

## Wiederholung

### Antiteilchen

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

**Leptonen** unterliegen nicht der starken Wechselwirkung:

$$e^- \quad \mu^- \quad \tau^-$$

$$\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau \quad + \text{Antiteilchen}$$

**Hadronen** unterliegen der starken Wechselwirkung:

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

**Mesonen** bestehen aus 1 Quark und 1 Antiquark , beim Meson/Antimeson ist das schwerere Quark positiv/negativ.

### Quarks

$$u \quad c \quad t \quad (Q = +2/3)$$

$$d \quad s \quad b \quad (Q = -1/3) \quad + \text{Antiteilchen}$$

### Quantenzahlen

**Ladung:** unter allen Wechselwirkungen erhalten

**Leptonenzahl:** Elektron-, Muon-, Tau-Leptonenzahl verletzt (Neutrino-Oszillationen), in ihrer Summe erhalten

**Baryonenzahl:** stets erhalten

**Spin:** Leptonen und Quarks haben Spin 1/2 (Fermionen), Baryonen heben halbzahligen, Mesonen ganzzahligen Spin

**Bahndrehimpuls:** Baryonen und Mesonen haben im Grundzustand  $L = 0$ , es gibt angeregte Zustände  $L = 1, 2 \dots$

**Gesamtdrehimpuls:**  $LS$ -Kopplung wie bei Elektronen leichter Atome oder Nukleonen bei leichten Kernen

**Flavor-Quantenzahlen:** Isospin ( $I_z = +1/2$  für  $u$ ,  $-1/2$  für  $d$ ), Strangeness ( $S = +1$  für  $s$ ), ... umgekehrt für Antiteilchen

**Color:** red, gree, blue + Antifarben, beobachtbare Teilchen sind "farbneutral" ( $r+g+b$  oder Farbe+Antifarbe)

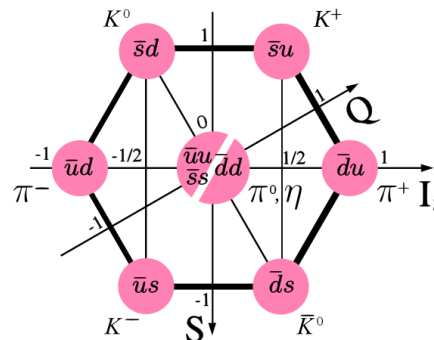
$$Q = \frac{1}{2}(B + S + \dots) + I_z \quad \text{Gell-Mann-Nishijima-Formel}$$

**Angeregt Zustände** von Mesonen und Baryonen

z.B. Quarkonium (Charmonium, Bottonium, Topponium),

Schreibweise wie in der Kernphysik:

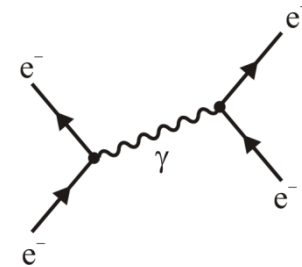
$$n^{2S+1}L_J \quad \text{z.B.} \quad 4^3S_1 \quad Y(4S) \quad b\bar{b}$$



## 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

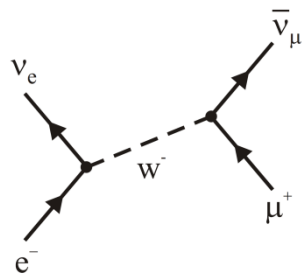


Carlo Rubbia (\*1934)

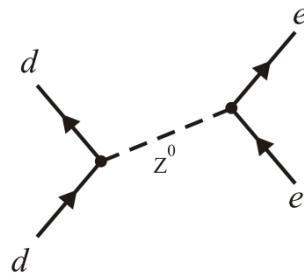
Diese Teilchen wurden 1983 am SPS/CERN in Proton-Antiproton-Kollisionen direkt nachgewiesen (C. Rubbia et al.).

**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.**

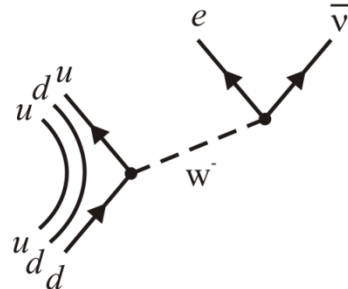
Auch W- und Z-Bosonen können (im Gegensatz zu Photonen) miteinander reagieren.



Dieses Beispiel stellt eine Wechselwirkung zwischen einem Elektron und einem Anti-Myon dar, wobei ein Elektron-Neutrino und ein Myon-Antineutrino entsteht. An jedem Vertex ist die Ladung und die jeweilige Leptonenzahl erhalten.



