color)$$

$\psi(space)$ : die räumliche Wellenfunktion ist für Bahndrehimpuls  $l = 0$  (was hier der Fall ist) symmetrisch

$\psi(color)$ : die Farbwellenfunktion stellt sich für "farblose" Baryonen stets als antisymmetrisch heraus

$$\psi(color) = (rgb - rbg + gbr - grb + brg - bgr) / \sqrt{6}$$

Wenn das so ist, muss das Produkt aus Spin- und Flavor-Wellenfunktion immer symmetrisch sein

$\psi(spin)$ : die Spinwellenfunktion ist für Gesamtspin 1/2 antisymmetrisch, für 3/2 symmetrisch (alle Spins in gleicher Richtung)

$\psi(flavor)$ : die Flavor-Wellenfunktion kann symmetrisch oder antisymmetrisch sein, z.B. Mesonen mit  $u$  und  $d$

(Isospin-Triplett: Pionen)	$+1 \quad  1 \ 1\rangle = -u\bar{d}$ $I = 1, \quad I_z = 0 \quad  1 \ 0\rangle = (u\bar{u} - d\bar{d}) / \sqrt{2}$ $-1 \quad  1 \ -1\rangle = d\bar{u}$	(Isospin-Singlett: $\rho^0$ -Teilchen)
	$I = 0 \quad I_z = 0 \quad  0 \ 0\rangle = (u\bar{u} + d\bar{d}) / \sqrt{2}$	

und entsprechend komplizierter bei den Baryonen mit 3 Quarks. Bei drei gleichen Quarks kann die Flavor-Wellenfunktion aber nur symmetrisch sein (Austausch zweier Quarks kann das Vorzeichen nicht umdrehen), so dass die Spin-Wellenfunktion auch symmetrisch sein muss (Spin 3/2).

## 7.2 Übersicht

### Antiteilchen

Aus der relativistischen Quantenmechanik folgt der **Spin** der Teilchen und die Existenz von **Antiteilchen**.

<b>Leptonen</b>	(aktueller Stand)	<b>Antileptonen</b>
$e^-$ $\mu^-$ $\tau^-$		$e^+$ $\mu^+$ $\tau^+$
$\nu_e$ $\nu_\mu$ $\nu_\tau$		$\bar{\nu}_e$ $\bar{\nu}_\mu$ $\bar{\nu}_\tau$

Namen: Elektron/Positron, Myon, Tau-Lepton.  
 Dass geladene Leptonen negativ und Antileptonen positiv sind, rührt letztlich daher, dass Benjamin Franklin um 1750 eine Ladung als positiv definiert hat, die von einem mit Seide geriebenen Glasstab abgestoßen wird.

**Leptonenzahl = Zahl der Leptonen einer Familie (  $e, \mu, \tau$  ) minus Zahl der Antileptonen derselben Familie** ist unter allen Wechselwirkungen (nahezu) für jede Familie separat erhalten. Die jüngst entdeckten Neutrino-Oszillationen legen eine von Null verschiedene (aber kleine) Neutrinomasse und eine geringfügige Verletzung der einzelnen Leptonenzahl nahe, aber die Gesamtleptonenzahl  $L_e+L_\mu+L_\tau$  ist weiterhin eine strenge Erhaltungsgröße.

### Hadronen

**Baryonen bestehen aus 3 Quarks**, ihre Antiteilchen aus 3 Antiquarks

**Baryonenzahl = Zahl der Baryonen minus Zahl der Antibaryonen** ist stets erhalten (Proton zerfällt nicht).

**Mesonen bestehen aus 1 Quark und 1 Antiquark**, beim Meson/Antimeson ist das schwerere Quark positiv/negativ. Die Anzahl der Mesonen ist keine Erhaltungsgröße.

