

Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III
Vorlesung 11

MICHAEL FEINDT
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Symmetrien

Symmetrie: Definition

nach H. Weyl, R.P.Feynman:

Objekt, Naturgesetz

Transformation

„... a **thing** is symmetrical, if you can do **something** to it and after you have done it, it **looks the same** as before ...“

Invarianz

Symmetrie:

Ordnungsprinzipien

Vorhersagen

Zusammenhang mit unbeobachtbaren Größen

Erhaltungssätze

Struktur der Wechselwirkungen

Noether-Theorem

Jede Symmetrie führt zu einer Erhaltungsgröße!

Symmetrien ↔

Symmetrieoperationen	unbeobachtbar	Erhaltungsgröße	
..... im Raum	absoluter Ort	Impuls	} kontinuierliche Beispiele
Drehung im Raum	absolute Richtung	Drehimpuls	
Translation in der Zeit	Energie	
Eichtransformation (QM)	Phase der Wellenfunktion	el. Ladung	} QM
Raumspiegelung	absolute Händigkeit	Parität P	} Diskrete Operationen
Materie – Antimaterie	Materieart	C-Parität	
Zeitumkehr	absolute Zeitrichtung	T-Parität	

P:	$\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$;	$\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$	
C:	$Q \rightarrow -Q$;	$B \rightarrow -B$;
T:	$t \rightarrow -t$;	$\vec{r} \rightarrow \vec{r}$;
			$\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$	

EW diskreter Symmetrieoperationen P,C,T

Eigenwerte: **+/- 1**

Warum? : Zweifache Anwendung führt immer zum Ausgangspunkt zurück

- P:** Original → Spiegelbild → Original
- C:** Teilchen → Antiteilchen → Teilchen
- T:** Zeit vorw. → Zeit rückw. → Zeit vorw.

$$P(P\psi) = \eta_P^2 \psi = \psi$$

$$C(C\psi) = \eta_C^2 \psi = \psi$$

$$T(T\psi) = \eta_T^2 \psi = \psi$$

$$\Rightarrow \eta_P^2 = 1$$

$$\Rightarrow \eta_P = \pm 1 \quad \text{Paritätseigenwert} = +1 \text{ oder } -1$$

- Innere Parität von Teilchen:
- N, p, Δ- Baryonen (per Def.) :** +1
 - Fermionen :** +1
 - Antifermionen :** -1

Bahndrehimpuls

Parität von Reaktionen : $i \rightarrow a + b$ $\Rightarrow P(i) = P(a) \cdot P(b) \cdot (-1)^L$

Parität ist multiplikativ

Parität ist erhalten in em. und starker Ww (bis 1958: immer...)

$\tau - \theta$ – Puzzle

2 Teilchen τ ($\rightarrow 2\pi$) und θ ($\rightarrow 3\pi$) (heute beides K-Mesonen) mit

- gleicher Masse, gleicher Lebensdauer, gleicher Erzeugungsreaktion, Spin 0, aber **unterschiedlicher Parität**