Hier tauscht ein  $d$ -Quark ein  $Z$ -Boson mit einem Elektron aus ("neutraler Strom" im Gegensatz zum "geladenen Strom" beim  $W$ -Austausch).



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.

**Anmerkung zum "Umklappen" von Linien im Feynman-Diagramm:**  
Wenn die Zeitrichtung geändert und ein Teilchen durch sein Antiteilchen ersetzt wird, ergibt sich wieder ein gültiges Diagramm.

Die Kopplung zwischen den Quarks unter dem Einfluss der schwachen Wechselwirkung wird durch die Cabibbo-Kobayashi-Masukawa-Matrix (CKM) beschrieben:

$$\begin{pmatrix} u' \\ c' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,974 & 0,225 & 0,004 \\ 0,225 & 0,986 & 0,041 \\ 0,008 & 0,040 & 0,999 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Beträge der Matrixelemente mit z.T. großer Unsicherheit. Die präzise Vermessung der CKM-Matrix-Elemente ist ein wichtiges Forschungsziel der Elementarteilchenphysik. Die Betragsquadrate geben Übergangswahrscheinlichkeiten an.

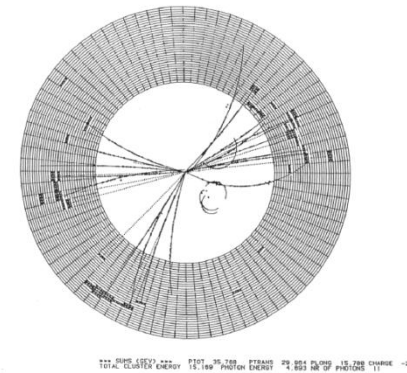
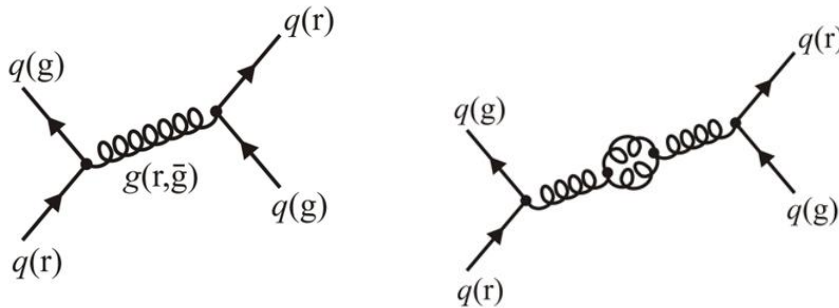
### Starke Wechselwirkung

Die Austauschteilchen sind masselose Bosonen (Spin 1), die Gluonen. Sie tragen eine Farbladung, die sich aus einer Farbe (g, r, b) und einer Antifarbe zusammensetzt. Gemäß der "Quantenchromodynamik" gibt es acht Gluonen:

$$|r\bar{g}\rangle \quad |r\bar{b}\rangle \quad |g\bar{r}\rangle \quad |g\bar{b}\rangle \quad |b\bar{r}\rangle \quad |b\bar{g}\rangle \quad |r\bar{r}\rangle \quad \frac{1}{\sqrt{2}}(|r\bar{r}\rangle - |g\bar{g}\rangle) \quad \frac{1}{\sqrt{6}}(|r\bar{r}\rangle + |g\bar{g}\rangle - 2|b\bar{b}\rangle)$$

Die kurze Reichweite der Wechselwirkung ist hier keine Folge der Masse der Austauschteilchen, sondern der besonderen Eigenschaft, dass nur "farbneutrale" Teilchen frei existieren (3 Farben oder Farbe+Antifarbe).

Erste experimentelle Hinweise auf Gluonen waren 3-jet-Ereignisse ab 1979 am e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>-Speicherring PETRA in Hamburg (PETRA wurde 2009 zu einer Synchrotronlichtquelle umgebaut).



### Gravitation

Eine Quantenfeldtheorie der Gravitation steht noch aus. Als (hypothetisches) Austauschteilchen wird ein masseloses Spin-2-Boson (Graviton) angenommen.