<b>Quarks</b>	(aktueller Stand)	<b>Antiquarks</b>
$u$ $c$ $t$	( $Q = +2/3$ )	$\bar{u}$ $\bar{c}$ $\bar{t}$ ( $Q = -2/3$ )
$d$ $s$ $b$	( $Q = -1/3$ )	$\bar{d}$ $\bar{s}$ $\bar{b}$ ( $Q = +1/3$ )

Namen: up, down, charm, strange, bottom (beauty), top.

Bis 1974 waren nur  $u, d$ , und  $s$  bekannt. In diesem Jahr wurde am Brookhaven Lab das elektrisch neutrale  $J$ -Teilchen und wenige Tage später bei SLAC das  $\psi$ -Teilchen entdeckt. Beide stellten sich als dasselbe Teilchen heraus, das bis heute den Namen  $J/\psi$  trägt. Es ist ein "Charmonium"-Zustand, bestehend aus  $c$ -Quark und  $c$ -Antiquark. 1977 wurde das  $Y(1S)$ , ein Bottomium-Zustand entdeckt, und 1995 schließlich das  $t$ -Quark.

**Flavor-Quantenzahlen (Quark-Zusammensetzung)** sind bei starker Wechselwirkung erhalten, bei schwacher Wechselwirkung verletzt

$s$ : $S = -1$	$\bar{s}$ : $S = +1$	<b>Strangeness</b>
$c$ : $C = +1$	$\bar{c}$ : $C = -1$	<b>Charmness</b>
$b$ : $B' = -1$	$\bar{b}$ : $B' = +1$	<b>Bottomness</b>
$t$ : $T = +1$	$\bar{t}$ : $T = -1$	<b>Topness</b>

1947: $K^+$	$(u\bar{s})$	494 MeV
1974: $J/\psi$	$(c\bar{c})$	3097 MeV
1977: $Y(1S)$	$(b\bar{b})$	9460 MeV

**Farbladung (color) der Quarks: red, green, blue.**

(Um Verwechslungen mit der Baryonenzahl  $B$  zu vermeiden, wird Bottomness manchmal mit  $B'$  abgekürzt. Insgesamt wird dieser Begriff aber eher selten benötigt)

### 7.3 Relativistische Kinematik

#### Wie entdeckt man neue Teilchen?

Langlebige Teilchen kann man als Spur in einer Nebelkammer oder sonstigen Detektoren (Driftkammer etc.) direkt beobachten, ihren Impuls bestimmen und ihre Energie in einem Kalorimeter messen. Teilchen mit einer typischen Lebensdauer von  $10^{-23}$  s durchfliegen jedoch nicht einmal einen Nukleondurchmesser, bevor sie zerfallen. Die einzigen in Teilchenexperimenten direkt beobachteten Teilchen sind:  $p, n, \pi, K, e, \mu, \gamma$  + ggf. deren Antiteilchen. Alle anderen Teilchen müssen "rekonstruiert" werden.

Relativistischer Energiesatz für ein Teilchen:  $E^2 = m_0^2 c^4 + \vec{p}^2 c^2$   $m_0^2 c^2 = \left(\frac{E}{c}\right)^2 - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2$

Die Ruhemasse hat in jedem Bezugssystem denselben Wert, sie ist "invariant" unter Lorentz-Transformationen.

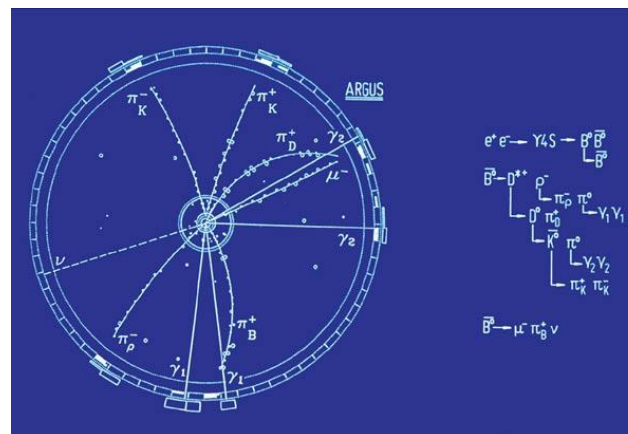
Viele Teilchen:  $m_0^2 c^2 = \left(\sum_i \frac{E_i}{c}\right)^2 - \left(\sum_i \vec{p}_i\right)^2$  ist ebenfalls invariant (sog. "invariante Masse"·c zum Quadrat).