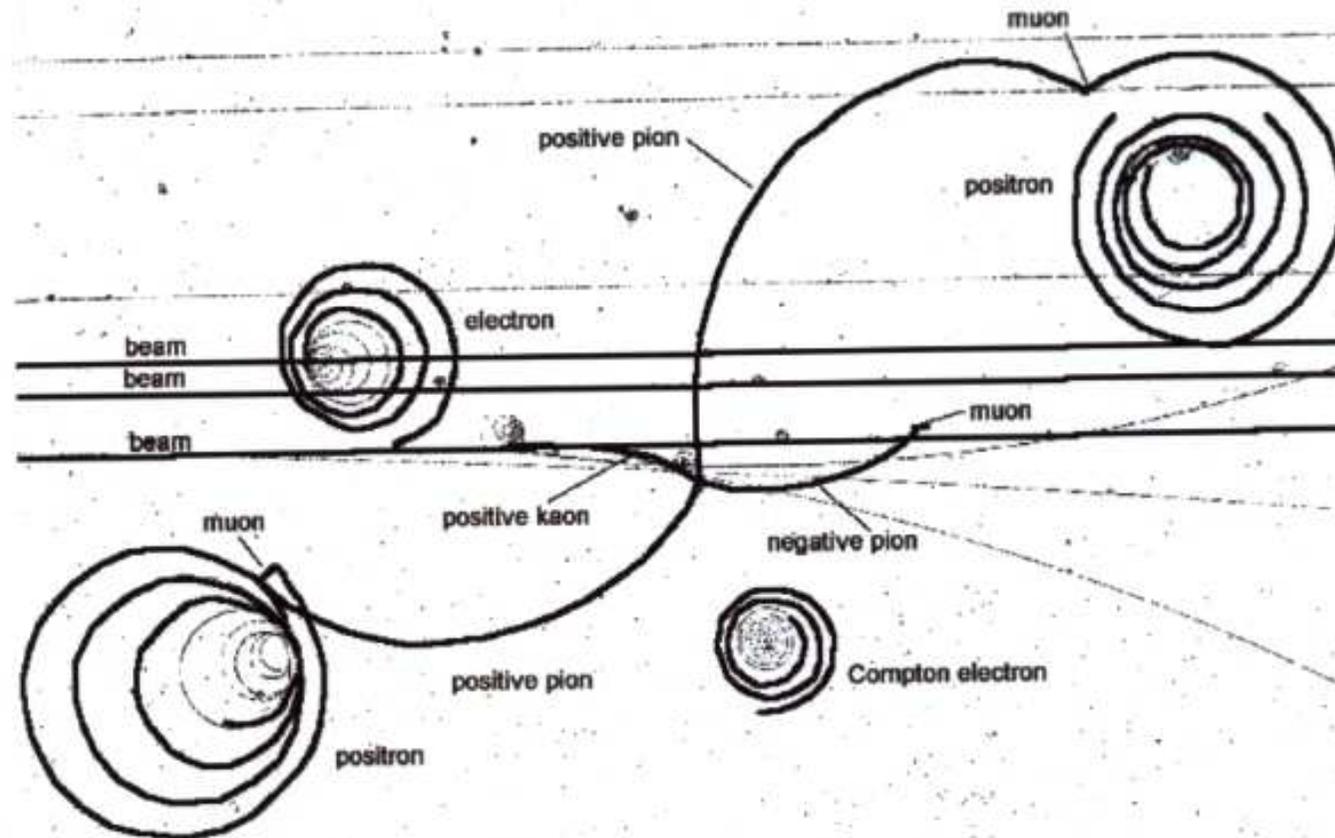
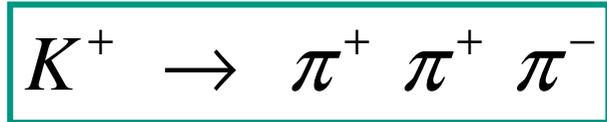
	K^+	\rightarrow	π^+	π^0	
$J^P :$	0		0^-	0^-	
$L = 0$	$\rightarrow P =$		$(-)$	$(-)$	$\cdot (-1)^0 = +1$

	K^+	\rightarrow	π^+	π^+	π^-
$J^P :$	0		0^-	0^-	0^-
$L = 0$	$\rightarrow P =$		$(-)$	$(-)$	$(-) \cdot (-1)^0 = -1$

