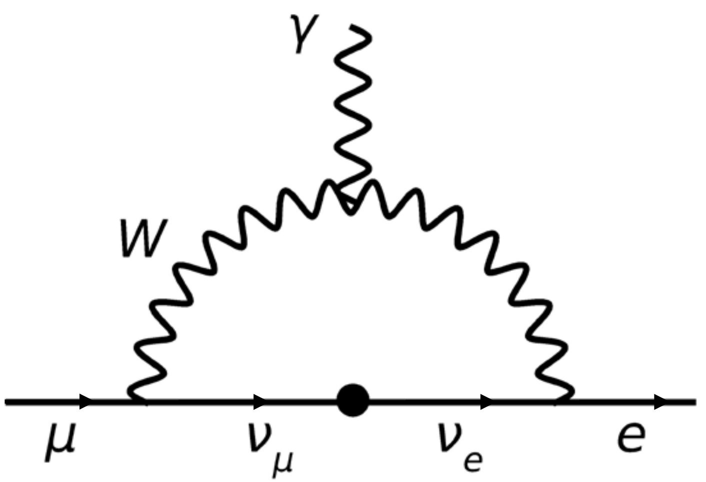
Abb. V.0a Leptonzahlverletzung im μ-Zerfall

Für Neutrinos verletzt die Existenz von **Neutrino-Mixing** ($\nu_i \leftrightarrow \nu_k$) explizit die **Leptonzahl**. Aufgrund dieser Verletzung kann es aufgrund höherer Ordnungen auch für **geladene Leptonen** zu sehr kleiner **Leptonzahl-verletzung** kommen:

$$\mu^- \to e^- \gamma$$



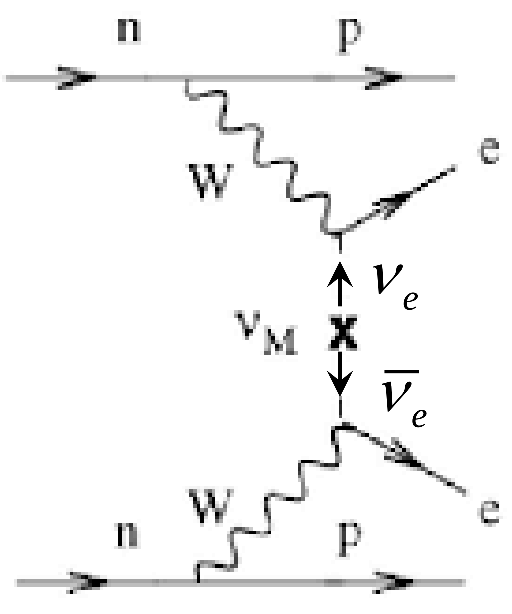
erwartetes Verzweigungsverhältnis:

$$BR < 10^{-53}$$

aktuelle Forschung: Limit < 10^{-11}

Abb. V.0b Majorana-Neutrinos in $0\nu 2\beta$

Für Neutrinos (neutral) ist unklar ob sie tatsächlich sogenannte Dirac-Fermionen (Fermion / Anti-Fermion) sind, oder ob sie vielleicht nicht ihr eigenes Antiteilchen sind (Fermion=Anti-Fermion): **Majorana-Teilchen**.



Im letzteren Fall wäre der neutrinolose Doppel-Beta-Zerfall möglich: Dieser Zerfall wäre dann natürlich **leptonzahlverletzend**.

Suche nach neutrinolosem 2β-Zerfall ist deshalb Gegenstand aktueller Forschung.

