Karlsruher Institut für Technologie

Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III

Vorlesung 11

MICHAEL FEINDT
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Symmetrien

Symmetrie: Definition

Karlsruher Institut für Technologie

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 ↔ Erhaltungsgrößen

Symmetrieoperationen	unbeobachtbar	Erhaltungsgröße	
Translationen im Raum	absoluter Ort	Impuls	Klassische kontinuierliche Beispiele
Drehung im Raum	absolute Richtung	Drehimpuls	
Translation in der Zeit	absolute 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: $Q \rightarrow -Q$; $B \rightarrow -B$; $S \rightarrow -S$

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	$\rightarrow$	Spiegelbild	$\rightarrow$	Original
C:	Teilchen	$\rightarrow$	Antiteilchen	$\rightarrow$	Teilchen
T:	Zeit vorw.	$\rightarrow$	Zeit rückw.	$\rightarrow$	Zeit vorw.

$$\boxed{\begin{aligned} P(P\psi) &= \eta_P^2 \psi = \psi \\ C(C\psi) &= \eta_C^2 \psi = \psi \\ T(T\psi) &= \eta_T^2 \psi = \psi \end{aligned}}$$

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

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

Innere Parität von Teilchen:

N, p, Δ- Baryonen (per Def.) : +1
Fermionen : +1
Antifermionen : - 1

Parität von Reaktionen : **i $\rightarrow$ a + b**

$$\boxed{\Rightarrow \quad P(i) = P(a) \cdot P(b) \cdot \overbrace{(-1)^L}^{\text{Bahndrehimpuls}}}$$

Parität ist multiplikativ

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

τ – θ – Puzzle

2 Teilchen τ (→2π) und θ (→3π) (heute beides K-Mesonen) mit

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

$$
\begin{array}{llllllll}
 & K^+ \rightarrow & & \pi^+ & \pi^0 & & & \\
J^P: & 0 & & 0^- & 0^- & & & \\
L=0 & \rightarrow P & = & (-) & (-) & & \cdot\,(-1)^0 & = +1
\end{array}
$$

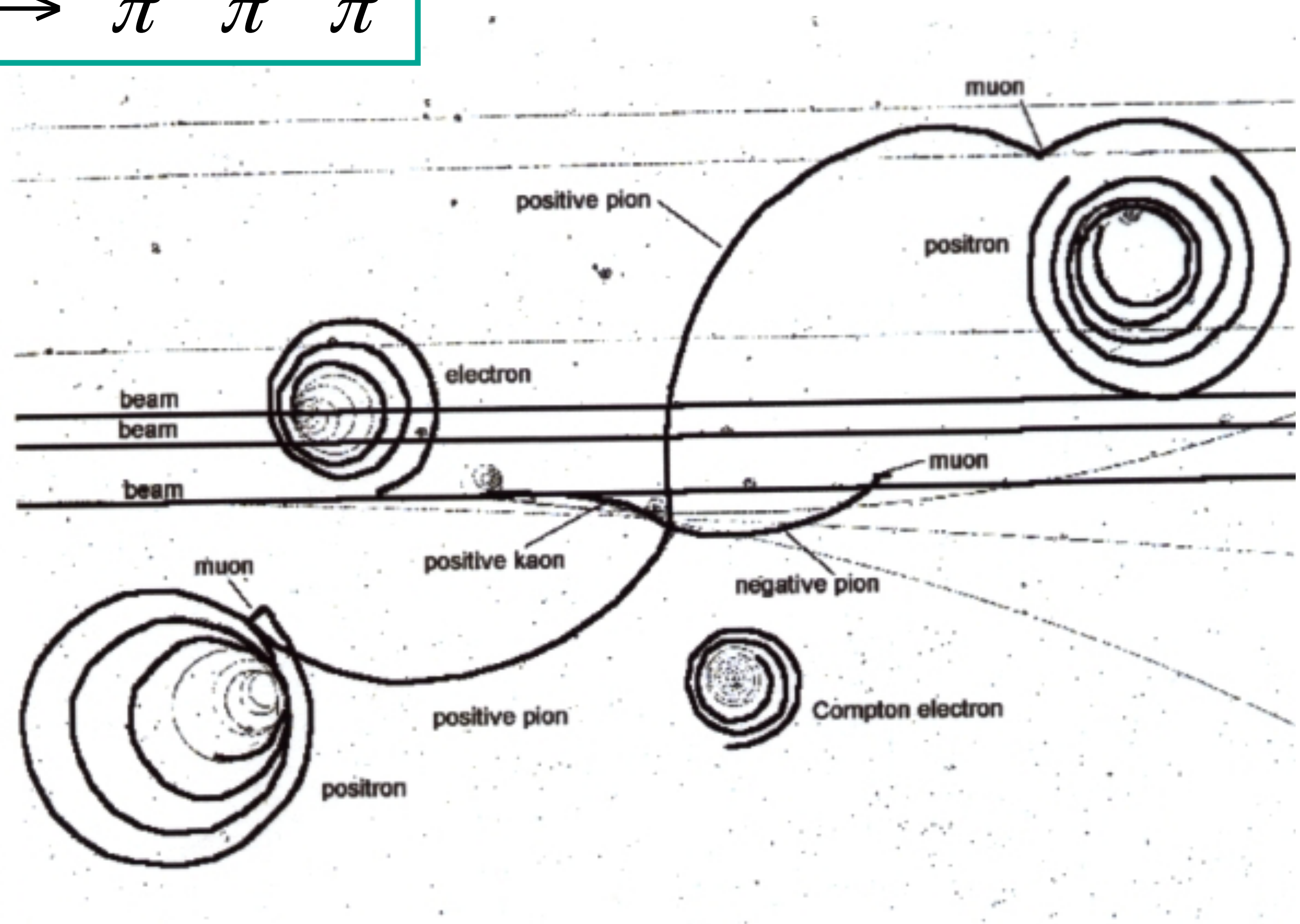
$$
\begin{array}{llllllll}
 & K^+ \rightarrow & & \pi^+ & \pi^+ & \pi^- & & \\
J^P: & 0 & & 0^- & 0^- & 0^- & & \\
L=0 & \rightarrow P & = & (-) & (-) & (-) & \cdot\,(-1)^0 & = -1
\end{array}
$$