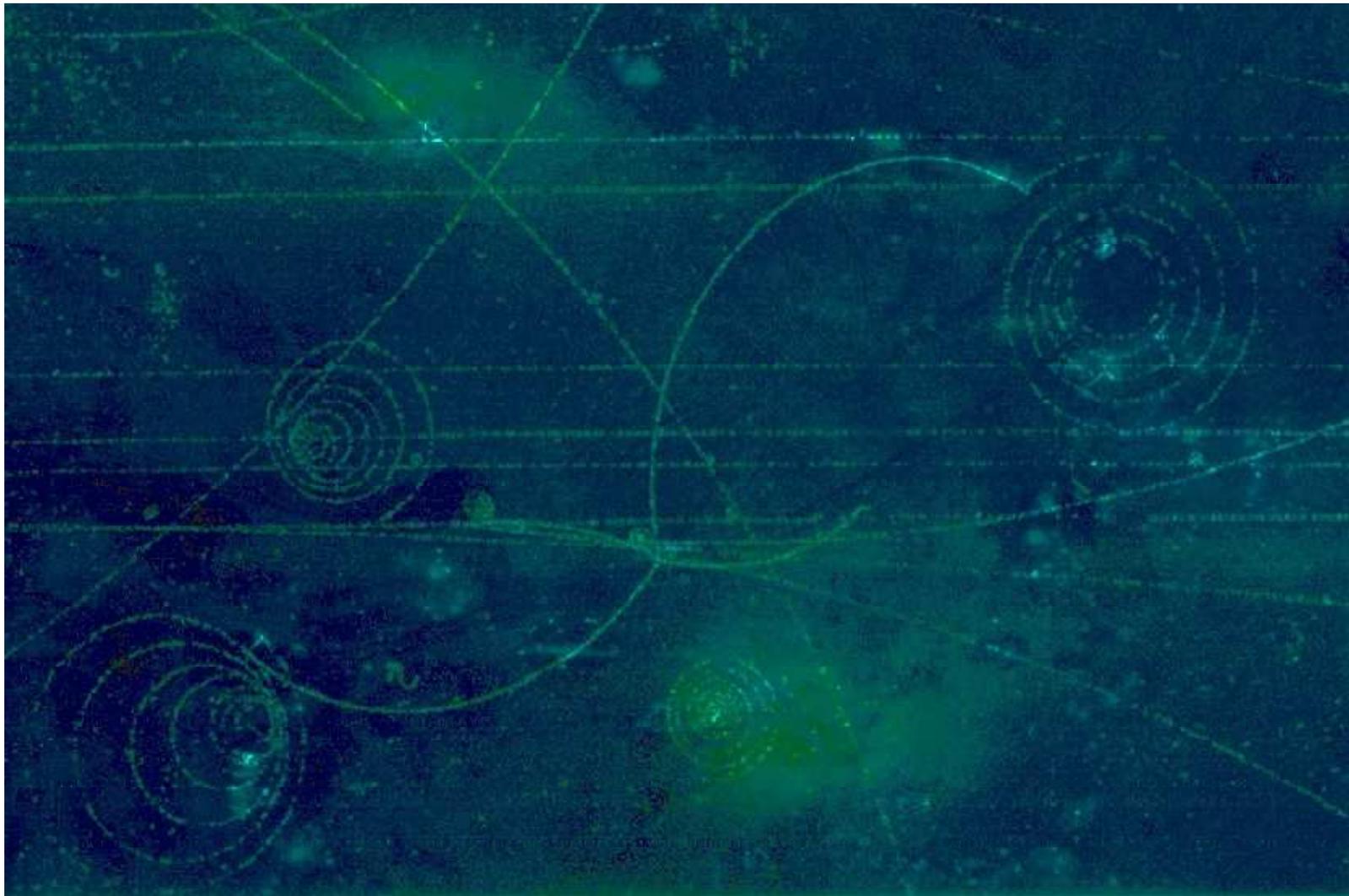
Lee, Yang 1956 : es handelt sich um ein und dasselbe Teilchen, aber die Spiegelsymmetrie-Parität ist nicht erhalten!

\Rightarrow Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung

Bsp. für θ - Zerfall

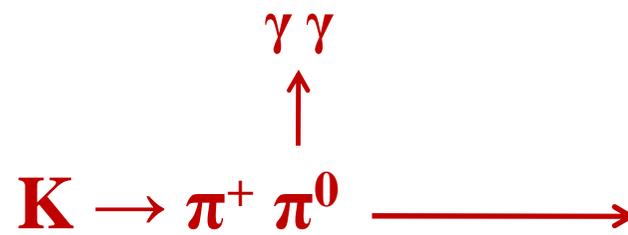


Bsp. für θ - Zerfall

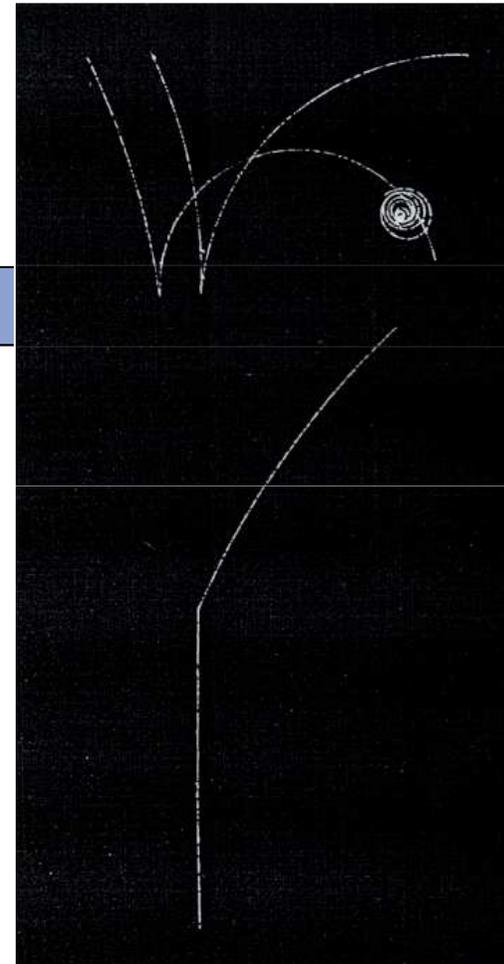


Bsp. für τ - Zerfall

Konversion der
beiden Photonen
(in Blei) in
 e^+e^- - Paare



Blei



\uparrow
K

Wu-Experiment (1956)

- Spin polarisiertes ^{60}Co , β -Zerfall in $^{60}\text{Ni}^* e^- \bar{\nu}_e$

$J = 5$

$J = 4$

Kernspin im Magnetfeld
bei $T=10\text{mK}$ ausgerichtet

- erwartet bei Paritätserhaltung: Elektronrate unabhängig von Raumrichtung

- gefunden:

$$I(0) = I_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}}{E} \right)$$

mit $\alpha = 1$!

