

Moderne Experimentalphysik III: Teilchenphysik

Sommersemester 2018

Thomas Müller, Roger Wolf

17. Mai 2018 – VL 8

Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



3. Symmetrien und Erhaltungssätze

3.1 Allgemeines

3.2 Der Betazerfall und die Energieerhaltung

3.3 P, C, T Symmetrie

1. Raumspiegelung; Parität

2. Ladungskonjugation; C-Parität

3. Zeitumkehr; t-Parität

4. CP-Symmetrie

5. CPT-Symmetrie

3.4 Zusammenfassung: Erhaltungsgrößen

3.1 Allgemeines



Emmy Noether

Noether-Theorem (1918): Symmetrien \leftrightarrow Erhaltungsgrößen

- Klassische, kontinuierliche Symmetrien:
Verbindung der Eigenschaften von Raum & Zeit mit Größen p , J , E
- Quantenmechanische, diskrete Symmetrien: P , C , T

Symmetrieoperation	Erhaltungsgröße	
Translation im Raum	Impuls p	Kontinuierliche Transformationen
Drehung im Raum	Drehimpuls J	
Translation in der Zeit	Energie E	
Eichtransformation (QM)	elektrische Ladung Q	
Raumspiegelung	Parität P	Diskrete Transformationen
Materie - Antimaterie	Ladungspartit C	
Zeitumkehr	Zeitparität T	

3.2 Der β -Zerfall und die Energieerhaltung

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930
Gloriastrasse

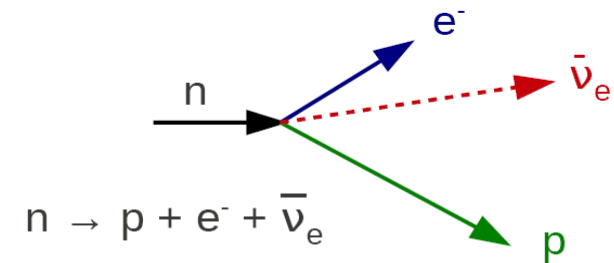
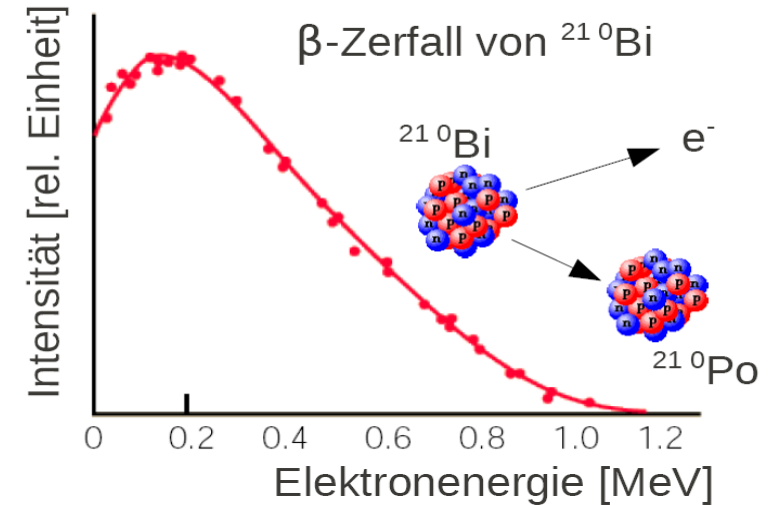
Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N - und $L\beta$ -Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

....

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewagt und der Ernst der Situation beim kontinuierliche beta-Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt, Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat: "O, daran soll man am besten gar nicht danken, sowie an die neuen Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren. Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richttet.- Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Des. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin.- Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Back, Euer untertänigster Diener

gen. W. Pauli

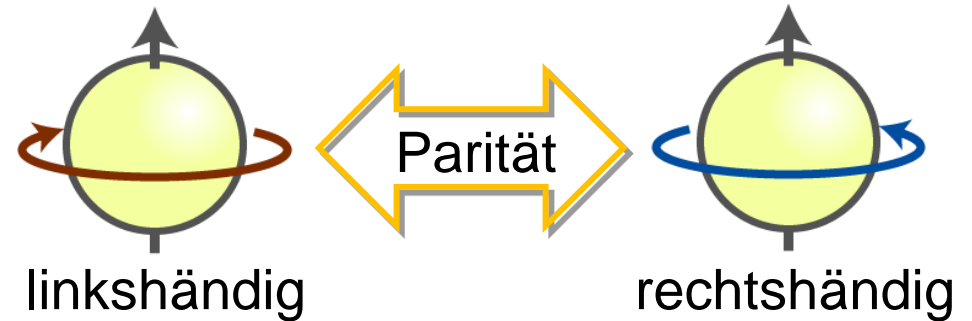


B:	1	1	0	0
L:	0	0	1	-1
J:	$1/2$	$1/2$	$1/2$	$1/2$

3.3 P, C, T - Symmetrie

Parität P

- Paritätsoperator P erzeugt eine räumliche Spiegelung am Ursprung
- Unterscheidung der **Händigkeit**



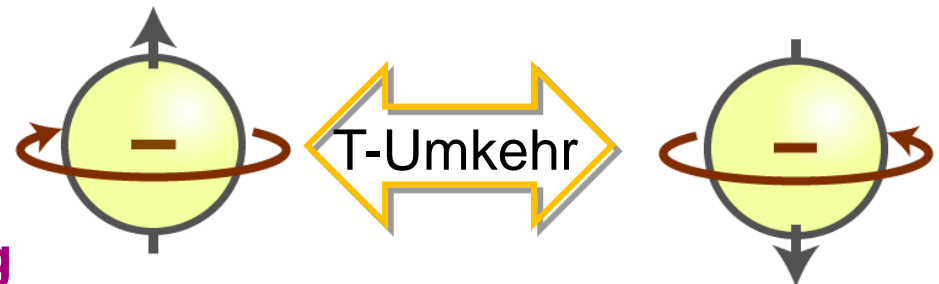
Ladungskonjugation C

- Ladungskonjugationsoperator C : Umwandlung Teilchen-Antiteilchen
- $+q \leftrightarrow -q$ **ladungsartige Parameter**



Zeitumkehr T

- Zeitumkehroperator T erzeugt eine Zeitspiegelung $t \leftrightarrow -t$
- Umdrehen der **Bewegungsrichtung**

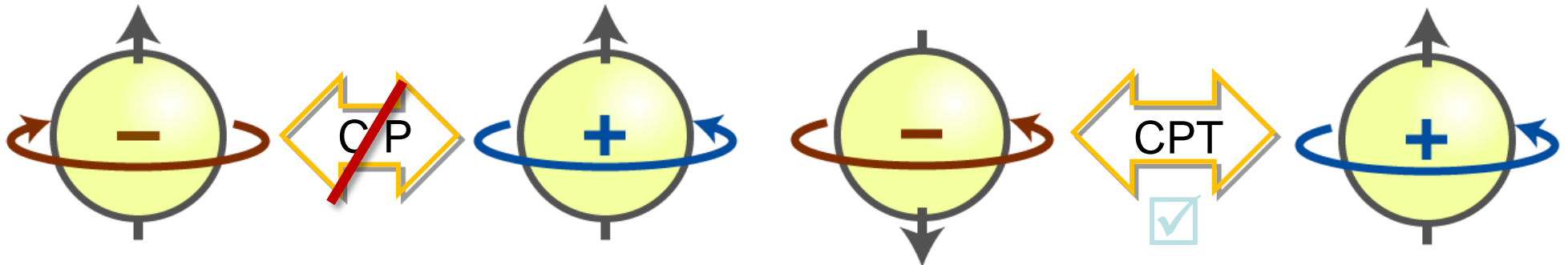


■ Parität P, Ladungskonjugation C und Zeitumkehr T:

- P, C, T sind **diskrete Symmetrien**
- Eigenzustände Ψ der P, C, T – Operatoren besitzen Eigenwerte +1, -1 da zweifache Anwendung den Ausgangszustand wieder herstellt
Parität : $P^2 \Psi = \Psi$
- **P, C werden durch die schwache Wechselwirkung maximal verletzt !**

■ Kombination der diskreten Symmetrien: CP, CPT

- CP und T werden in bestimmten Systemen (K^0 , B^0) verletzt ($\sim 10^{-3}$) !
- CPT – Theorem: **die physikalischen Gesetze sind invariant unter CPT Transformationen** (in lokalen relativistischen Quantenfeldtheorien)
Konsequenz: identische Massen, Lebensdauern von Teilchen/Antiteilchen



1. Raumspiegelung; Parität P

■ Parität P entspricht einer Rauminversion

- geändertes Vorzeichen eines **polaren Vektors**

Beispiele: Ort r , Impuls p , elektrisches Feld E , Kraft F

$$r \xrightarrow{P} -\vec{r} \quad \vec{p} \xrightarrow{P} -\vec{p}$$

$$P = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

rechtshändiges KS
→ linkshändiges KS

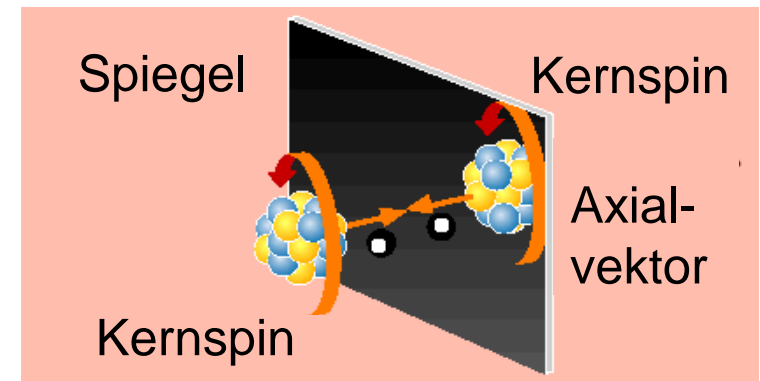
- **axialer Vektor:**

nicht geändertes Vorzeichen des (Pseudo-) Vektors nach Paritätsoperation

- Drehimpulse: Spin S , Orbital L

- Magnetfeld B

$$\vec{J} \xrightarrow{P} \vec{J}$$



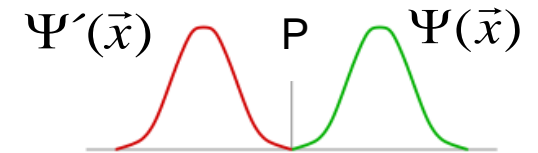
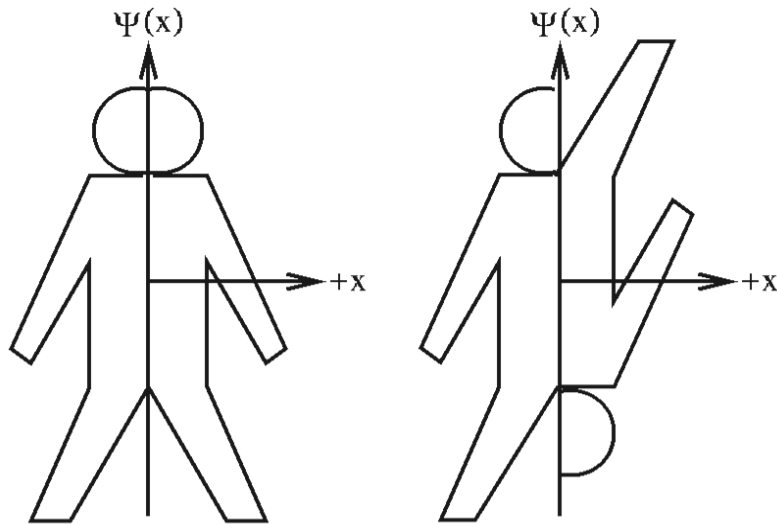
Quantity	Parity Behavior	Why?	Type of Quantity
Position	$IP\vec{r}=-\vec{r}$	definition	vector
Velocity	$IP\vec{v}=-\vec{v}$	$\vec{v}=\text{d}\vec{v}/\text{d}t$	vector
Momentum	$IP\vec{p}=-\vec{p}$	$\vec{p}=m\vec{v}$	vector
Orbital Angular Momentum	$IP\vec{L}=+\vec{L}$	$\vec{L}=\vec{r} \times \vec{p}$	pseudo vector
Spin A. M.	$IP\vec{S}=+\vec{S}$		pseudo vector
Total A. M.	$IP\vec{J}=+\vec{J}$		pseudo vector
Electric Current	$IP\vec{j}=-\vec{j}$	$\vec{j}=\rho\vec{v}$	vector
Electric Field	$IP\vec{E}=-\vec{E}$	$\vec{E}=(q/r^2)\hat{r}$	vector
Magnetic Field	$IP\vec{B}=+\vec{B}$	$\vec{B}=\int(\vec{j} \times \vec{r})/r^2\text{d}V$	pseudo vector
Vector Potential	$IP\vec{A}=-\vec{A}$	$\vec{A}=\int(\vec{j}/r)\text{d}V$	vector
Lorentz Force	$IP\vec{F}=-\vec{F}$	$\vec{F}=q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$	vector
Energy	$IP E=+E$		scalar
Helicity	$IP H=-H$	$H=(\vec{L} \cdot \vec{p})/(\vec{L} \vec{p})$	pseudo scalar

■ Eigenfunktionen mit positiver und negativer Parität

- Operator P und Eigenfunktionen Ψ mit positiver und negativer Parität:

$$P \Psi(\vec{x}, t) = \Psi(-\vec{x}, t) = \Psi'(\vec{x}, t)$$

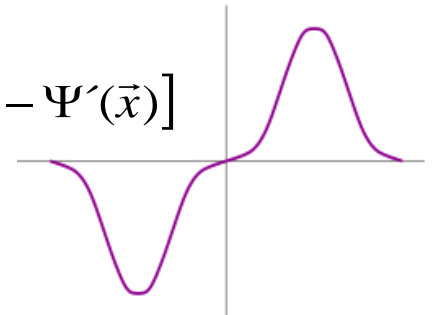
$$\Psi_{\pm}(\vec{x}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [\Psi(\vec{x}) \pm \Psi'(\vec{x})]$$



$$\Psi_{+}(\vec{x}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [\Psi(\vec{x}) + \Psi'(\vec{x})]$$



$$\Psi_{-}(\vec{x}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot [\Psi(\vec{x}) - \Psi'(\vec{x})]$$



Erhaltung der Parität

■ Parität P ist eine multiplikative Erhaltungsgröße

Gesamtparität eines Systems aus 2 wechselwirkenden Teilchen $a + b \rightarrow c + d$:

$$P_a \cdot P_b \cdot (-1)^\ell = P_c \cdot P_d \cdot (-1)^{\ell'} \quad \ell, \ell' : \text{relative Bahndrehimpulse}$$

- Kugelflächenfunktion $Y_{lm}(\pi - \Theta, \Phi + \pi) = (-1)^\ell \cdot Y_{lm}(\Theta, \Phi)$