Damit ergibt sich das "Standardmodell der Elementarteilchen" → Grafik

**Anmerkung: Symmetrien**

Im Jahr 1918 wurde von E. Noether folgendes Theorem formuliert:

- Aus der Zeitinvarianz folgt der Energieerhaltungssatz
- Aus der Translationsinvarianz folgt der Impulserhaltungssatz
- Aus der Rotationsinvarianz folgt der Drehimpulserhaltungssatz

Symmetrien spielen auch in der Elementarteilchenphysik eine wichtige Rolle:

**Parität P:**

Die Symmetrie gegenüber Punktspiegelung (Umkehrung aller Koordinaten) wird durch die schwache Wechselwirkung verletzt, z.B.

- $\beta$ -Zerfall von  $^{60}\text{Co}$  (C.-S, Wu 1956): Elektronen werden entgegen der Richtung des Kernspin emittiert, der gespiegelte Vorgang existiert in der Natur nicht.
- Neutrinos sind "linkshändig" (Spinrichtung entgegen der Bewegungsrichtung), Antineutrinos sind rechtshändig

**Ladungskonjugation C:**

Die Symmetrie gegenüber der Vertauschung des Vorzeichens der elektr. Ladung wird ebenfalls durch die schwache Wechselwirkung verletzt.

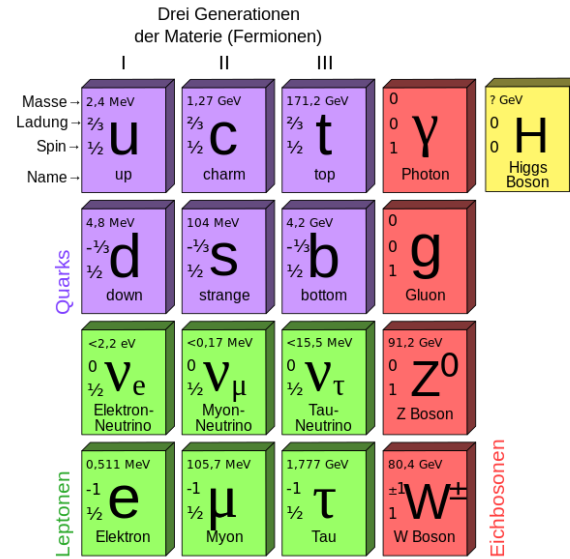
Von besonderem Interesse ist auch die

**CP-Invarianz:**

Die Symmetrie gegenüber Spiegelung und Ladungsvertauschung ist ebenfalls verletzt, z.B. in Zerfällen von Kaonen, D- und B-Mesonen. Ein Zusammenhang mit der Dominanz von Materie gegenüber Antimaterie im Universum wird vermutet (A. Scharow 1960).

**Zeitumkehr T:**

Die Symmetrie gegenüber der Umkehr der Zeitachse wurde ebenfalls nachgewiesen. Bislang wurde keine Verletzung der **CPT-Invarianz** beobachtet.



(Wikipedia, Authors: MissMJ, Polluks)



Emmy Noether (1882-1935)



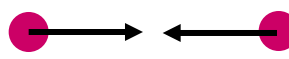

Chien-Shiung Wu (1912-1997)

**Skalarprodukt des Viererimpulses ist invariant**

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

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

**Zweites Rechenbeispiel:** Zwei geladene Teilchen gleicher Ruhemasse  $m$  bewegen sich mit entgegengesetzt gleichem Impuls im Laborsystem aufeinander zu. Wie groß ist die kinetische Energie eines Teilchens im Ruhesystem des anderen Teilchens im Vergleich zur kinetischen Energie im Laborsystem?

Gesamtenergie	$E_1$		$E_2 = E_1$		$E'_1$		$mc^2$
kin. Energie	$T_1$		$T_2 = T_1$		$T'_1$		0
Impuls	$\vec{p}_1$		$\vec{p}_2 = -\vec{p}_1$		$\vec{p}'_1$		0
Geschwindigkeit	$\vec{v}_1$		$\vec{v}_2 = -\vec{v}_1$		$\vec{v}'_1$		0

(i) Nicht-relativistisch:  $v'_1 = 2v_1 \rightarrow T'_1 = 4T_1$

(ii) Relativistisch: Viererimpulse in beiden Systemen  $P = \left( 2 \frac{E_1}{c}, 0, 0, 0 \right)$   $P' = \left( \frac{E'_1}{c} + mc, p'_1, 0, 0 \right)$

$$P^2 = P'^2 \quad 4 \frac{E_1^2}{c^2} = \left( \frac{E'_1}{c} + mc \right)^2 - p_1'^2 = \frac{E_1'^2}{c^2} + 2mE'_1 + m^2c^2 - \frac{E_1'^2}{c^2} + m^2c^2 = 2mE'_1 + 2m^2c^2$$