Abb. V.1 Kopplung von Spins

Spin für zusammengesetzte Systeme am Beispiel von Positronium e^+e^-

1-Teilchen Spinzustände

$$\left|\uparrow\right\rangle = \left|\overset{J}{\frac{1}{2}};\overset{J_z}{\frac{1}{2}}\right\rangle \qquad \left|\downarrow\right\rangle = \left|\frac{1}{2};-\frac{1}{2}\right\rangle$$

2-Teilchen Spinzustände

$$\left|\tfrac{1}{2}\,\tfrac{1}{2}\right\rangle\left|\tfrac{1}{2}\,\tfrac{1}{2}\right\rangle \qquad \left|\tfrac{1}{2}\,-\tfrac{1}{2}\right\rangle\left|\tfrac{1}{2}\,\tfrac{1}{2}\right\rangle$$

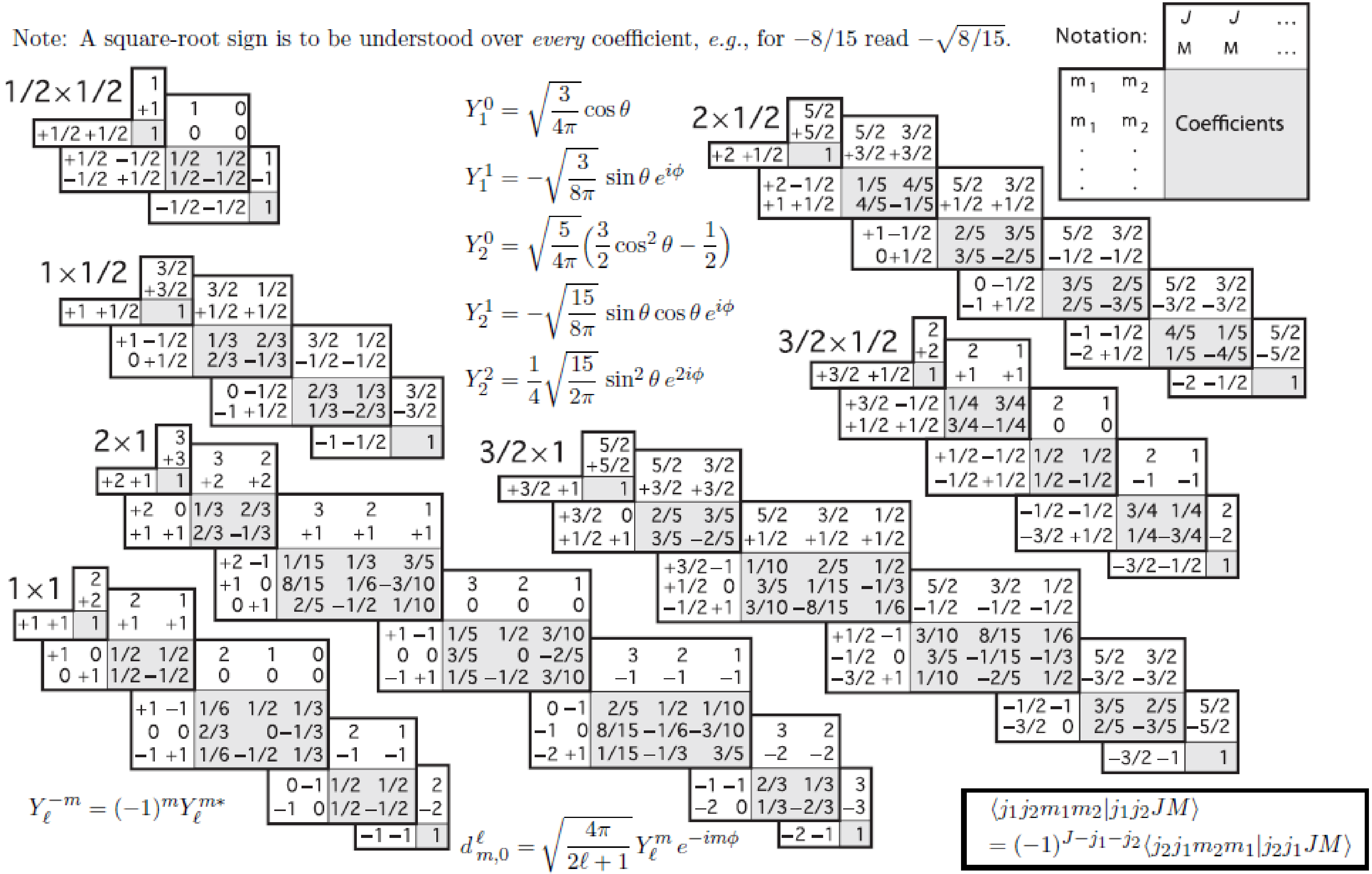
$$J=1 \quad \begin{cases} J_z = 1 & \left|\uparrow\right\rangle\left|\uparrow\right\rangle \\ J_z = 0 & \dfrac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|\uparrow\right\rangle\left|\downarrow\right\rangle + \left|\downarrow\right\rangle\left|\uparrow\right\rangle\right) \\ J_z = -1 & \left|\downarrow\right\rangle\left|\downarrow\right\rangle \end{cases}$$