\Rightarrow keine definierte Parität

große (maximal mögliche) Antisymmetrie
gefunden: Elektronen werden in Richtung
des Kernspins bevorzugt

Frauenfelder 1957: Elektronen im β Zerfall sind vorwiegend linkshändig polarisiert
(Helizität = Spinausrichtung in Bewegungsrichtung = -1)

\Rightarrow nur linkshändige Fermionen und rechtshändige Antifermionen
nehmen an der schwachen Wechselwirkung teil

Parität verschiedener Größen

Impuls (Polarvektor)

1⁻ Vektor

$$\hat{P} \vec{x} = -\vec{x}$$

$$\hat{P} \vec{p} = -\vec{p}$$

Drehimpuls (Axialvektor)

1⁺ Axialvektor

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

$$\hat{P} \vec{L} = \vec{L}$$

$$\hat{P}(\vec{r} \times \vec{p}) = (-\vec{r}) \times (-\vec{p}) = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{L}$$

Energie (Skalar)

0⁺ Skalar

$$\hat{P}(E) = E$$

Helizität (Pseudoskalar)

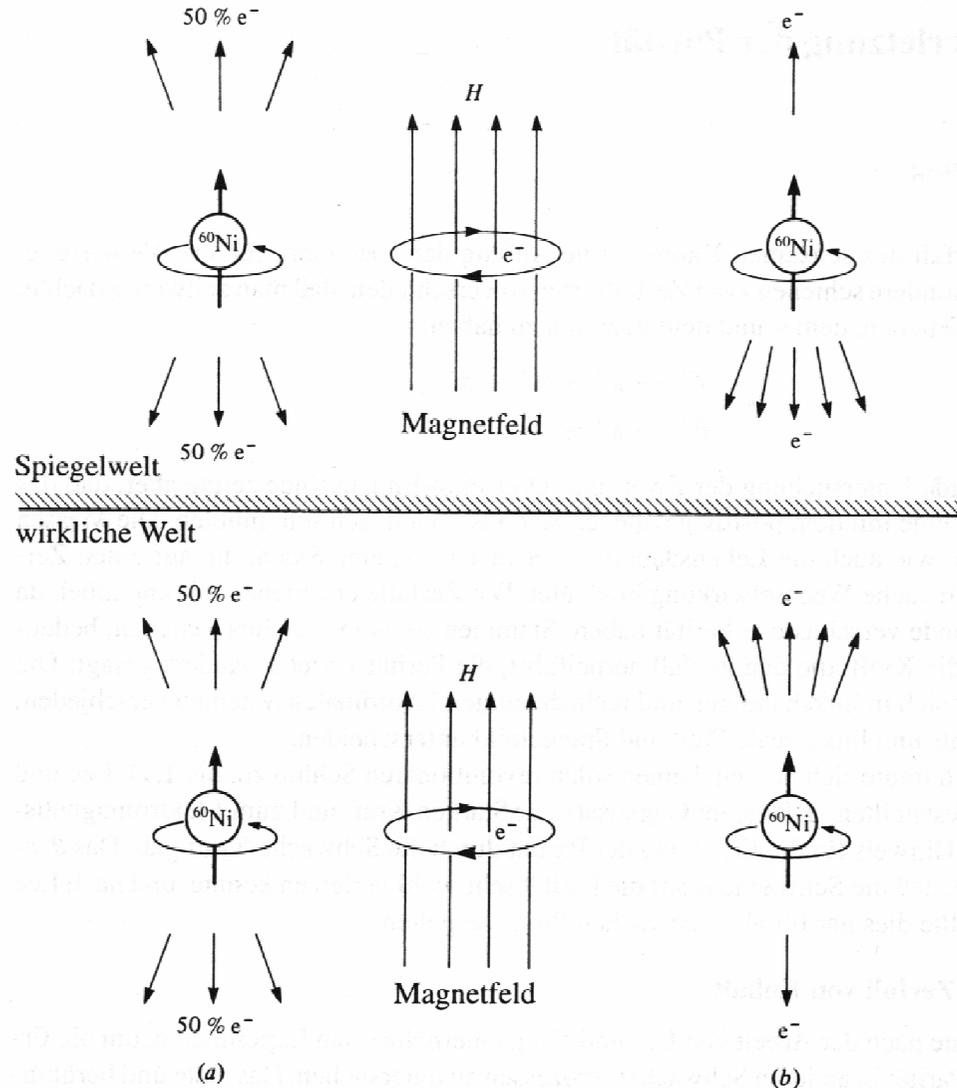
0⁻ Pseudoskalar

$$\lambda = \vec{s} \cdot \vec{p}$$

$$\hat{P}(\lambda) = P(\vec{s} \cdot \vec{p}) = P\vec{s} \cdot P\vec{p} = \vec{s} \cdot (-\vec{p})$$