■ Eigenparität P ist eine charakteristische Größe

- **Fermionen**: Teilchen & Antiteilchen (e^+ , e^-) haben **entgegengesetzte Parität**
- **Bosonen**: Teilchen & Antiteilchen (π^+ und π^- : $J^P = 1^-$) mit **gleicher Parität**

■ Definition der Eigenparität P

- **Quarks**: $\mathbf{P(q)} \equiv +1$, \Downarrow : $P(\bar{q}) \equiv -1$
- **Nukleonen**: $P(p) = +1$, $P(n) = +1$, $P(\Lambda) = +1$
- **Mesonen**: $P(q\bar{q}) = (-1)^{\ell+1}$
 - 1S_0 -Mesonen (π , η , K) : pseudoskalar mit $J^P = 0^-$
 - 3S_1 -Mesonen (ρ , ω , ϕ) : vektoriell mit $J^P = 1^-$

Verletzung der Paritätserhaltung

- 1956: T.D. Lee & C.N. Yang schlagen experimentelle Tests vor, ob die **Parität P durch die schwache Wechselwirkung verletzt wird**

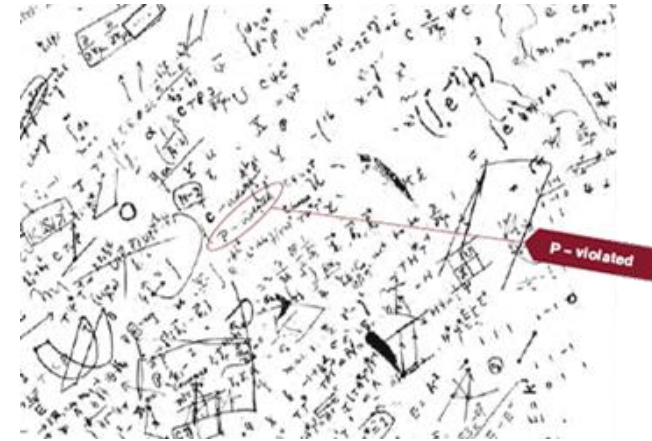
"In strong interactions, ... there were indeed many experiments that established parity conservation to a high degree of accuracy..."

"to decide unequivocally whether parity is conserved in weak interactions, one must perform an experiment to determine whether weak interactions differentiate the right from the left"

Question of Parity Conservation in Weak Interactions

T. D. Lee and C. N. Yang, Phys. Rev. 104 (1956) 254

"for their penetrating investigation of the so-called parity laws which has led to important discoveries regarding the elementary particles"



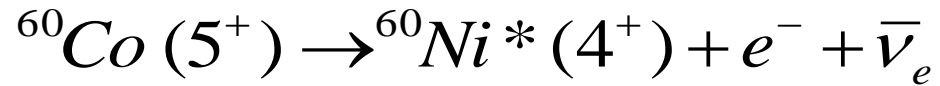
Nobelpreis
1957



Tsung-Dao Lee Chen Ning Yang

Wu-Experiment & Paritätsverletzung

- C.S. Wu et al. untersuchen den Kern- β -Zerfall von ^{60}Co zum Test der Erhaltung der **Parität in der schwachen Wechselwirkung**
Fragestellung: gibt es eine Vorzugsrichtung der beim β -Zerfall emittierten Elektronen relativ zum Spin des ^{60}Co Kerns?
ja: Parität ist verletzt, **nein**: Parität ist erhalten

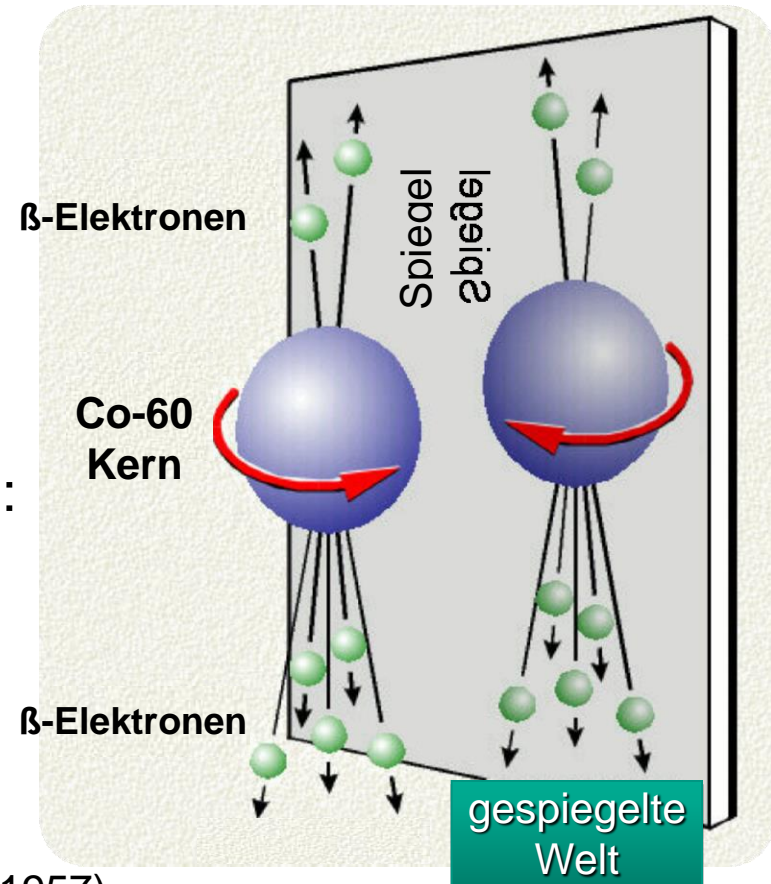


Chien-Shiung Wu 吴健雄
(1912-1997)

- Techn. Herausforderung:
Ausrichtung der ^{60}Co -Kerne bei sehr tiefen Temperaturen:
Prinzip der „adiabatischen Entmagnetisierung“

Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay

C. S. Wu et al., Phys. Rev. 105 (1957)

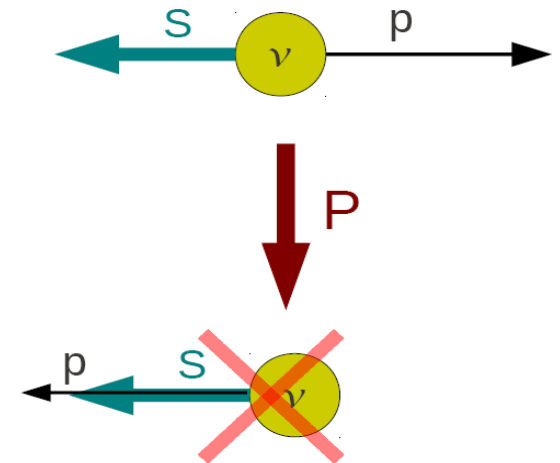
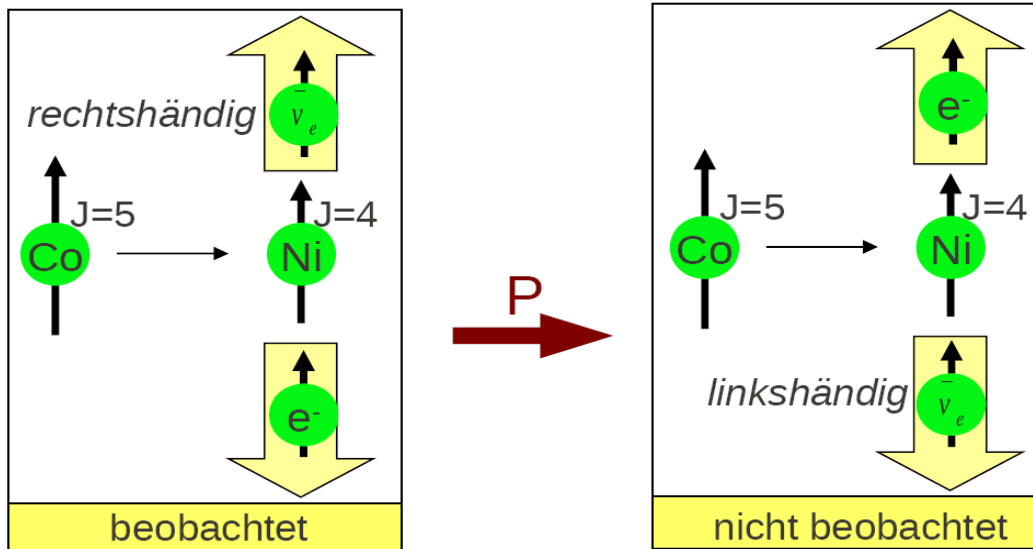