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

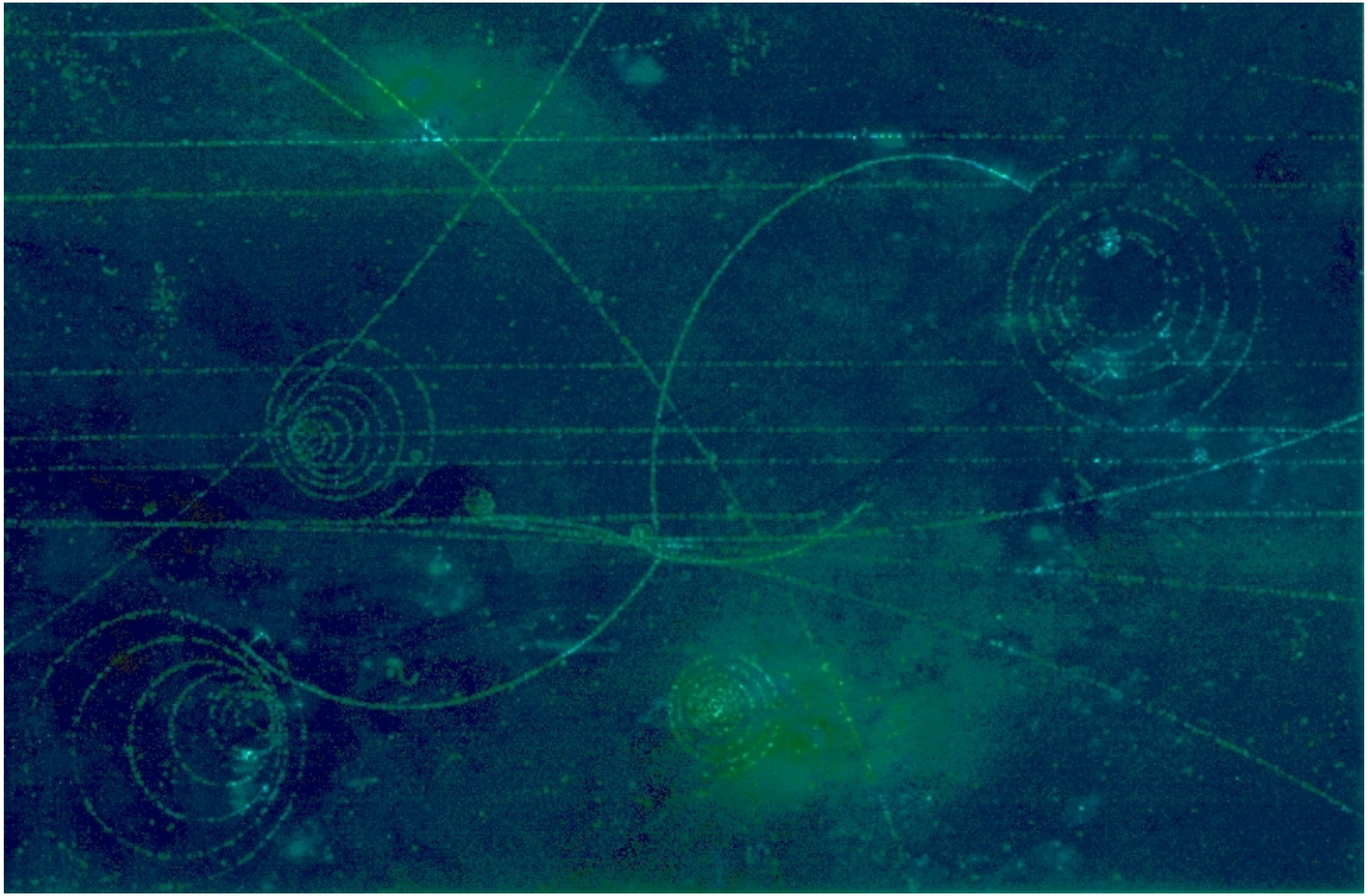
⟹ Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung

Bsp. für θ - Zerfall

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$$



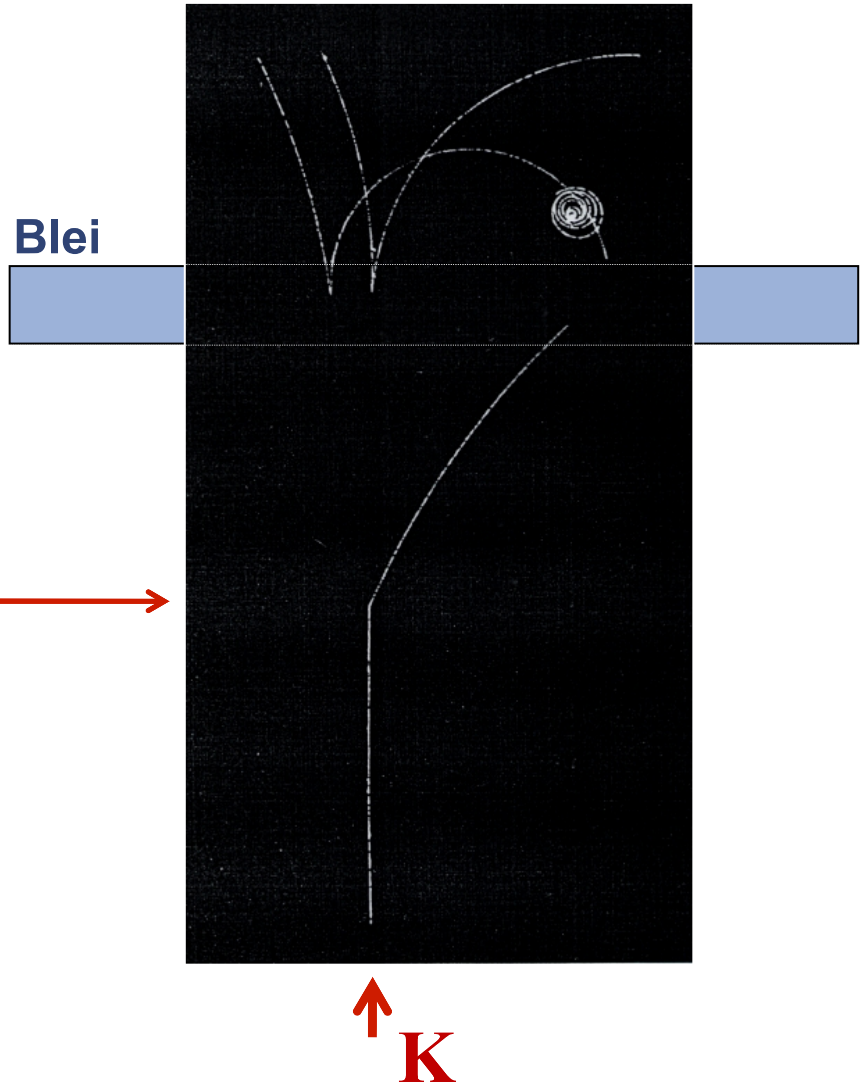
Bsp. für θ - Zerfall



Bsp. für τ - Zerfall

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

$$\gamma\,\gamma$$
$$\uparrow$$
$$K \rightarrow \pi^+ \pi^0$$



Wu-Experiment (1956)

