

- Isospin ist in der schwachen WW verletzt (mehr dazu später in der Vorlesung)
- Das Konzept des starken Isospins stammt aus der Zeit in der Quarks noch nicht bekannt waren. Heute benutzt man statt dessen oft Quarkflavour-Quantenzahlen: U, D, C, S, T, B
Diese QZ sind jeweils 1 für die entsprechend Quarks und -1 für die zugehörigen Antiquarks. Ein u Quark hat den Isospin $|1/2, 1/2\rangle$ ein d Quark den Isospin $|1/2, -1/2\rangle$ alle anderen Quarks haben keinen Isospin. Die starke + EM WW erhalten den Quarkflavour. Die schwache WW verletzt auch diese QZ.

4.5 Diskrete Transformationen (multiplikative QZ)

P: Raumspiegelung $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$
 T: Zeitumkehr $t \rightarrow -t$
 C: Ladungskonjugation $q \rightarrow -q$

4.5.1 Raumspiegelung

Die zweimalige Raumspiegelung führt zur Identität.

$$P^2\Psi(t, \vec{x}) = P\Psi(t, -\vec{x}) = \Psi(t\vec{x}) \quad (100)$$

Wenn $\Psi(t, \vec{x})$ Eigenzustand des Paritätsoperators ist, dann gilt:

$$P^2\Psi(t, \vec{x}) = \eta_p^2\Psi(t, \vec{x}) = \Psi(t, \vec{x}) \quad (101)$$

D.h. die Eigenwert η_p des Paritätsoperators können nur ± 1 sein

Beispiel EM Übergänge:

Das Atom wird beschrieben durch ein rotationssymmetrisches Potential, d.h. die Lösungen haben die Form $\Psi(r, \theta, \varphi) = R(r)Y^{lm}(\theta, \varphi)$

Paritätstransformation:

$$r \rightarrow r$$

$$\theta \rightarrow \theta + \pi$$

$$\varphi \rightarrow \varphi + \pi$$

$$PY^{lm}(\theta, \varphi) = Y^{lm}(\theta + \pi, \varphi + \pi) = (-1)^l Y^{lm}(\theta, \varphi)$$

Der Elektrische Dipolübergang $A^* \rightarrow A + \gamma$ ist mit Emission eines Photons γ verbunden. Der relative Drehimpuls (l_{rel}) zwischen dem Photon und A ist null. Aus Auswahlregeln $\Delta l = 1$ folgt:

$$\eta_p(A^*) = \eta_p(A) \cdot (-1) = \eta_p(A) \cdot \eta_p(\gamma) \cdot (-1)^{l_{rel}=0} \quad (102)$$

$$(103)$$

$$\Rightarrow \eta_p(\gamma) = -1$$

Beispiel Zerfall eines Teilchens $X \rightarrow A + B$:

$$\eta_p(X) = \eta_p(A) \cdot \eta_p(B) \cdot (-1)^l$$

l : relativer Drehimpuls zwischen A und B

$l = 0$ Grundzustand

$l = 1, \dots$ angeregter Zustand

Achtung: Wie wir später sehen werden ist die Parität nur in der EM und der starken Wechselwirkung erhalten. D.h. die obenstehende Gleichung gilt nur für EM und starke Zerfälle!

Elementarteilchen sind Eigenzustände des Paritätsoperators und haben einen Paritätseigenwert, die sogenannte intrinsische Parität. Sie ist erhalten solange die Teilchen nicht an schwach Prozessen teilnehmen. Die Theorie sagt nur das Produkt aus der Parität eines Fermions f und seines Antiteilchens \bar{f} voraus, z.b. bei der Paarproduktion via der starken Wechselwirkung.

$$\eta_P(f) \cdot \eta_P(\bar{f}) = -1 \quad (104)$$

Die Wahl der Parität für Fermionen bzw. Antifermionen ist Konvention und wurde positive für Fermionen (Quarks und negativ geladenen Leptonen)

$\eta_P(q) = \eta_P(\ell^-) = +1$ und negative für Antifermionen (Antiquarks und positiv geladene Leptonen) $\eta_P(\bar{q}) = \eta_P(\ell^+) = -1$ gewählt. Da Neutrinos nur an der schwachen Wechselwirkung teilnehmen macht es keinen Sinn eine intrinsische Parität für Neutrinos zu definieren.