Paritätserhaltung in Prozessen

Parität erhalten in Prozessen der starken und der elektromagnetischen Wechselwirkung (WW)

Aber: Parität verletzt in Prozessen der schwachen Wechselwirkung

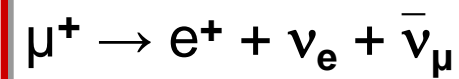
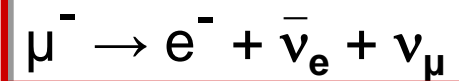
1956: Experiment von C.S. Wu et al. → Parität maximal verletzt in β -Zerfall



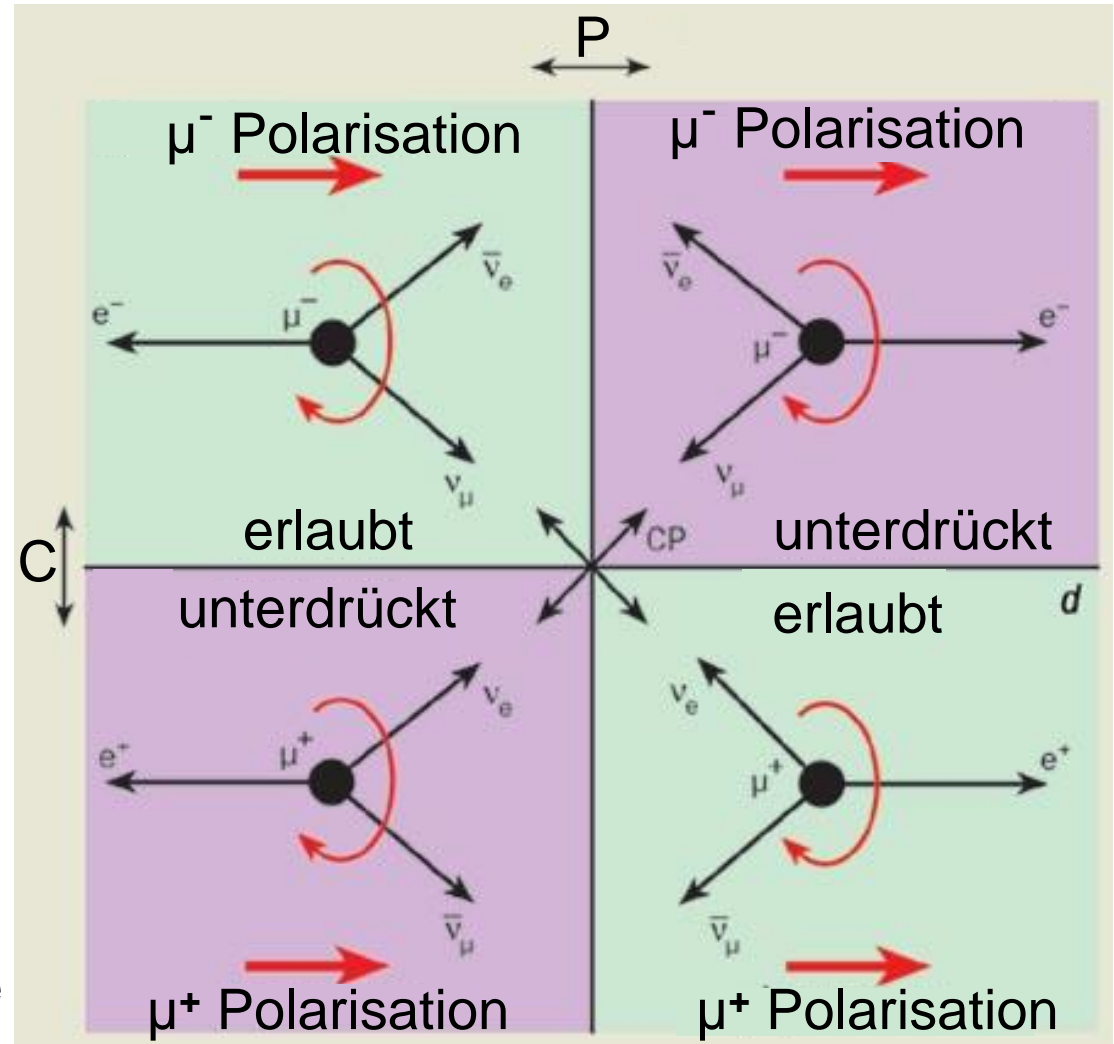
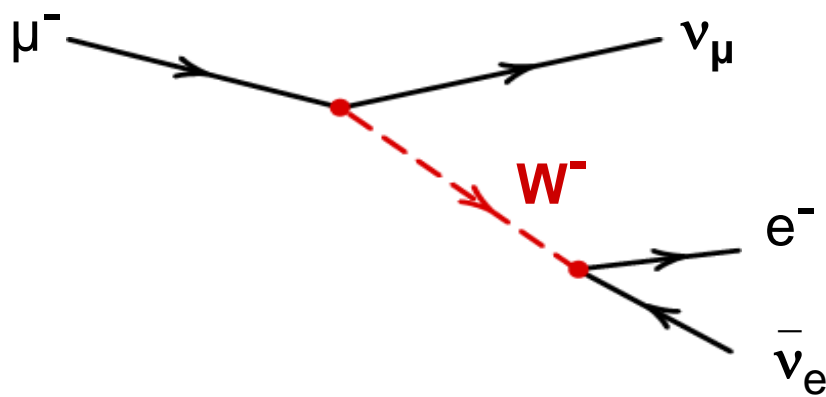
Beispiel Myonzerfall

- Myonzerfall & Symmetrie-Transformationen P, C und PC:

β -Zerfall des Myons



$\tau = 2.2 \mu\text{s}$



Beispiel Pionzerfall in Myon und Neutrino

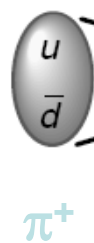
- beim **Pionzerfall** über die schwache Wechselwirkung wird ebenfalls eine **maximale Verletzung der Parität P** beobachtet:

Anfangszustand des π^+ :