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

  ^{60}Co ↓ **J = 5**; $^{60}Ni^{*}$ ↓ **J = 4**

  Kernspin im Magnetfeld
  bei T=10mK ausgerichtet

- erwartet bei Paritätserhaltung: Elektronrate unabhängig von Raumrichtung
- gefunden:

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

mit α =1 !

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

⇨ keine definierte Parität

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

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

Parität verschiedener Größen

Karlsruher Institut für Technologie

Impuls (Polarvektor)

1^- Vektor

$$\boxed{\begin{aligned} \hat{P}\vec{x} &= -\vec{x} \\ \hat{P}\vec{p} &= -\vec{p} \end{aligned}}$$

Drehimpuls (Axialvektor)

1^+ Axialvektor

$$\boxed{\begin{aligned} \vec{L} &= \vec{r}\times\vec{p} \\ \hat{P}\vec{L} &= \vec{L} \\ \hat{P}(\vec{r}\times\vec{p}) &= (-\vec{r})\times(-\vec{p}) = \vec{r}\times\vec{p} = \vec{L} \end{aligned}}$$

Energie (Skalar)

0^+ Skalar

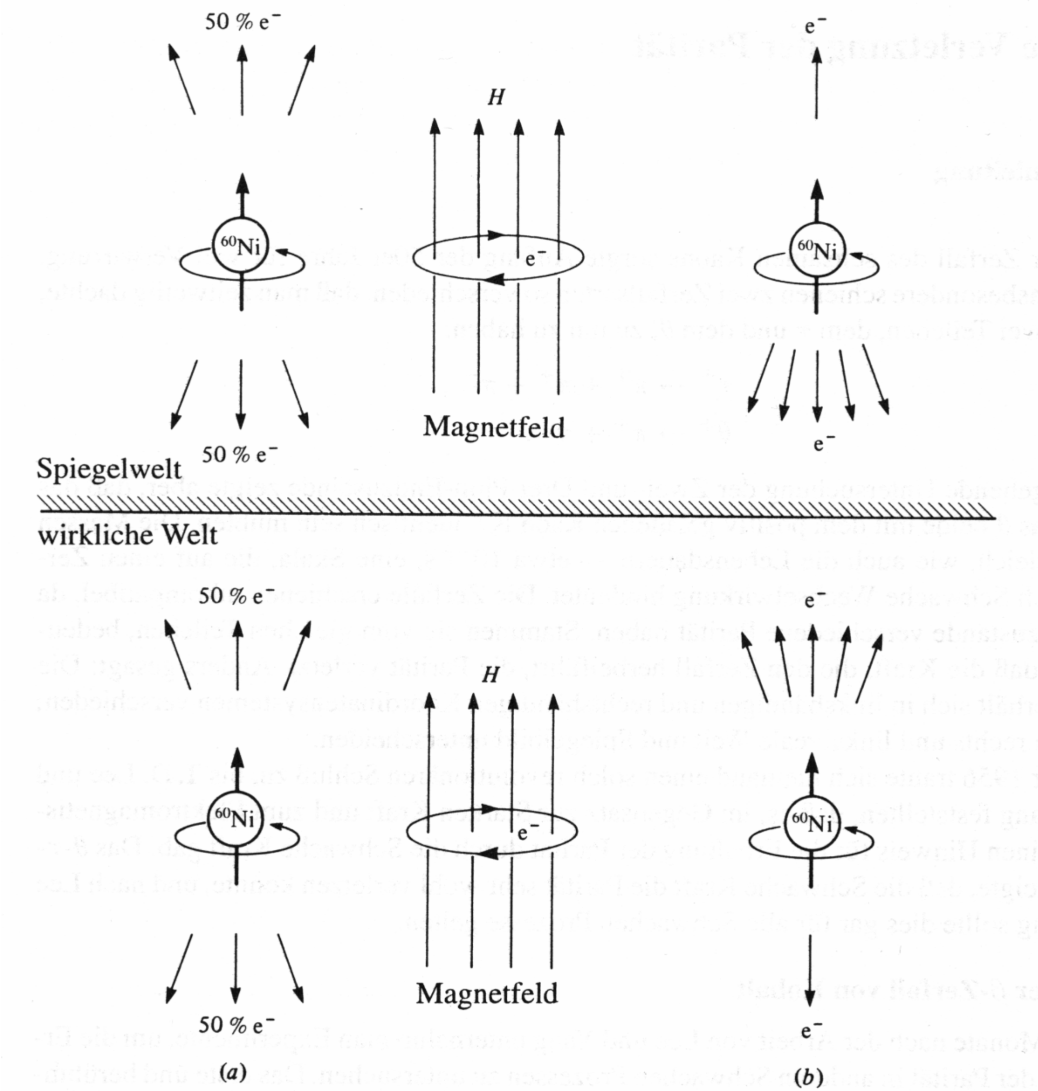
$$\boxed{\hat{P}(E) = E}$$

Helizität (Pseudoskalar)

0^- Pseudoskalar

$$\boxed{\begin{aligned} \lambda &= \vec{s}\cdot\vec{p} \\ \hat{P}(\lambda) &= P(\vec{s}\cdot\vec{p}) = P\vec{s}\cdot P\vec{p} = \vec{s}\cdot(-\vec{p}) \\ &= -\lambda \end{aligned}}$$

Paritätsverletzung im Wu-Experiment



Quelle: Coughlan/Dodd: Elementarteilchen

Wu 1956:

Spin-polarisiertes

$$^{60}Co \rightarrow {}^{60}Ni^{*}\ e^{-}\ \bar{\nu}_e$$

$\vec{S}$ *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"