$$E'_1 = 2 \frac{E_1^2}{mc^2} - mc^2$$

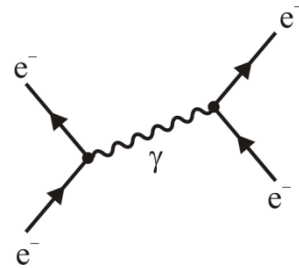
$$T'_1 = E'_1 - mc^2 = \frac{2}{mc^2} (T_1^2 + 2T_1mc^2 + m^2c^4) - 2mc^2 = \frac{2}{mc^2} (T_1^2 + 2T_1mc^2)$$

$$T'_1 = 4T_1 \left( 1 + \frac{T_1}{2mc^2} \right)$$

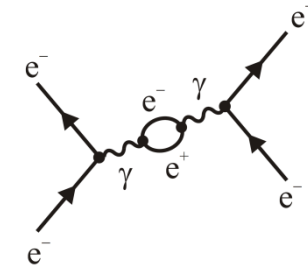
Gegenüber dem nicht-relativistischen Ergebnis gibt es also einen Zusatzgewinn an kinetischer Energie, wenn  $T_1$  mit der Ruheenergie vergleichbar oder größer ist.

**Wiederholung: Feynman-Diagramme**

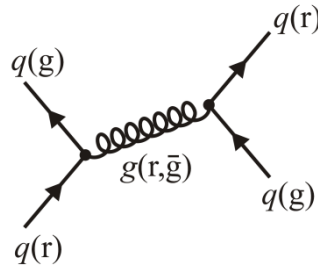
**- elektromagnetische Wechselwirkung**



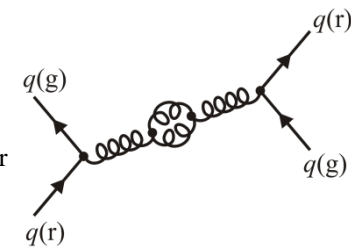
höhere Ordnung:  
Elektron-Positron,  
weitere Photonen  
...



**- starke Wechselwirkung**

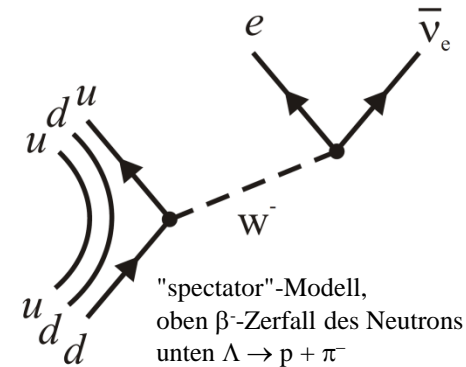
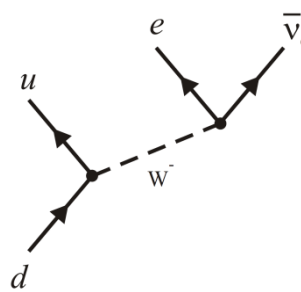
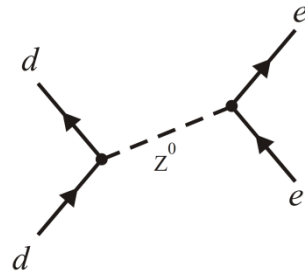


höhere Ordnung:  
auch Gluonen  
können miteinander  
wechselwirken

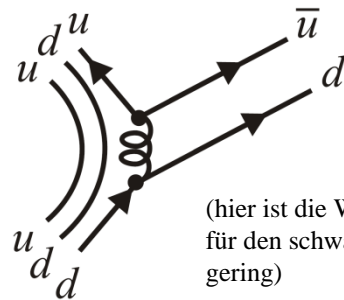
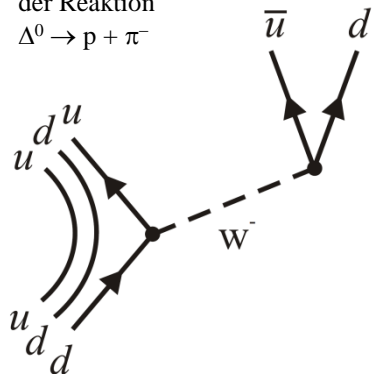