$$= -\lambda$$

Paritätsverletzung im Wu-Experiment



Wu 1956:
Spin-polarisiertes



\vec{S} und \vec{H} sind Axialvektoren:
ändern sich nicht unter
Paritätsspiegelung

\vec{p} und \vec{r} sind Vektoren:
ändern ihr Vorzeichen
unter
Paritätsspiegelung

**Die Parität ist nicht erhalten in
schwacher Wechselwirkung**

„Gott ist schwach linkshändig“

Quelle: Coughlan/Dodd: Elementarteilchen

Man betrachtet dazu die Ebene, die durch die Flugrichtungen des einlaufenden Pions und des Hyperons gebildet wird. Bei erhaltener Parität müßten sich die auslaufenden Pionen je zur Hälfte ober- und unterhalb dieser Ebene befinden. In einem 1957 durchgeführten Experiment konnte aber auch hier eine Asymmetrie gemessen werden.

C- und P- Transformationen im ⁶⁰Co-Experiment

Quelle: Coughlan/Dodd: Elementarteilchen

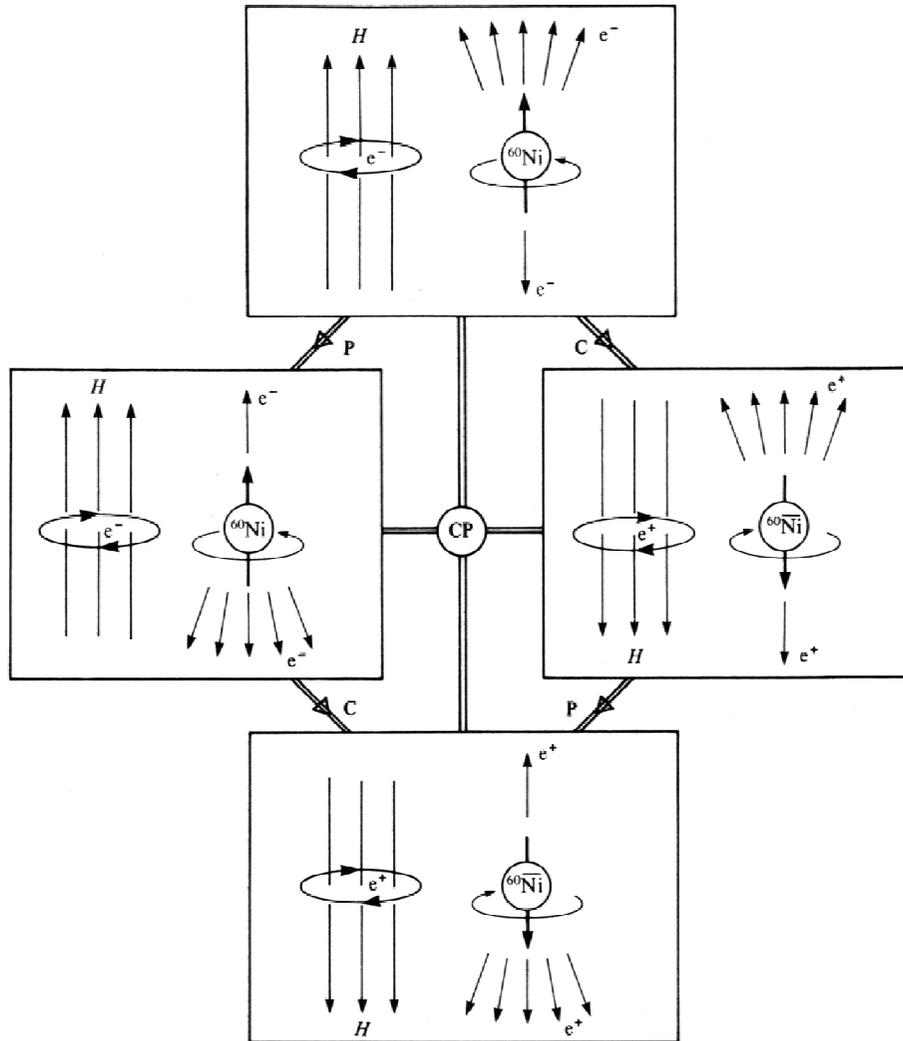