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 ^{60}Co-Experiment

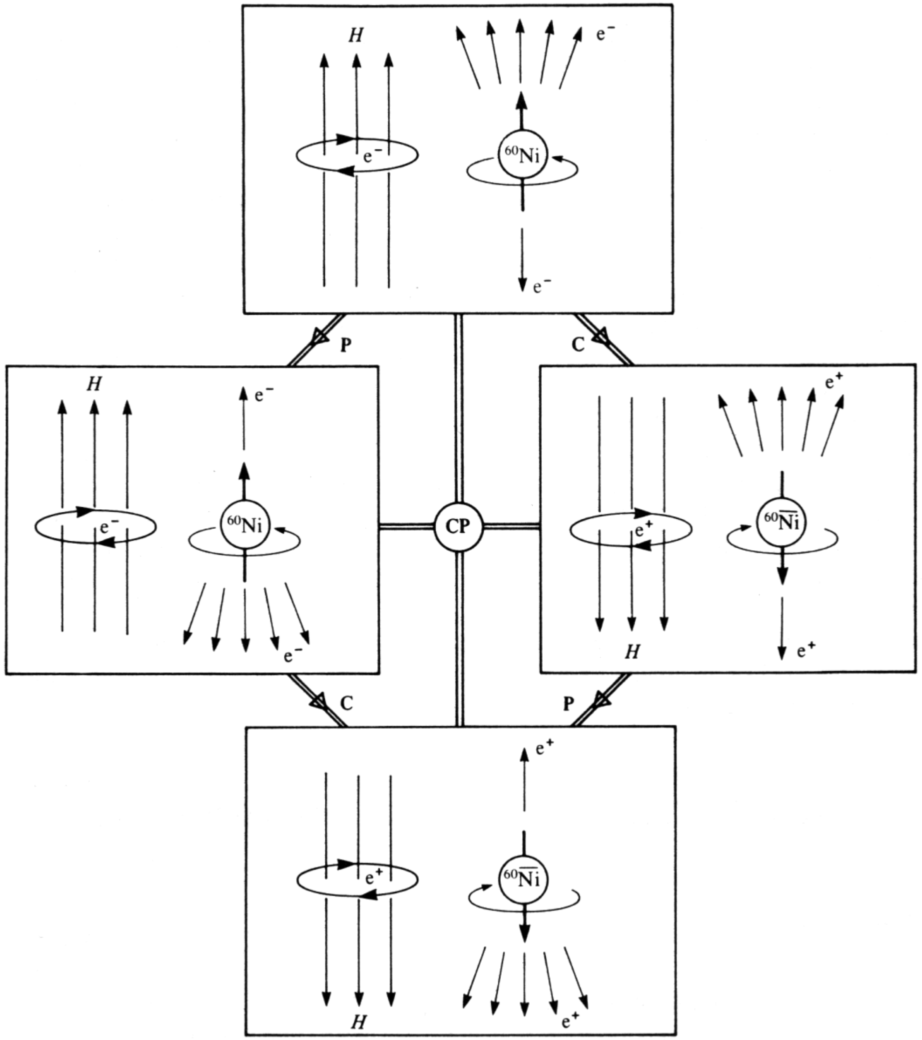


Bild 12.2 Das ^{60}Co-Experiment und seine $\mathcal{C}$- und $\mathcal{P}$-Transformationen

Quelle: Coughlan/Dodd: Elementarteilchen

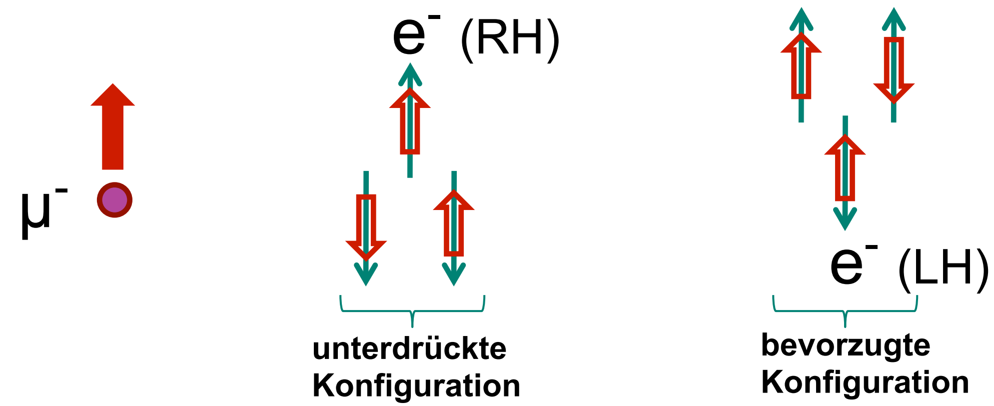
Beispiele für Paritätsverletzung

- Auch Ladungskonjugation C ist in der schwachen Wechselwirkung maximal verletzt
- Aber die Anwendung von C und P simultan ist erhalten:

  C • P (linkshändiges Fermion) → rechtshändiges Antifermion
- bis 1964: 3‰

Weitere Beispiele für Paritätsverletzung:

1) Myonzerfall: polarisiertes $\mu^- \rightarrow e^- \; \bar{\nu}_e \; \nu_\mu$



⇒ **so dass Elektronen linkshändig sind**

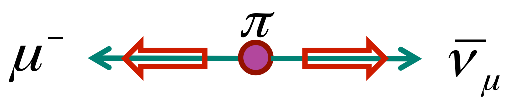
$$H(\nu) = -1$$
$$H(\bar{\nu}) = +1$$