4.5.2 Ladungskonjugation C

Die Ladungskonjugation C wird auch C -Parität genannt.

$$C|\text{Teilchen}\rangle = \eta_C|\text{Antiteilchen}\rangle$$

η_C ist eine beliebige Phase, wenn Teilchen kein C Eigenzustand ist. Antiteilchen haben die gleiche Masse, die gleiche Lebensdauer und den gleichen Spin wie ihre Partner-Teilchen. Jedoch sind alle Quantenzahlen wie Ladung, Isospin, Baryonenzahl ... invertiert (mit -1 multipliziert).

Wenn Teilchen = Antiteilchen, dann ist $\eta_C = \pm 1$ z. B.:

$$C|\gamma\rangle = (-1)|\gamma\rangle$$

Der C -Parität von einigen Teilchen muss definiert werden, der Rest ergibt sich dann aus der Betrachtung von Zerfällen. Das Photon ist Quant des EM Feldes, das Feld dreht sich unter Ladungsumkehr um, deshalb ist die C -Parität des Photons als $\eta_C = -1$ definiert.

Der Zerfall des π^0 in zwei Photonen wird beobachtet:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

Daraus folgt das die C -Parität des π^0 $\eta_C(\pi^0) = +1$ ist. Der Zerfall $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma\gamma$ hingegen ist wegen der Verletzung der C -Parität verboten. Beachte genauso wie für die Parität gilt für die C -Parität ebenfalls, dass sie nur in der EM und der starken Wechselwirkung erhalten ist.

4.5.3 Zeitumkehr T

Einige Beispiele wie Observablen unter Zeitumkehr sich verhalten:

$$\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$$

$$\vec{l} = \vec{r} \cdot \vec{p} \rightarrow -\vec{l}$$

4.6 Paritätsverletzung

Bis 1956 galt P , C und T Erhaltung als Dogma, bevor Yang und Lee feststellten, dass die Erhaltungsgrößen nicht getestet wurden und zahlreiche Test zur P -Erhaltung vorschlugen.

θ/τ Puzzle

Zwei Teilchen θ und τ haben die selbe Masse, die selbe Lebensdauer, die selbe Ladung, aber unterschiedliche Parität. Sie wurden in folgenden Zerfällen beobachtet:

$$\theta \rightarrow \pi^+ + \pi^0$$

$$\tau \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$

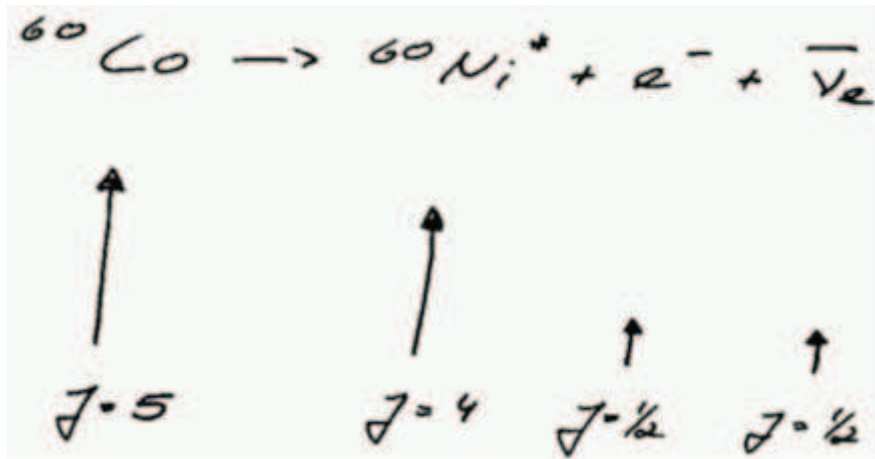
Der Paritätseigenwert eines Quarks ist $\eta_P(q) = +1$ und die Parität eines Antiquarks is $\eta_P(\bar{q}) = -1$. Damit ist der Paritätseigenwert von Mesonen im Grundzustand ($l = 0$) $\eta_P(q\bar{q}) = -1$ und somit auch der Paritätseigenwert von π^0 , π^+ und π^- .

$$\begin{aligned} \eta_P(\theta) &= (-1) \cdot (-1) \cdot (-1)^0 = +1 \\ \eta_P(\tau) &= (-1) \cdot (-1) \cdot (-1) \cdot (-1)^0 = -1 \end{aligned}$$

(θ und τ sind im Grundzustand, d.h. der relative Drehimpuls ihrer Quarks ist null, zudem ist der Spin von θ und τ null, d.h. der Gesamtdrehimpuls ist null. Da der Spin der Pionen ebenfalls null ist folgt aus der Gesamtdrehimpulserhaltung, dass der relative Drehimpuls der Pionen im Endzustand ebenfalls null sein muss).