Bild 12.2 Das ⁶⁰Co-Experiment und seine C- und P-Transformationen

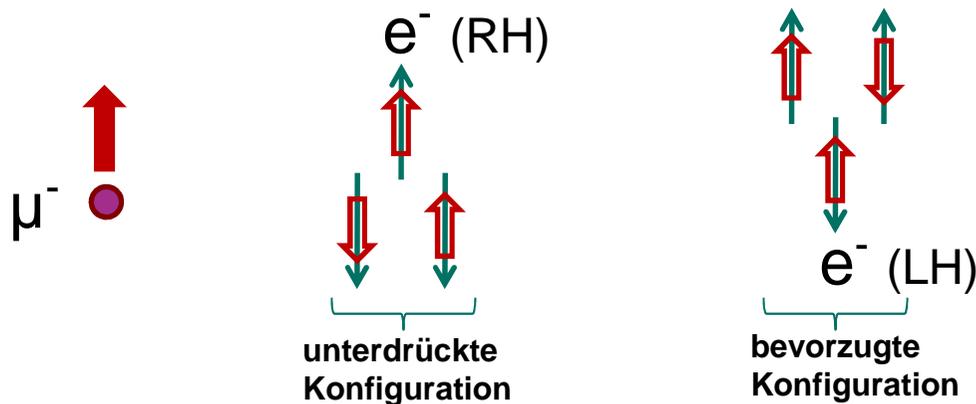
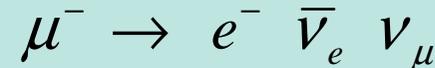
Beispiele für Paritätsverletzung

- Auch Ladungskonjugation C ist in der schwachen Wechselwirkung maximal verletzt
- Aber die Anwendung von **C und P simultan ist erhalten**:
 $C \cdot P$ (linkshändiges Fermion) \rightarrow rechtshändiges Antifermion
- bis 1964: 3‰

Weitere Beispiele für Paritätsverletzung:

1) Myonzerfall:

polarisiertes



\Rightarrow so dass Elektronen linkshändig sind

$$H(\nu) = -1$$

$$H(\bar{\nu}) = +1$$

Helizität ist für masselose Teilchen eine Erhaltungsgröße ($v=c$)

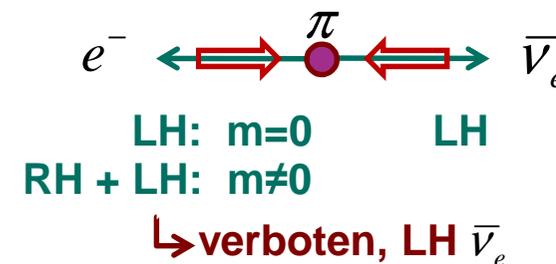
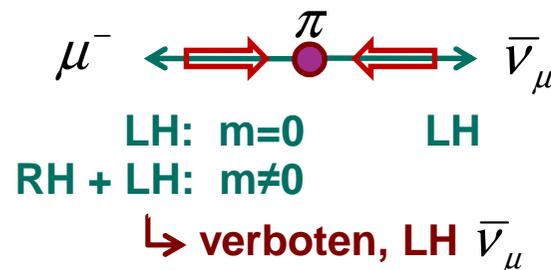
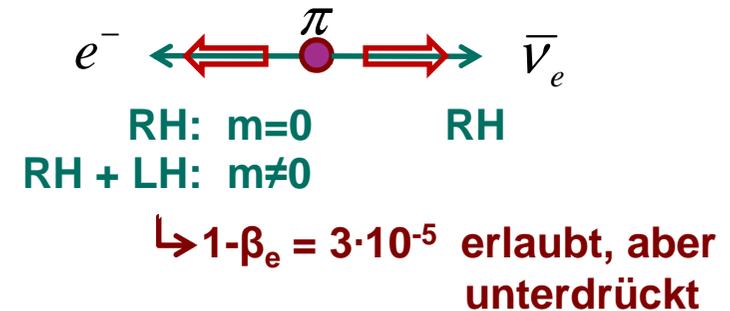
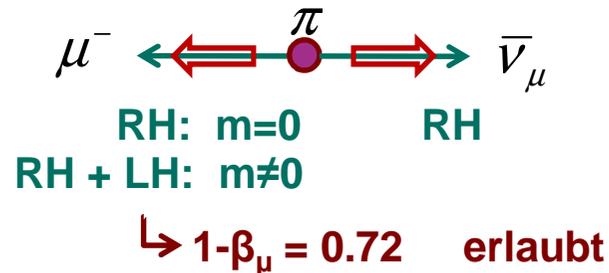
Beispiele für Paritätsverletzung