Symmetrisches Triplett

$$J=0 \qquad J_z = 0 \quad \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|\uparrow\right\rangle\left|\downarrow\right\rangle - \left|\downarrow\right\rangle\left|\uparrow\right\rangle\right)$$

Aymmetrisches Singulett:

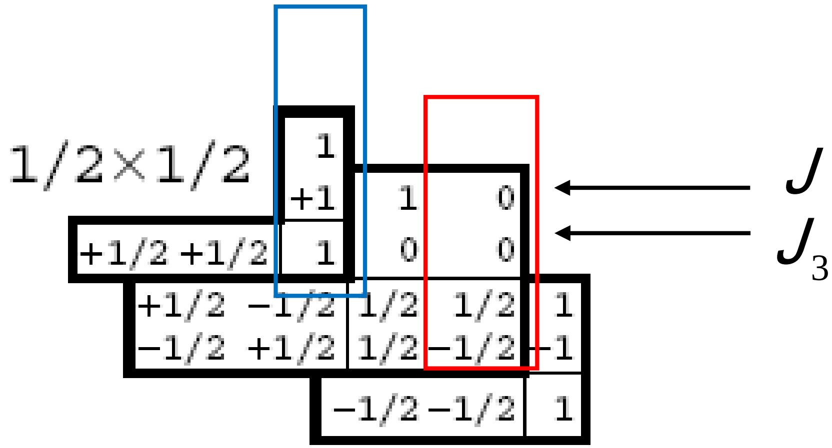
Abb. V.2 Clebsch-Gordan Koeffizienten



pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-rev-clebsch-gordan-coefs.pdf

Abb. V.3 Anwendung von Clebsch-Gordon Koeffizienten

$$|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle$$



$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle\right)$$

Abb. V.4 Isospin für 2-Nukleonensystem

Isospin: $I \quad I_3 \qquad\qquad I \quad I_3$

1-Teilchen $\qquad |p\rangle = \left|\frac{1}{2};\frac{1}{2}\right\rangle \quad |n\rangle = \left|\frac{1}{2};-\frac{1}{2}\right\rangle$

2-Teilchen

$I = 1$

Triplett

$$\begin{cases} I_3 = 1 & |p\rangle|p\rangle \\ I_3 = 0 & \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|p\rangle|n\rangle + |n\rangle|p\rangle\right) \\ I_3 = -1 & |n\rangle|n\rangle \end{cases}$$

$I = 0 \qquad I_3 = 0 \quad \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|p\rangle|n\rangle - |n\rangle|p\rangle\right)$

Singlett

Abb. V.5 Isospinerhaltung in starker WW

(1) $$p + p \rightarrow d^{+} + \pi^{+}$$

$$\begin{array}{lcccc} \mathrm{I}: & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 1 \\ \mathrm{I}_3: & +\frac{1}{2} & +\frac{1}{2} & 0 & +1 \end{array}$$

(2) $$p + n \rightarrow d^{+} + \pi^{0}$$

$$\begin{array}{lcccc} \mathrm{I}: & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 1 \\ \mathrm{I}_3: & \underbrace{+\frac{1}{2} \quad -\frac{1}{2}} & & 0 & 0 \end{array}$$