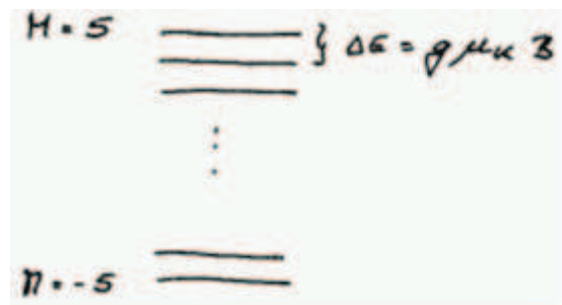
Yang + Lee interpretierten diese Beobachtung als $\theta = \tau$ und folgten daraus, dass die schwache Wechselwirkung Parität verletzt. (Die $\theta = \tau$ Teilchen werden heute K^+ genannt).

Das Wu-Experiment

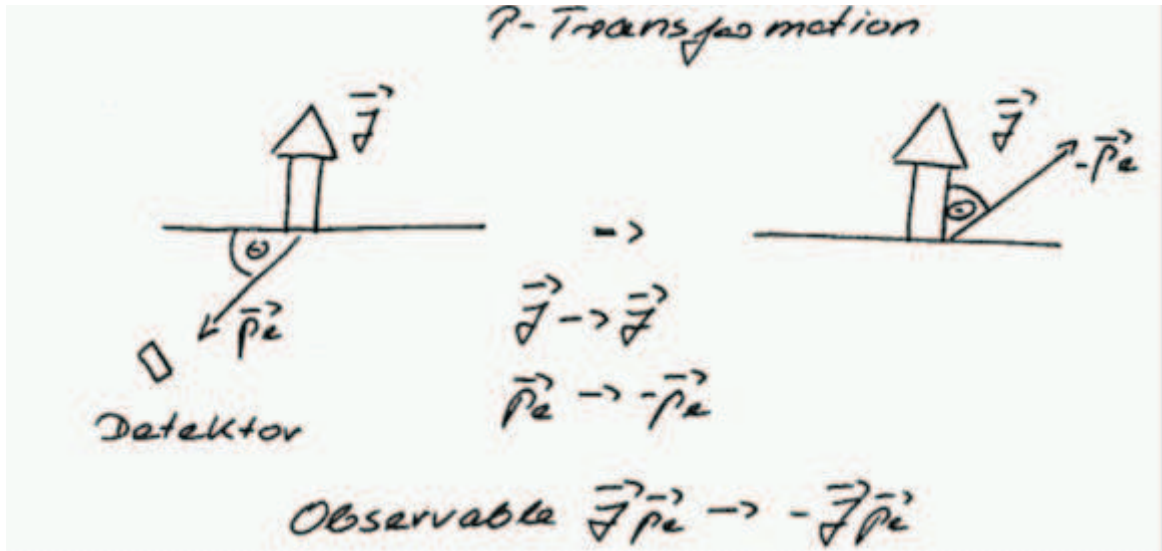


Das Wu-Experiment ist eines der Experimente die von Yang und Lee vorgeschlagen wurden um die Paritätserhaltung zu testen. Sie schlugen die Untersuchung des β -Zerfalls: ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni}^* + e^- + \bar{\nu}_e$ vor.

Spin des ${}^{60}\text{Co}$: $J = 5 \rightarrow$ D.h. die z Komponente M kann die Werte $-5, -4, \dots, 4, 5$ annehmen.



Bei tiefen Temperaturen ist vorwiegend der $M = -5$ Zustand besetzt ($T \approx 10$ mK), d.h. die ${}^{60}\text{Co}$ Probe hat eine wohl definierte Ausrichtung des Spins, d.h. sie ist polarisiert. In dem Experiment werden die Raten der emittierten Elektronen unter einem bestimmten Winkel θ relativ zur Polarisationsachse des Spins gemessen. Unter Paritätstransformation ändert sich der Spin nicht ($P(\vec{J}) = P(\vec{r} \times \vec{p}) = -\vec{c} \times -\vec{x})\vec{J}$, aber der Impuls. D.h. wenn Parität erhalten ist, muss die Rate der gestreuten Elektronen in Richtung des Drehimpulses \vec{J} gleich der Rate der in entgegengesetzte Richtung gestreuten Elektronen sein.