2) Pionzerfall

$$\frac{\Gamma(\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = \frac{1}{8000}$$

obwohl Phasenraum viel größer ist für $e^- \bar{\nu}_e$

CMS der Pionen
Spin 0



Helizität: für $v=0$ nicht definiert : 50 % LH, 50%RH
für $v=c$ erhalten: (es gibt keinen Lorentz-Frame, in dem das Teilchen überholt werden kann)

Wahrscheinlichkeit für Helizitätserhaltung: $\propto \frac{v}{c}$ ($\propto \beta$)

Struktur des schwachen Wechselwirkungsop's

Beispiel: β -Zerfall

$$M = G_F (\bar{\psi}_p \Gamma \psi_n) (\bar{\psi}_e \Gamma \psi_\nu)$$

- Operatoren Γ :
 - Zahlen (Skalare)
 - Pseudoskalare
 - Vektoren
 - Axialvektoren
 - Tensoren

- 1956 Gell-Mann, Feynman:

$$\Gamma = V - A$$

Vektor - Axialvektor

$$(P = -1) - (P = +1)$$

V – A projiziert gerade die linkshändige Komponente aus einer Wellenfunktion

CPT - Theorem

- Die **physikalischen Größen** sind **invariant unter C·P·T-Transformation**

- **Vorraussetzungen:**

- Lorentz-Invarianz
 - Lokalität
 - Quantenmechanik
- } **lokale, relativistische
Quantenfeldtheorie**
- Wahrscheinlichkeitserhaltung
 - es gibt einen Zustand niedrigster Energie
 - endliche Zahl elementarer Teilchen

→ **enthalten keine Parameter. Kleine Abweichungen sind deshalb nicht möglich.**

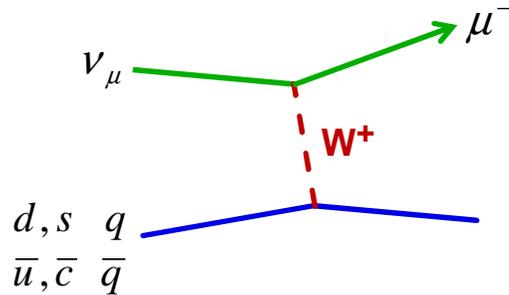
- **Konsequenzen:**

- Masse von Teilchen und Antiteilchen sind gleich
- Lebensdauer von Teilchen und Antiteilchen sind gleich
- Betrag des magn. Moments von Teilchen und Antiteilchen sind gleich

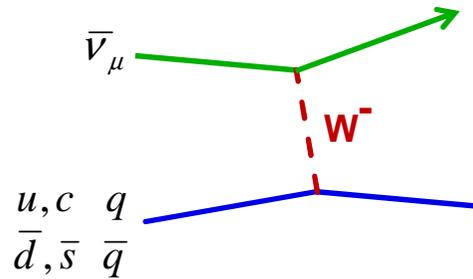
Übersicht Erhaltungssätze / Wechselwirkungen

Operation	starke WW	elektromagn. WW	schwache WW
P	x	x	maximal verletzt
C	x	x	maximal verletzt
CP	x	x	10^{-3} verletzt in wenigen Systemen
T	x	x	10^{-3} verletzt in wenigen Systemen
CPT	x	x	x

Tief inelastische Neutrino-Streuung



q muss negativ und LH sein
 \bar{q} muss positiv und RH sein



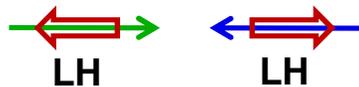
q muss positiv und LH sein
 \bar{q} muss positiv und RH sein