Da Energie und Impuls beim Zerfall eines Teilchens in andere Teilchen erhalten bleiben, ist seine Ruhemasse gleich der invarianten Masse, die man aus der Summe der Energien und Impuls der Zerfallsteilchen erhält.

Bei der Suche nach neuen Teilchen sucht man also nach Ereignissen mit ähnlicher invarianter Masse.

#### Praktische Schwierigkeiten:

- eindeutige Zuordnung von Teilchenspuren zu einem gemeinsamen Zerfallsereignis ("kombinatorischer Untergrund")
- Neutrinos werden nicht beobachtet
- andere Teilchen werden nicht beobachtet, z.B. weil der Raumwinkel des Detektors  $< 4\pi$  ist



Beispiel für ein "Ereignis" im ARGUS-Detektor am  $e^+e^-$ -Ring DORIS 1987: Die Entdeckung von Quark-Mischungen an B-Mesonen. Ein neutrales B-Meson ist in sein Antiteilchen übergegangen (DESY, Hamburg).

**Übliche Schreibweise: Energie und Impuls als Vierervektor ("Viererimpuls")**  $P \equiv \left( \frac{E}{c}, p_x, p_y, p_z \right)$

(Viererimpulse werden im Folgenden groß geschrieben)

**Man definiert ein "Skalarprodukt" mit der Besonderheit, dass die drei letzten Terme ein Minuszeichen erhalten. Das Ergebnis des Produkts eines Vierervektors mit sich selbst ist eine Invariante:**

$$P \cdot P \equiv \frac{E^2}{c^2} - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2 = m_0^2 c^2$$

Das funktioniert auch mit anderen Größen, die man in der Relativitätstheorie als Vierervektor schreiben kann, z.B. Zeit und Ort (ct, x, y, z), aber die Schreibweise variiert: Manchmal erhält der erste Term das Minuszeichen, manchmal wird das Minuszeichen durch Einfügen von i erzwungen. Oft erhalten Vierervektoren einen Index und die "Einsteinsche Summenkonvention" besagt, dass über doppelt vorkommende Indizes summiert wird, z.B.

$$P_\mu \cdot P^\mu \equiv \frac{E^2}{c^2} - p_x^2 - p_y^2 - p_z^2$$

**Skalarprodukt des Viererimpulses mit sich selbst ist invariant**

- zu verschiedenen Zeiten z.B. vor und nach der Reaktion
- in verschiedenen Systemen z.B. Laborsystem und Schwerpunktssystem

**Rechenbeispiel: Ein ruhenden negatives Pion zerfällt in ein negatives Myon und ein Neutrino. Wie groß ist die Geschwindigkeit des Myons? Wenn man Energie und Impuls des Myons weiß, ist es einfach:**

$$p_\mu = m_\mu \gamma_\mu v_\mu \quad E_\mu = m_\mu \gamma_\mu c^2 \quad \rightarrow \quad \frac{v_\mu}{c^2} = \frac{p_\mu}{E_\mu} \quad \boxed{v_\mu = \frac{p_\mu}{E_\mu} c^2}$$

**Energie:**  $P_\nu = P_\pi - P_\mu; \quad P_\nu^2 = P_\pi^2 + P_\mu^2 - 2P_\pi P_\mu$

$P_\pi = P_\nu + P_\mu$

$$0 = m_\pi^2 c^2 + m_\mu^2 c^2 - 2 \frac{E_\pi}{c} \frac{E_\mu}{c} = m_\pi^2 c^2 + m_\mu^2 c^2 - 2m_\pi E_\mu; \quad \boxed{E_\mu = \frac{m_\pi^2 + m_\mu^2}{2m_\pi} c^2}$$