**- schwache Wechselwirkung**

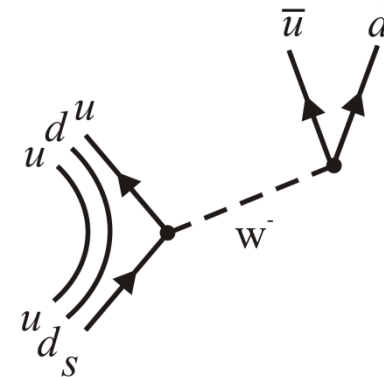
neutrale und geladene "Ströme"



zwei verschiedene Varianten  
der Reaktion  
 $\Delta^0 \rightarrow p + \pi^-$



(hier ist die Wahrscheinlichkeit  
für den schwachen Prozess sehr  
gering)



## 7.5 Teilchenphysik ohne Beschleuniger

### Astroteilchenphysik

Beobachtung kosmischer Teilchenstrahlung oder elektromagnetischer Strahlung,  
Zusammenhang mit der Kosmologie (Urknall, frühes Universum, Sternentwicklung, dunkle Materie...)

### Neutronen und Neutrinos aus Kernreaktoren

z.B. Neutrinooszillationen

### Sonstiges

Suche nach exotischen Teilchen, nach bruchzahliger Elementarladung etc.

## Beispiel: Dunkle Materie

### Indizien

Rotationsgeschwindigkeit von Galaxien entspricht nicht der sichtbaren Materieverteilung

Ref.: van Albada et al., Astrophysical Journal Part 1, 295 (1985) p. 305

Effekte von Gravitationslinsen entsprechen nicht der sichtbaren Materieverteilung



### Kandidaten

Staub, nichtleuchtende Sterne, kühles Gas

Neutrinos (mit Masse)

hypothetische Teilchen (Axions)

### Alternative

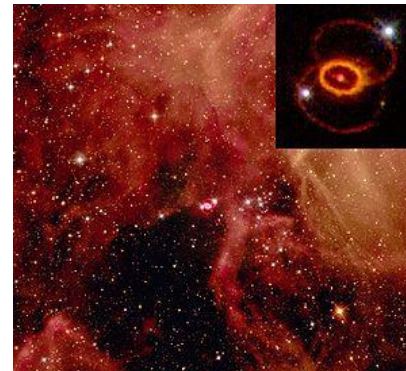
Abweichungen vom Gravitationsgesetz

## Beispiel: Neutrino-, Gamma-, Röntgen-Astronomie

### Neutrinos

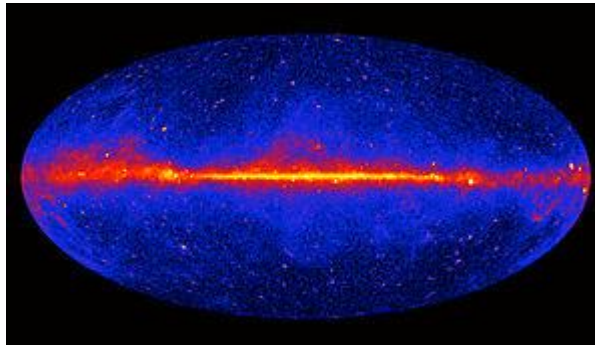
#### Solare Neutrinos: Defizit von Elektron-Neutrinos weist auf Neutrinooszillationen hin Neutrinos von Supernova-Explosionen (SN 1987 A)

Im Februar 1987 wurde eine Supernova in einer benachbarten Zwerggalaxie, der Großen Magellanschen Wolke, optisch beobachtet. Etwa drei Stunden vorher wurden von mehreren Neutrino-Detektoren einige Neutrinos innerhalb weniger Sekunden registriert. Das Licht benötigte drei Stunden, um die Oberfläche des explodierenden Sterns zu erreichen, während die Neutrinos ohne Wechselwirkung diesen Weg schneller zurücklegten. Die Supernova fand vor ca. 160.000 Jahren statt.



### Gamma-Strahlung

#### Vorteil gegenüber Teilchenstrahlung: Gegenrichtung der Bahn weist auf die Quellen z.B. Supernova-Überreste



Das HESS-Experiment (High Energy Stereoscopic System) in Namibia beobachtet Luftschaer in der Atmosphäre, die durch hochenergetische Photonen (Gammastrahlung) erzeugt werden. Die Achse der beobachteten Luftschaer weist zur Quelle der Gammastrahlung, z.B. Überreste von Supernova-Explosionen (im Gegensatz dazu geht bei geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung die Richtungsinformation durch kosmische Magnetfelder verloren). Die Luftschaer werden von mehreren Teleskopen mit Spiegeldurchmessern bis zu 28 m detektiert. In den Foki der gekrümmten und segmentierten Spiegel befinden sich Kamera, deren "Pixel" Photomultiplier sind.