Impuls $\vec{p} = 0$, Drehimpuls $\vec{J} = 0$

Spins der Leptonen antiparallel

$M = 139.6 \text{ MeV}$

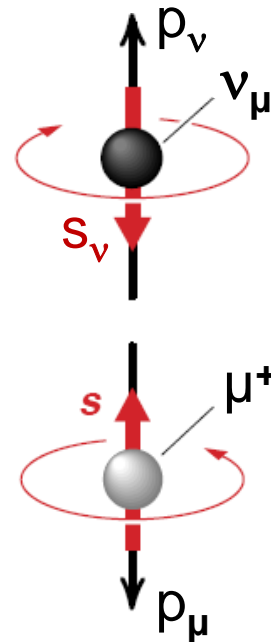


W^+

$M \sim 0$

ν_μ
 μ^+

$M \sim 105.6 \text{ MeV}$



$$J_z = S_z = -\frac{1}{2}$$

'masseloses' ν
mit LH Helizität
 $p_\nu = E_\nu = 29.8 \text{ MeV}$

$$J_z = S_z = +\frac{1}{2}$$

massebehaftetes μ^+
mit LH Helizität
 $p_\mu = 29.8 \text{ MeV}$ $E_\mu = 4 \text{ MeV}$

- das **Myon aus dem Pionzerfall muss mit 'falschen' Helizität erzeugt werden**

das nicht-relativistische Myon besitzt einen

großen Anteil der 'falschen' Helizität: $P(\mu\text{-Kanal}) \sim (1 - \beta_\mu) = 0.72$

Beispiel Pionzerfall in Elektron & Neutrino

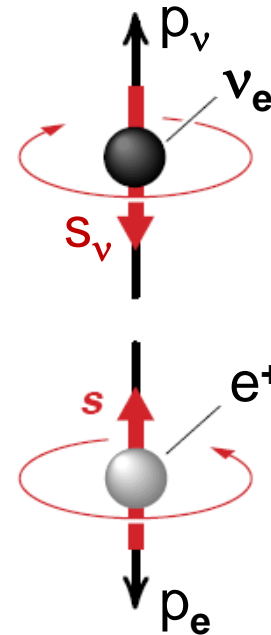
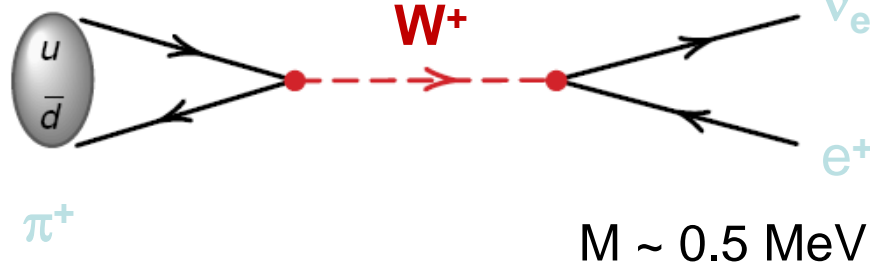
- beim **Pionzerfall** über die schwache Wechselwirkung wird ebenfalls eine **maximale Verletzung der Parität P** beobachtet:

Anfangszustand des π^+ :

Impuls $\vec{p} = 0$, Drehimpuls $\vec{J} = 0$

Spins der Leptonen antiparallel

$M = 139.6 \text{ MeV}$



$$J_z = S_z = -\frac{1}{2}$$

‘masseloses’ ν
mit LH Helizität

$$p_\nu = E_\nu = 70 \text{ MeV}$$

$$J_z = S_z = +\frac{1}{2}$$

massebehaftetes e^+
mit LH Helizität

$$p_e \approx E_e = 70 \text{ MeV}$$

- das **Elektron aus dem Pionzerfall muss mit der ‘falschen’ Helizität erzeugt werden**

das hoch relativistische, leichte Elektron besitzt einen

sehr kleinen Anteil der ‘falschen’ Helizität: $P(e\text{-Kanal}) \sim (1 - \beta_e) = 3 \cdot 10^{-5}$

Verzweigungsverhältnisse im Pionzerfall

- beim **Pionzerfall** über die schwache Wechselwirkung beobachtet man eine starke Bevorzugung des $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ Kanals gegenüber $\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$:

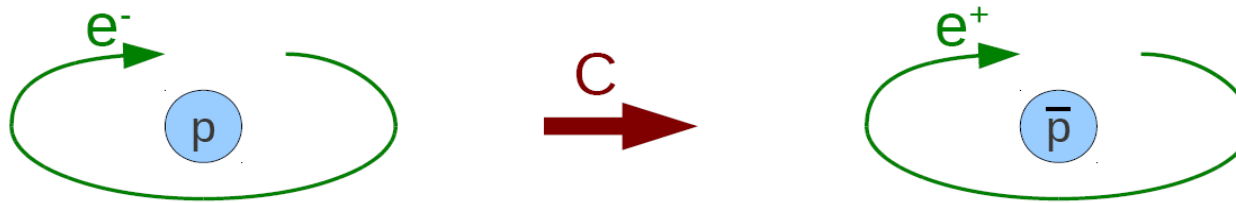
$$R_{theo} = \frac{\Gamma(\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e)}{\Gamma(\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu)} = \frac{m_e^2}{m_\mu^2} \cdot \left(\frac{m_\pi^2 - m_e^2}{m_\pi^2 - m_\mu^2} \right)^2 = 1.275 \cdot 10^{-4}$$

$$R_{exp} = (1.267 \pm 0.023) \cdot 10^{-4}$$

- gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment zeigt:
 - **Neutrinos** sind ausschließlich **linkshändige Fermionen ($h_\nu = -1$)**
 - **Antineutrinos** sind ausschließlich **rechtshändige Fermionen ($h_\nu = +1$)**
 - die 'normale' Helizität eines **massebehafteten Leptons** ist **$h = -v/c$**
 - die 'normale' Helizität eines **massebehafteten Antileptons** ist **$h = +v/c$**
 - die Häufigkeit, Positronen mit der 'falschen' Helizität zu produzieren ist $P \sim 1 - v/c$, daher ist dieser Zerfall stark unterdrückt
 - e & μ koppeln ansonsten mit gleicher Stärke an das W (**μ -e Universalität**)

2. Ladungskonjugation; C-Parität

C-Parität: Teilchen \leftrightarrow Antiteilchen



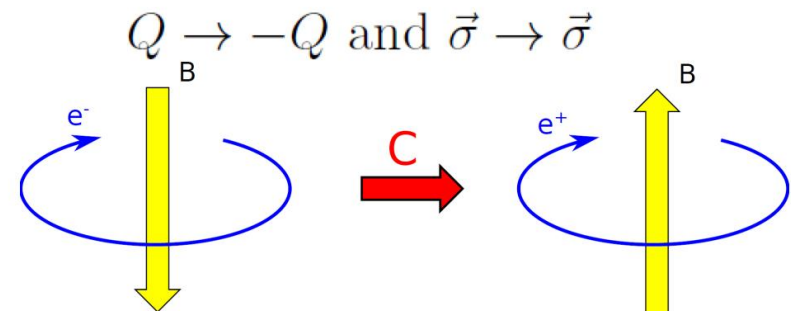
C-Parität in Prozessen der starken und elektromagnetischen (EM) WW erhalten

	Proton	Antiproton
Q	+e	-e
μ	$+2,79\mu_K$	$-2,79\mu_K$
S	$\hbar/2$	$\hbar/2$
m	m_p	m_p
B	+1	-1

	Elektron	Positron
Q	-e	+e
μ	$-\mu_B$	$+\mu_B$
S	$\hbar/2$	$\hbar/2$
m	m_e	m_e
L	+1	-1