**Impuls:**  $P_\mu = P_\pi - P_\nu; \quad P_\mu^2 = P_\pi^2 + P_\nu^2 - 2P_\pi P_\nu$

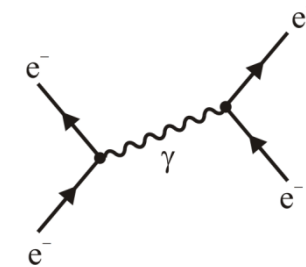
$$m_\mu^2 c^2 = m_\pi^2 c^2 + 0 - 2 \frac{E_\pi}{c} \frac{E_\nu}{c} = m_\pi^2 c^2 - 2m_\pi E_\nu; \quad E_\nu = p_\nu c = p_\mu c = \boxed{\frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2m_\pi} c^2}$$

**Geschwindigkeit (oben eingesetzt):**  $v_\mu = \frac{p_\mu}{E_\mu} c^2 = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{m_\pi^2 + m_\mu^2} c = 0.27 \cdot c$

## 7.4 Wechselwirkungen und Austauscheteilchen

### Elektromagnetische Wechselwirkung

Das Austauscheteilchen der elektromagnetischen Wechselwirkung ist das Photon. Es ist ein Boson (Spin 1). Da es keine Masse, besitzt die Wechselwirkung eine große Reichweite.



### Schwache Wechselwirkung

Die Austauscheteilchen sind Bosonen (Spin 1), die im Gegensatz zu Photon (und Gluonen)

- eine Masse besitzen und
- z.T. eine elektrische Ladung tragen.

$W^\pm$	80,4 GeV
$Z^0$	91,2 GeV

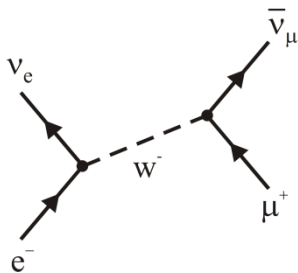


Carlo Rubbia  
(\*1934)

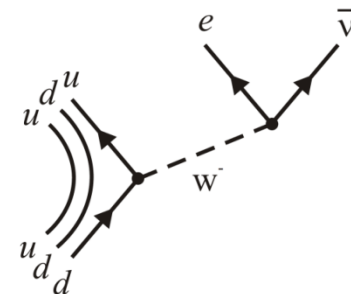
Diese Teilchen wurden 1983 am SPS/CERN in Proton-Antiproton-Kollisionen direkt nachgewiesen (C. Rubbia et al.).

**Alle Teilchen werden von der schwachen Wechselwirkung beeinflusst. Beim Austausch eines W-Bosons ändern die Teilchen ihre Ladung, beim Austausch eines Z-Bosons bleiben sie - wie beim Photonenaustausch - gleich.**

Auch W- und Z-Bosonen können (im Gegensatz zu Photonen) miteinander reagieren.



Dieses Beispiel stellt eine Wechselwirkung zwischen einem Elektron und einem Anti-Myon dar, bei dem ein Elektron-Neutrino und ein Myon-Antineutrino entsteht. An jedem Vertex des Graphen bleibt die Ladung und die jeweilige Leptonenzahl erhalten.



Dieses Beispiel zeigt die Umwandlung eines d-Quark in ein u-Quark, d.h. die Flavor-Quantenzahl (die bei der starken Wechselwirkung erhalten bliebe) ändert sich. Aus dem W-Boson wird ein Elektron und ein Antineutrino. Neben dem dem d-Quark ist noch ein weiteres d- und ein u-Quark als Zuschauer (*spectator quark*) beteiligt. Dies könnte also der  $\beta^-$ -Zerfall eines Neutrons sein.