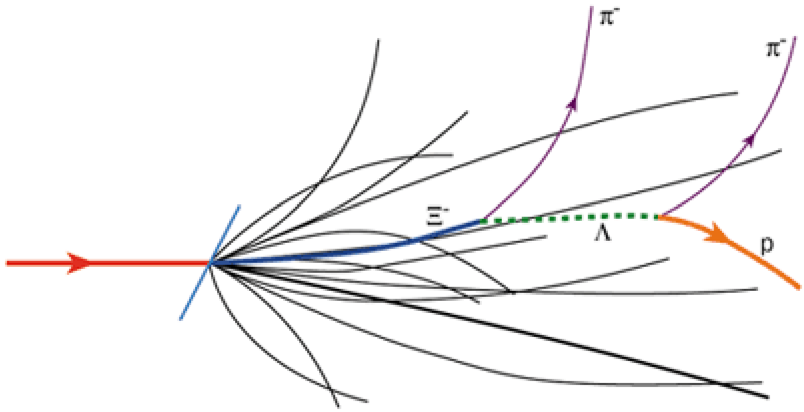
$$\text{pn} \begin{cases} \mathrm{I} = 1 & \mathrm{I}_3 = 0 \\ \mathrm{I} = 0 & \mathrm{I}_3 = 0 \end{cases}$$

Für (pn) Streuung kann das System im Zustand I=1 (50%) oder I=0 (50%) sein. Wegen Isospinerhaltung in starker WW trägt aber nur die Komponente I=1 bei (50%).

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{1}{2}$$

Abb V.6 Strangeness S (S Erhaltung in starker WW)

Strangeness wurde als zusätzliche Quantenzahl eingefürt nachdem Teilchen entdeckt wurden, die eine lange Lebensdauer und einen sehr charakteristischen Zerfall aufweisen:



$$\left.\begin{array}{l} \Lambda^0 \rightarrow p + \pi^- \\ K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- \end{array}\right\}$$ "V-Signatur"

Strangeness-Quantenzahl S:

	K^0	K^+	K^-	Λ	$\overline{\Lambda}$
S =	+1	+1	-1	-1	+1

Heute wissen wir, dass diese Teilchen ein $\bar{s}$ (S=+1) oder ein s-Quark (S=-1) enthalten.

Abb V.6a S-Erhaltung und assoziierte Produktion

Wie der Isospin ist auch die Strangeness in der starken Wechselwirkung erhalten.

Assoziierte Strangeness Produktion:

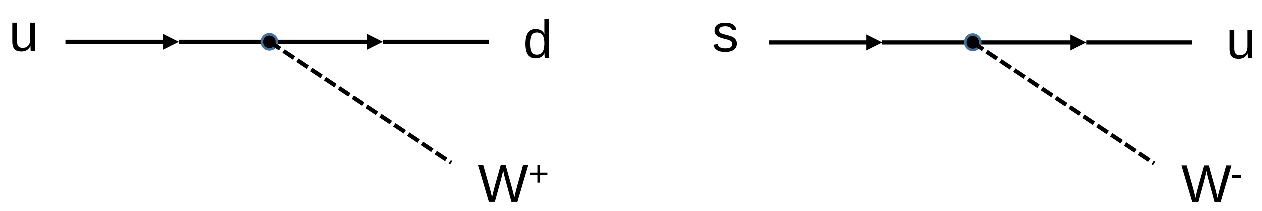
$$\pi^- + p \rightarrow \Lambda + K^0$$

S: 0 0 -1 +1

In starker WW wird zu jedem strange ein anti-strange Teilchen erzeugt.

Abb V.6b Stangeness und Isospin Verletzung

Sowohl Isospin als auch Strangeness sind in der schwachen WW
nicht erhalten:



Heute benutzt man statt des Isospins die Quarkflavor-Zahl (U, D, S, C; B).
Diese sind sowohl in der e.m. als auch in der starken WW erhalten, aber
in der schwachen WW verletzt.