y = Energieübertrag
im Laborsystem

$$y = \frac{\nu}{E_\nu} = \frac{E_\nu - E'_\nu}{E_\nu}$$

$$\frac{d\sigma}{dy} \propto (1-y)^2 \quad \text{für } \bar{\nu} N$$

$$\frac{d\sigma}{dy} \propto 1 \quad \text{für } \nu N$$



vorher



$S_z = +1$



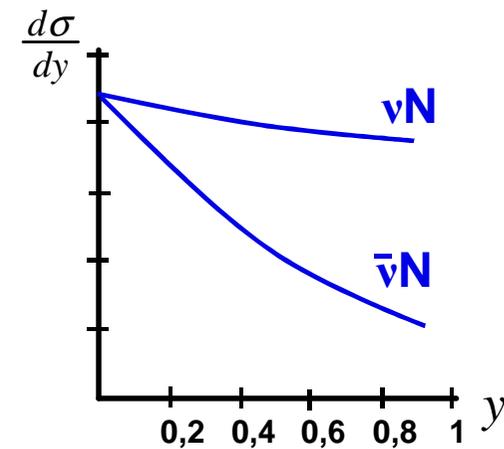
180°-
Streuung



$S_z = -1$

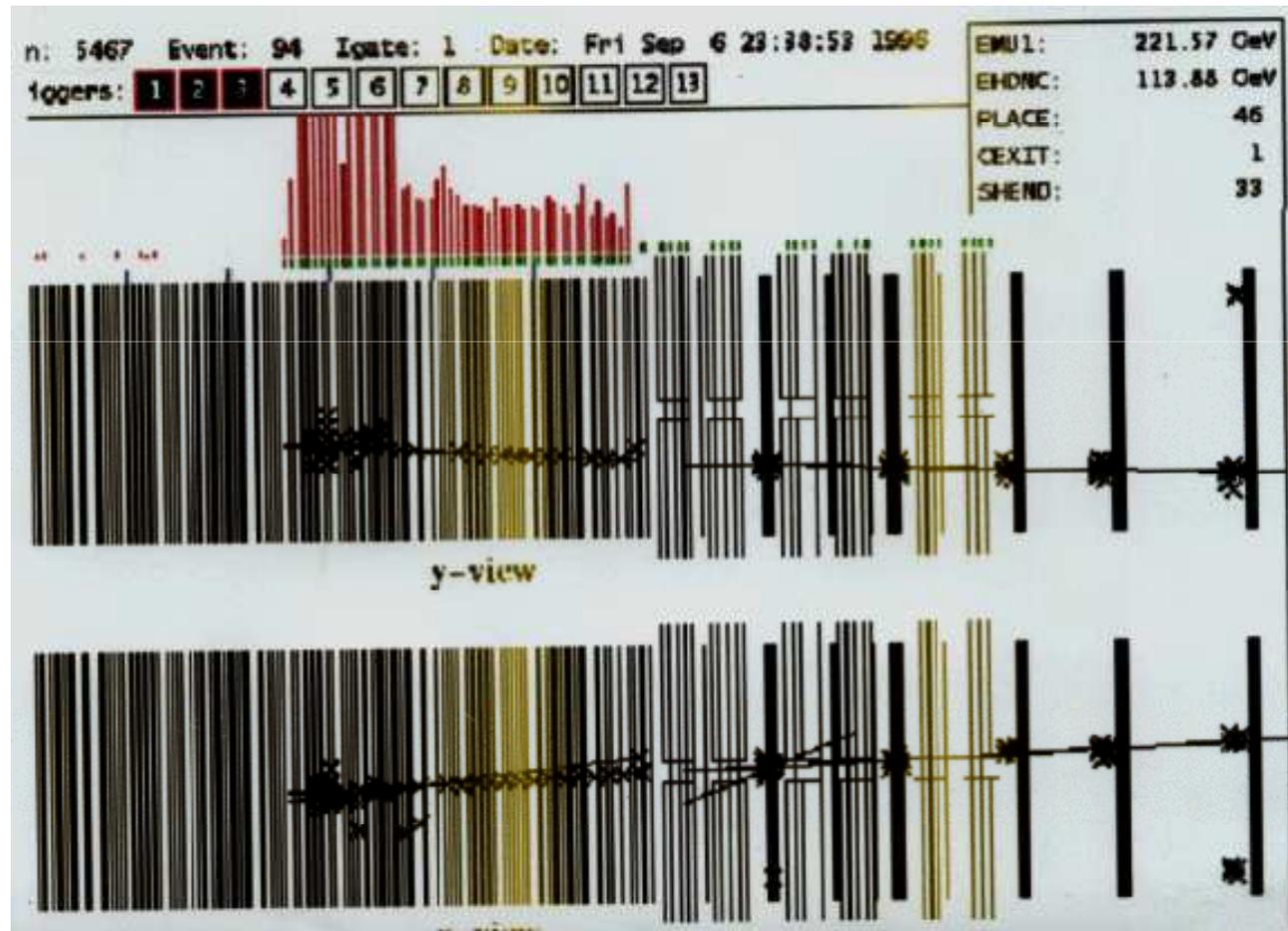
180°-Streuung
erlaubt

$\bar{\nu} N$ bei 180°-Streuung
verboten: Drehimpuls!
 $\propto (1-\cos\theta)^2$



Geladener Strom (Austauschteilchen W)

$$\nu_{\mu} N \rightarrow \mu X$$



Neutraler Strom (Austauschteilchen Z^0)

$$\nu_{\mu} N \rightarrow \nu_{\mu} X$$