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

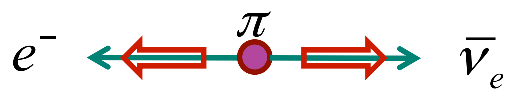
Beispiele für Paritätsverletzung

2) Pionzerfall $\dfrac{\Gamma(\pi^- \to e^- \bar{\nu}_e)}{\Gamma(\pi^- \to \mu^- \bar{\nu}_\mu)} = \dfrac{1}{8000}$ obwohl Phasenraum viel größer ist für $e^- \bar{\nu}_e$

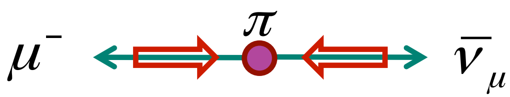
CMS der Pionen
Spin 0



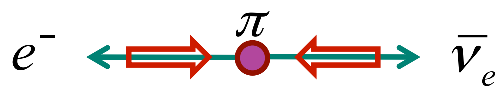
RH: m=0 **RH**
RH + LH: m≠0
↳ 1-β_μ = 0.72 erlaubt



RH: m=0 **RH**
RH + LH: m≠0
↳ 1-β_e = 3·10^{-5} erlaubt, aber unterdrückt



LH: m=0 **LH**
RH + LH: m≠0
↳ verboten, LH $\bar{\nu}_\mu$



LH: m=0 **LH**
RH + LH: m≠0
↳ verboten, LH $\bar{\nu}_e$

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: $\boxed{\propto \dfrac{\mathrm{v}}{\mathrm{c}} \qquad (\propto \beta)}$