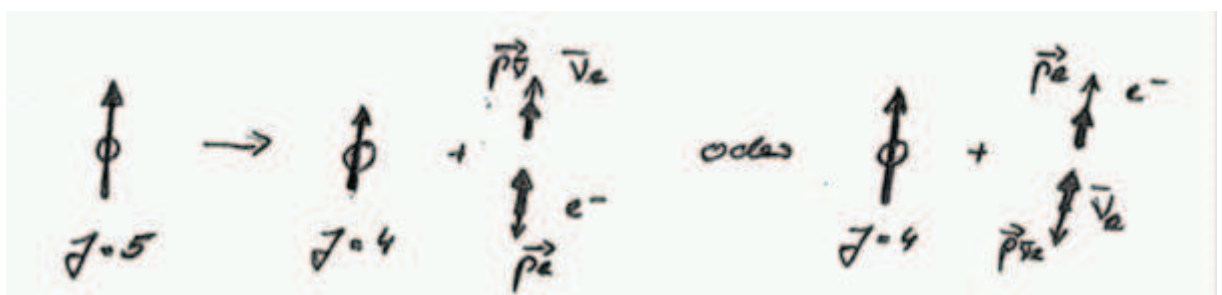
Im Experiment wurde statt den Detektor zu verschieben die Polarisation des B-Feldes gedreht.

Paritätserhaltung bedeutet NICHT, dass das Experiment vor und nach der Paritätstransformation identisch aussieht, sondern es bedeutet dass die gemessenen Raten im Originalexperiment und im paritätstransformierten Experiment gleich sind.

Das Ergebnis dieses Versuches zeigte eindeutig Paritätsverletzung (siehe Folien)

Erklärung:

Das Elektron und das Antineutrino fliegen back-to-back im Ruhesystem des



^{60}Co . Ihr Spin muss parallel zueinanderstehen, damit der Gesamtspin nach

dem Zerfall sich zu dem Gesamtspin vor dem Zerfall ($J=5$) addiert. Aus den beiden Bedingungen ergeben sich zwei mögliche Konfigurationen. Es wird aber nur die erste oben skizzierte Konfiguration beobachtet.

Wir gehen davon aus, dass die Masse des Elektrons in dem Versuch vernachlässigbar ist und betrachten die Helizität der beteiligten Teilchen.

$$\text{Helizität } h = \frac{\vec{p} \cdot \vec{s}}{|\vec{p}| |\vec{s}|}$$

h = -1 linkshändig (LH)
h = +1 rechthändig (RH)

In der ersten skizzierten Spinorientierung gilt $h(e^-) = -1$ (LH) und $h(\bar{\nu}_e) = +1$ (RH)

In der zweiten skizzierten Spinorientierung gilt $h(e^-) = +1$ (RH) und $h(\bar{\nu}_e) = -1$ (LH)

In weiteren Experimenten konnte ebenfalls bestätigt werden, dass nur LH e^- (oder RH e^+) in schwachen Zerfällen entstehen.

Das bedeutet maximale Paritätsverletzung.

Goldhaber zeigte 1957, dass Neutrinos immer LH und Antineutrinos immer RH sind, was ebenfalls maximaler Paritäts- und C-Paritätsverletzung entspricht.

Nebenbemerkung:

Helizität ist eine Meßgröße, Meßvorschrift $h = \frac{\vec{p} \cdot \vec{s}}{|\vec{p}| |\vec{s}|}$. Die Helizität eines Teilchens hängt vom Bezugssystem ab. Wenn das Teilchen $m \neq 0$ hat und damit $v \neq c$, gibt es immer ein "schnelleres" Bezugssystem, indem der Impuls und damit die Helizität das Vorzeichen wechselt.

Es gibt jedoch eine Quantenzahl (Chiralität), die die Werte linkshändig und rechthändig annehmen kann. Für masselose Teilchen ist

$$\begin{aligned} \text{linkshändige Helizität} &= \text{linkshändige Chiralität} \\ \text{rechthändige Helizität} &= \text{rechthändige Chiralität} \end{aligned}$$