Struktur des schwachen Wechselwirkungsop's

Beispiel: β-Zerfall

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

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

- 1956 Gell-Mann, Feynman:

$$\boxed{\begin{array}{lll} \Gamma = & V & - \; A \\ & Vektor & - \; Axialvektor \\ & (P=-1) & - \; (P=+1) \end{array}}$$

V – A projiziert gerade die linkshändige Komponente aus einer Wellenfunktion

CPT - Theorem

Karlsruher Institut für Technologie

- 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.**

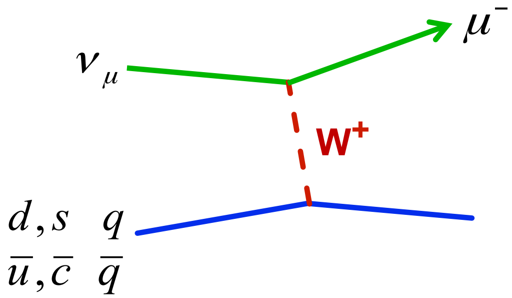
- **Konsequenzen:**

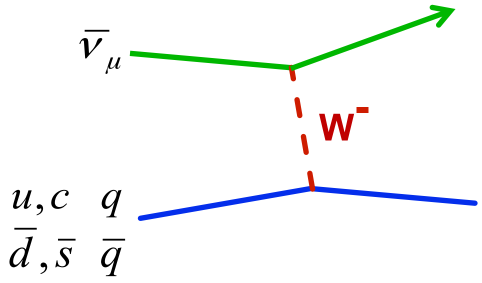
  - Masse von Teilchen und Antiteilchen sind gleich
  - Lebensdauer von Teilchen und Antiteilchen sind gleich
  - Betrag des magn. Moments von Teilchen und Antiteilchen sind gleich

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 Neutrinostreuung





q muss negativ und LH sein

$\bar{q}$ muss negativ und RH sein

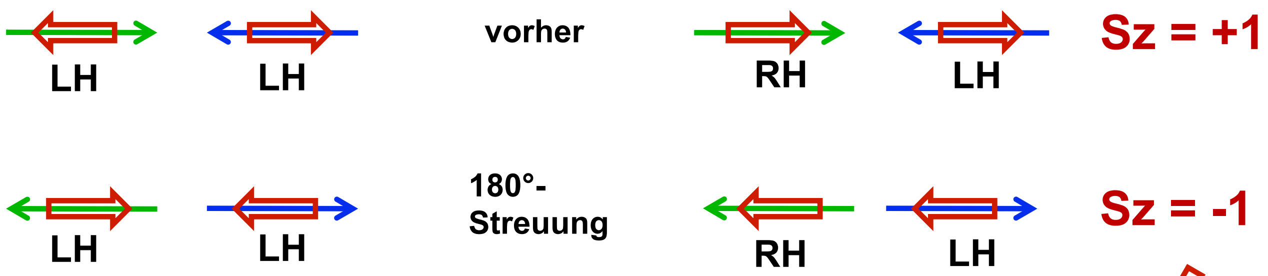
q muss positiv und LH sein

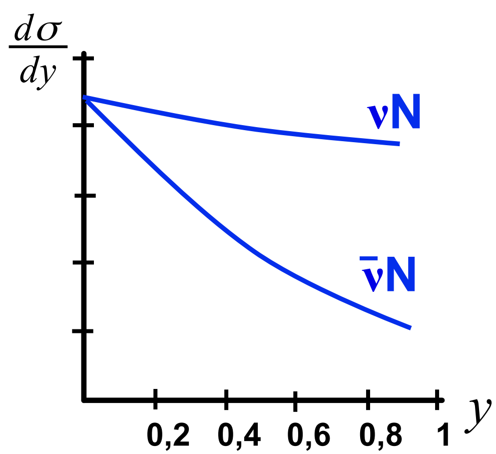
$\bar{q}$ muss positiv und RH sein

y = Energieübertrag im Laborsystem

$$y = \frac{\nu}{E_\nu} = \frac{E_\nu - E_\nu^{'}}{E_\nu}$$

$$\boxed{\begin{array}{ll} \frac{d\sigma}{dy} \propto (1-y)^2 & \text{für } \bar{\nu}\, N \\ \frac{d\sigma}{dy} \propto 1 & \text{für } \nu\, N \end{array}}$$