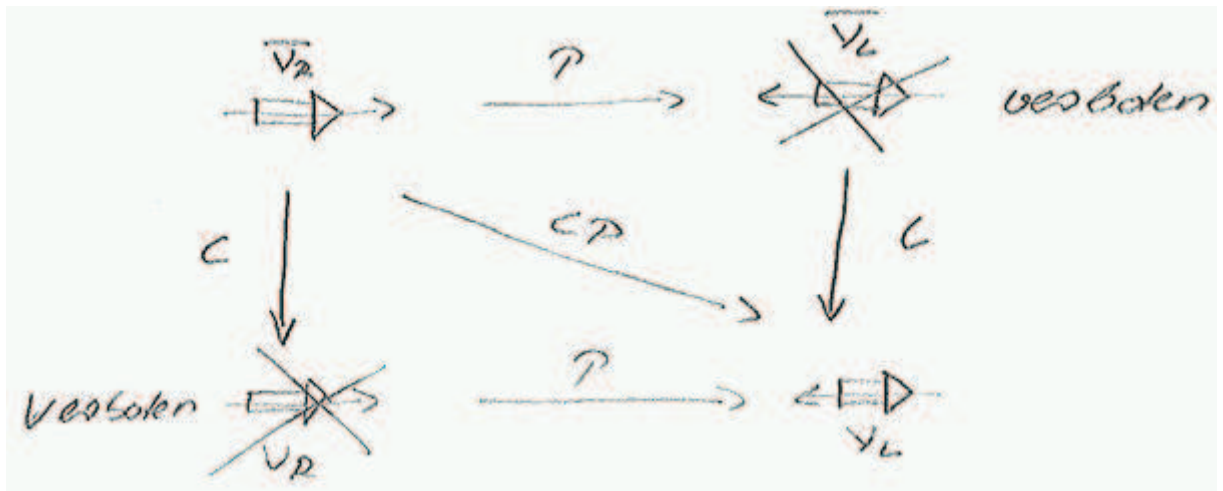
Die W^\pm (Austauschbosonen der schwachen Wechselwirkung) koppeln nur an LH Fermionen und an RH Antifermionen im Sinne von LH und RH Chiralität.

Umso leichter die Teilchen, umso mehr gilt die Gleichheit von Helizität und Chiralität.

Für diese Vorlesung behandeln wir hochenergetische Teilchen als masselos, d.h. nehmen an dass ihre Helizität gleich ihrer Chiralität ist.

4.7 CP -Verletzung

Lange Zeit ging man davon aus, dass die schwache Wechselwirkung P und C , aber nicht die Kombination CP verletzt.



Cronin & Fitch zeigte 1964, dass CP in K^0 Zerfall verletzt ist. CP ist in der EM und der starken Wechselwirkung erhalten aber in der schwachen verletzt.

4.8 CPT

Lorenzinvarianz und CPT Invarianz ist eine fundamentale Eigenschaft lokaler Feldtheorien. Alle unsere derzeitigen Modelle bauen auf Quantenfeldtheorie auf. Der Nachweis von CPT Verletzung hätte gravierende Auswirkungen auf unser Verständnis der Teilchenphysik. Es wird nach CPT Verletzung z.B. in Antiwasserstoff-Experimenten am CERN gesucht.

4.9 Zusammenfassung

Die Tabelle zeigt ein Übersicht aller in diesem Kapitel diskutierten Quantenzahlen und in welchen Wechselwirkungen sie erhalten bzw. verletzt sind.

Größe	EM WW	starke WW	schwache WW
Isospin I	-	x	-
Baryonzahl B	x	x	x
Leptonzahl $L_{e/\mu/\tau}^*$	x	x	x
C	x	x	-
P	x	x	-
T	x	x	-
CP	x	x	-
CPT	x	x	x
Ladung Q	x	x	x
Flavourquantenzahlen U, D, C, S, B, T	x	x	-

* Ausnahme Neutrinooszillation

x = ist erhalten - = ist nicht erhalten

5 Streuung von Elektronen mit Kernen und Nukleonen

Elektron-Proton, Elektron-Neutron und Elektron-Kern Streuexperimente und ihre Interpretation sind der Schlüssel zum Verständnis der Struktur von Kernen und Nukleonen. Die Beschreibung der Streuung hängt von der Energie der einlaufenden Elektronen ab. Jenachdem ob die Energie ausreicht die Ausdehnung des Targets (Kern oder Nukleon) aufzulösen oder ob die Energie sogar ausreicht um das Target anzuregen oder Aufzubrechen müssen unterschiedliche Effekte berücksichtigt werden.

5.1 Rutherford-Streuung

Die Rutherfordstreuung beschreibt den Stoss zweier **nicht relativistischer, punktförmiger, spinloser Teilchen**