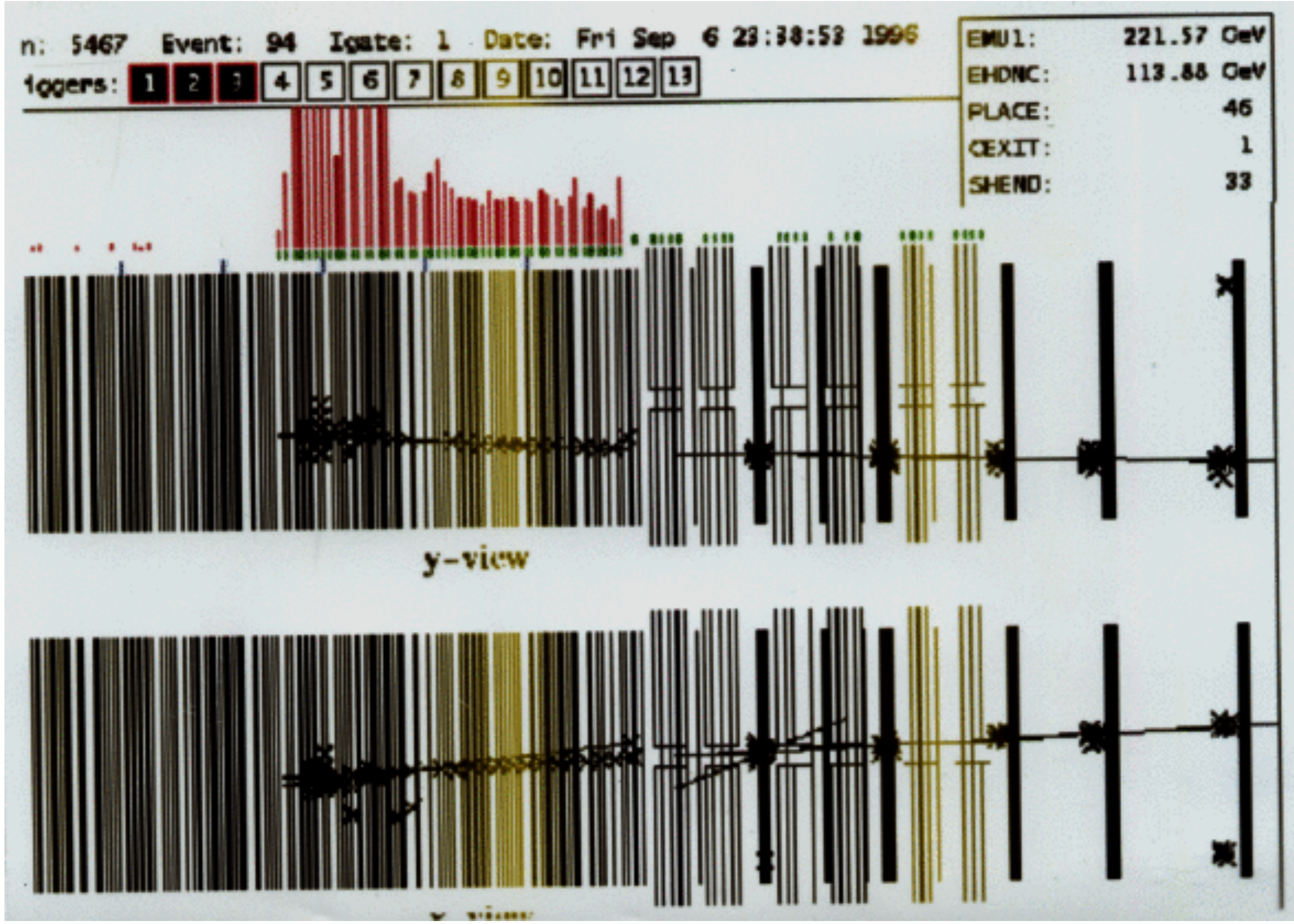


180°-Streuung erlaubt

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

Geladener Strom (Austauschteilchen W)

$$\nu_\mu N \rightarrow \mu X$$



Neutraler Strom (Austauschteilchen Z^0)

$\nu_\mu N \rightarrow \nu_\mu X$