Ladungs-konjugierte

Größe		Größe		
Ladung:	Q	$-Q$	}	
Strom:	$Q\vec{v}$	$-Q\vec{v}$		Maxwell Gleichungen
El. Feld:	\vec{E}	$-\vec{E}$		sind Ladungs-invariant.
Mag. Feld:	\vec{H}	$-\vec{H}$		$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$ $\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ $\nabla \cdot \vec{B} = 0$
Position:	\vec{r}	\vec{r}	}	
Geschwindigkeit:	\vec{v}	\vec{v}		invariant
Impuls:	\vec{p}	\vec{p}		
Energie:	E	E		
Drehimpuls:	\vec{L}	\vec{L}		
Spin:	$\vec{\sigma}$	$\vec{\sigma}$		
Mag. Moment:	$\vec{\mu}$	$-\vec{\mu}$		
Baryonen-Zahl:	B	$-B$		
Lepton-Zahl:	L	$-L$		



C-Parität als Quantenzahl von Teilchen

Teilchen	Antiteilchen	Ladungszahlen
p	$Cp = \bar{p}$	$B \rightarrow -1$, $Q \rightarrow -1$, $\vec{\mu} \rightarrow -\vec{\mu}$,
n	$Cn = \bar{n}$	$B \rightarrow -1$, $\vec{\mu} \rightarrow -\vec{\mu}$,
π^+	$C\pi^+ = \pi^-$	$Q \rightarrow -1$,
π^0	$C\pi^0 = +\pi^0$! Eigenzustand !
K^+	$CK^+ = K^-$	$Q \rightarrow -1$, $S \rightarrow -1$,
K^0	$CK^0 = \bar{K}^0$	$S \rightarrow -1$,
Λ	$C\Lambda = \bar{\Lambda}$	$B \rightarrow -1$, $S \rightarrow +1$, $\vec{\mu} \rightarrow -\vec{\mu}$,
Σ^+	$C\Sigma^+ = \bar{\Sigma}^+$	$B \rightarrow -1$, $S \rightarrow +1$, $Q \rightarrow -1$, $\vec{\mu} \rightarrow -\vec{\mu}$
Σ^-	$C\Sigma^- = \bar{\Sigma}^-$	$B \rightarrow -1$, $S \rightarrow +1$, $Q \rightarrow +1$, $\vec{\mu} \rightarrow -\vec{\mu}$
Σ^0	$C\Sigma^0 = \bar{\Sigma}^0$	$B \rightarrow -1$, $S \rightarrow +1$, $\vec{\mu} \rightarrow -\vec{\mu}$,
e^-	$Ce^- = e^+$	$L_e \rightarrow -L_e$, $Q \rightarrow +1$, $\vec{\mu} \rightarrow -\vec{\mu}$,
ν_e	$C\nu_e = \bar{\nu}_e$	$L_e \rightarrow -L_e$,
γ	$C\gamma = -\gamma$! Eigenzustand !
η	$C\eta = +\eta$! Eigenzustand !
$e^+ + e^-$	$C(e^+ + e^-) = \pm(e^+ + e^-)$! Eigenzustand !
$p^+ + p^-$	$C(p^+ + p^-) = \pm(p^+ + p^-)$! Eigenzustand !

C-Paritätserhaltung in Prozessen

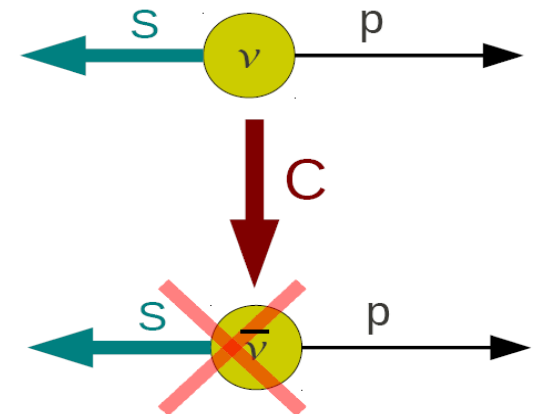
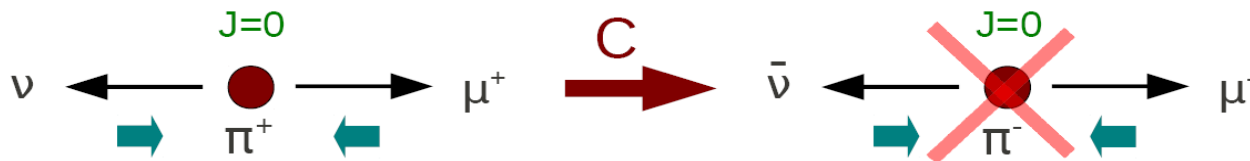
Starke WW: $p\bar{p} \rightarrow \pi^+ + X$
 $\rightarrow \pi^- + X$ } Verteilungen, Raten von π^+ , π^-
 gleich ($\pm 1\%$)

EM WW: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
 $\not\rightarrow \gamma\gamma\gamma$ } $\frac{BR(\pi^0 \rightarrow 3\gamma)}{BR(\pi^0 \rightarrow 2\gamma)} < 3 \cdot 10^{-8}$

$$C | \pi^0 \rangle = C | \gamma_1 \rangle C | \gamma_2 \rangle = C^2 | \gamma_1 \gamma_2 \rangle = + | \pi^0 \rangle \quad (C_\gamma = -1, C_{\pi^0} = +1)$$

$$C | \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \rangle = - | \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \rangle \neq | \pi^0 \rangle$$

C-Parität maximal verletzt in Prozessen schwacher WW

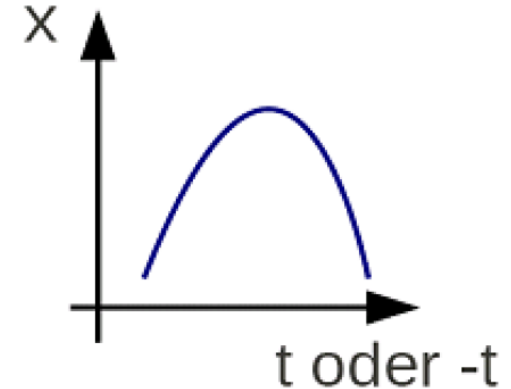


3. Zeitumkehr; t-Parität

Zeitumkehr: $t \rightarrow t' = -t$ $T \Psi(\vec{r}, t) = \Psi(\vec{r}, -t)$

Klassisch: Newtons Gesetze invariant unter T-Transformation:

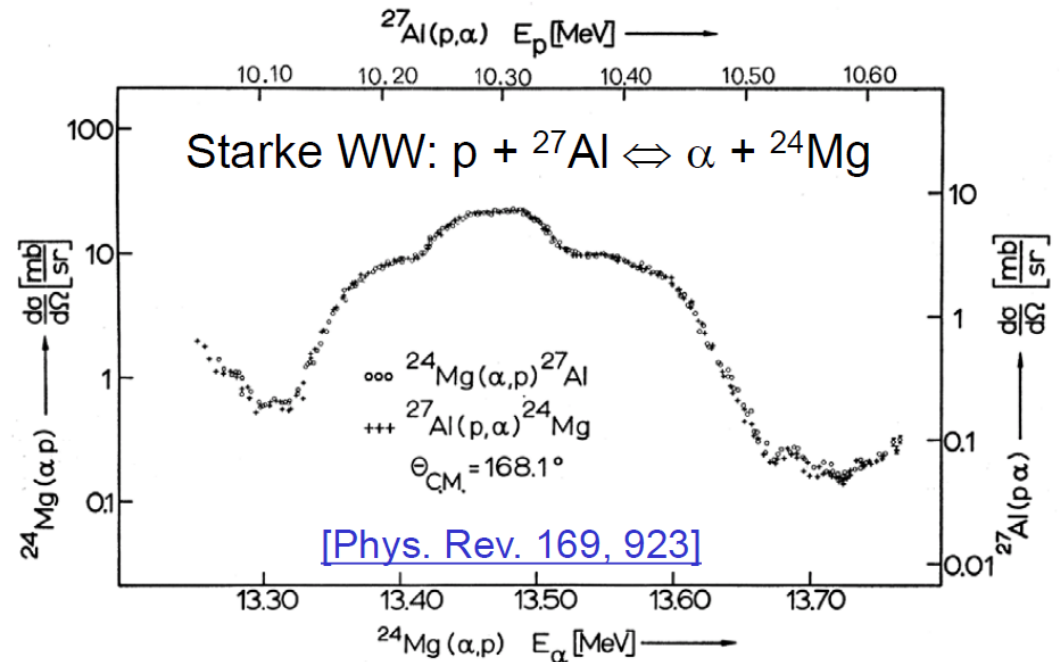
$$F = m \frac{d^2x}{dt^2}$$



Teilchenphysik: $A+B \rightarrow C + D \Leftrightarrow C + D \rightarrow A + B$

Zeitumkehr: $t \rightarrow -t$ $\vec{v} \rightarrow -\vec{v}$
 $\vec{r} \rightarrow \vec{r}$ $\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$
 $\vec{s} = \vec{r} \times \vec{p} \rightarrow -\vec{s}$
 $\vec{B} \rightarrow -\vec{B}$

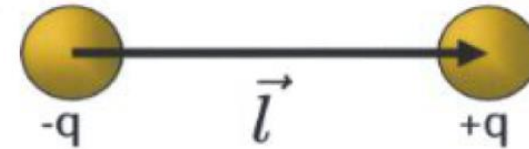
EM und starke WW invariant unter Zeitumkehr, aber schwache WW nicht invariant



Zeitumkehr – elektrisches Dipolmoment

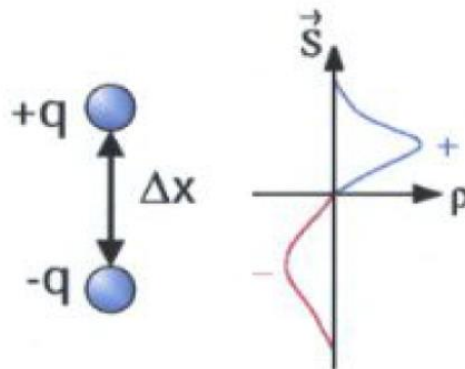
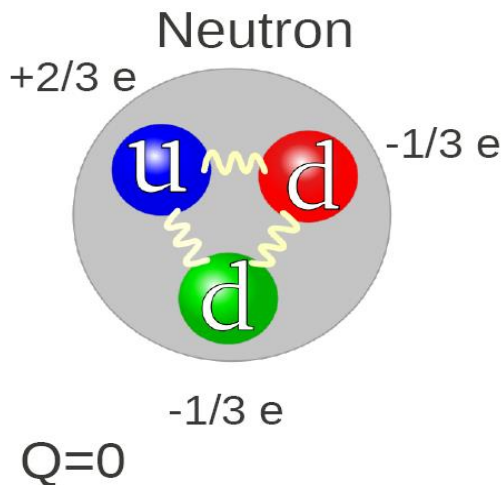
Elektrisches Dipolmoment:

$$\vec{d} = q \cdot \vec{l}$$



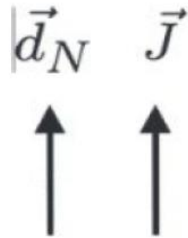
Statische Ladungsverteilung:

$$\vec{d} = \int \vec{x}' \rho(\vec{x}') d^3x'$$

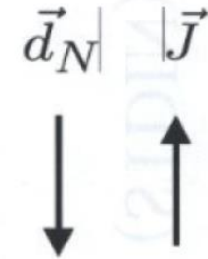
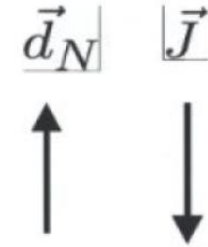
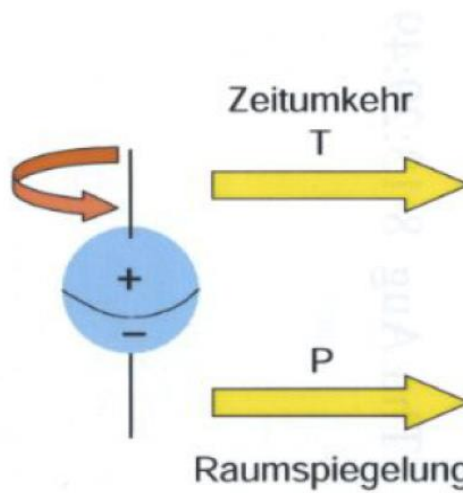


Asymmetrische Verteilung der zeitlich gemittelten pos. und negativen Ladungsverteilungen
→ el. Dipolmoment

Zeitlich
gemittelt:

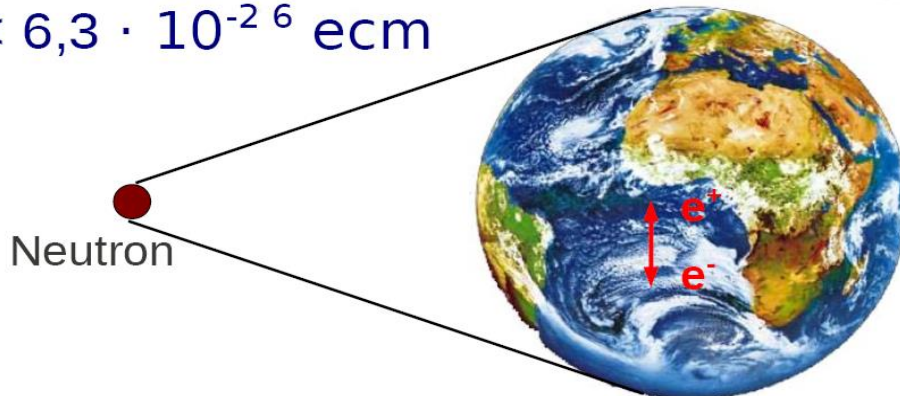


Falls $d_N \neq 0$
→ T,P verletzt



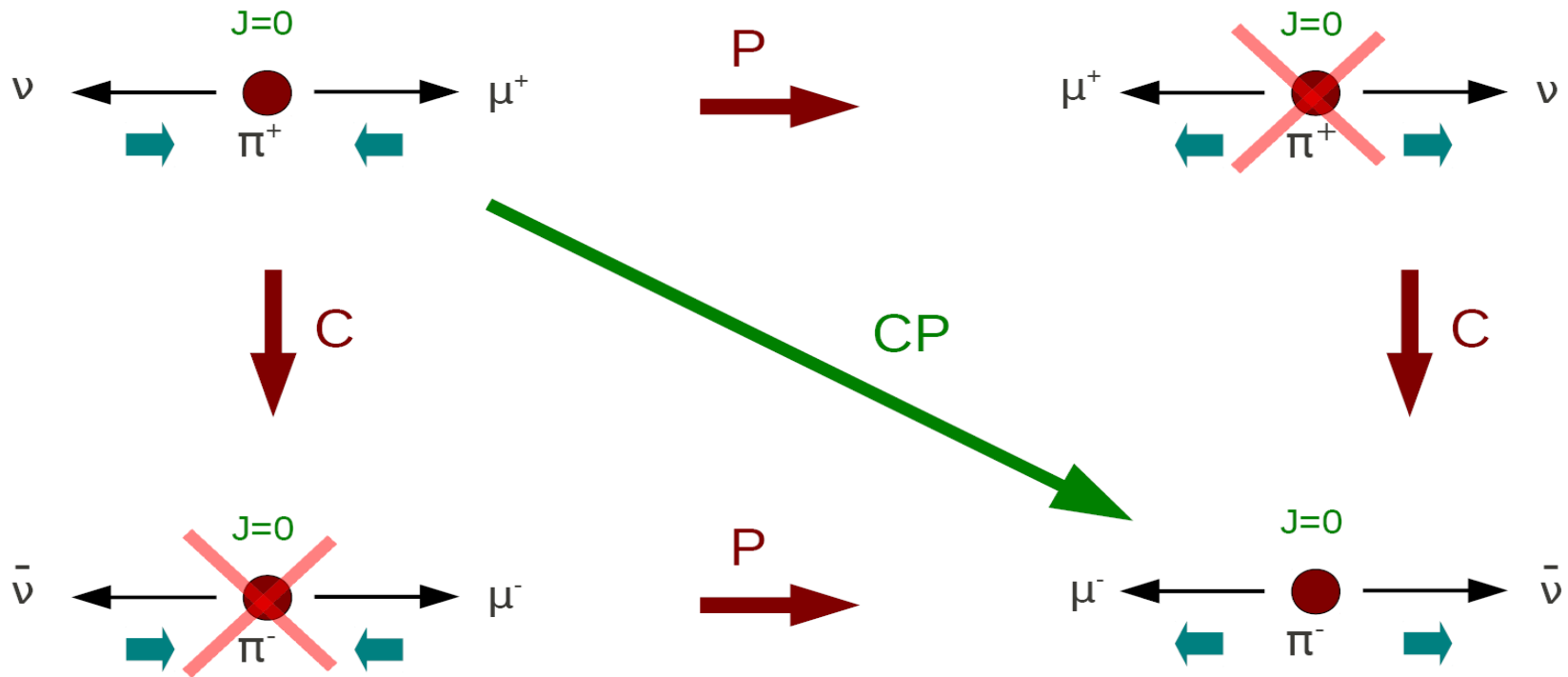
unphysikalischer
Neutronzustand

Experimentell:
 $d_N < 6,3 \cdot 10^{-26}$ ecm



Wenn Neutron so groß wie die Erde
wäre, dann würde d_N 2 Elementarladungen,
die $l=4\mu\text{m}$ getrennt sind,
entsprechen

4. CP-Symmetrie



Fast alle bekannten Vorgänge erhalten CP

1964: Entdeckung von CP-Verletzung in K-Zerfällen
(Christenson, Cronin, Fitch, Turlay)

5. CPT-Symmetrie

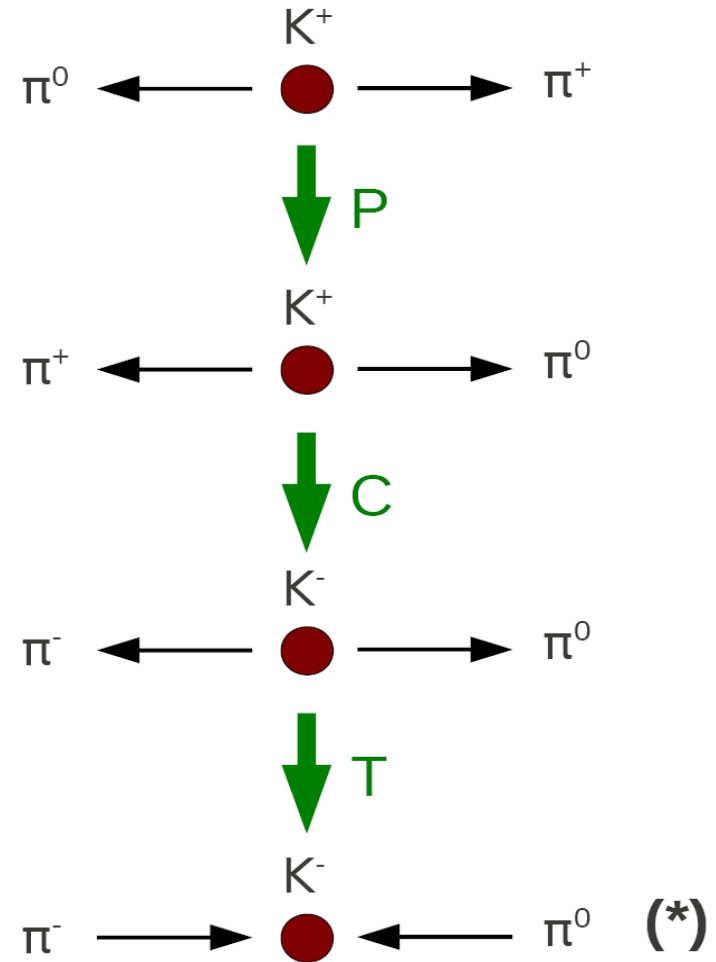
Falls $m_{\text{Teilchen}} \neq m_{\text{Antiteilchen}}$ oder
 $\tau_{\text{Teilchen}} \neq \tau_{\text{Antiteilchen}}$ so ist CPT verletzt

Falls $m(K^+) \neq m(K^-)$

$$\begin{aligned}
 m(K^+)^2 &= [P(\pi^0) + P(\pi^+)]^2 \\
 &= [P(\pi^-) + P(\pi^0)]^2 \\
 &\neq m(K^-)^2
 \end{aligned}$$

würde Reaktion (*) nicht existieren
 \rightarrow CPT verletzt

$m(K^+) < m(K^-)$: Reaktion (*) energetisch nicht möglich
 $m(K^+) > m(K^-)$: (*) verletzt 4er-Impulserhaltung \rightarrow
 K^- Produktion nur mit weiterem Teilchen möglich



3.4. Zusammenfassung: Erhaltungsgrößen

Erhaltungsgröße	Wechselwirkung			Beispiele, Bemerkungen
	stark	schwach	elekt.-	
Energie	Ja	Ja	Ja	✓
Impuls	Ja	Ja	Ja	✓
Drehimpuls	Ja	Ja	Ja	✓
Q (Ladung)	Ja	Ja	Ja	$e^- \rightarrow \nu_e + \text{"neutral" "no"}$
B (Baryonenzahl)	Ja	Ja	Ja	$e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ ✓; $p+n \rightarrow \pi^+\pi^0$ "no"
L_e, L_μ, L_τ (Leptonenzahl)	Ja	Ja	Ja	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ ✓
I (Isospin)	Ja	Nein: $\Delta I=0,1/2$	Nein	$n \rightarrow p+e^-+\nu$; $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
Strangeness, Charme, ...	Ja	Nein: $\Delta=0,1$	Ja	$\Lambda \rightarrow \pi^-+p$; $K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$
P (Parität)	Ja	Nein	Ja	Nachweis: Wu-Experiment
C (Ladungskonjugation)	Ja	Nein	Ja	Landau: C-Verletzung \leftrightarrow P-Verletzung
CP	Ja	Nein	Ja	Schwache Verletzung im K^0 -Zerfall (ca. 10^{-3})
T (Zeitumkehr)	Ja	Nein	Ja	Bsp: $p+^{27}\text{Al} \rightarrow \alpha+^{24}\text{Mg}$ nur auf 10^{-3} gesichert
PCT	Ja	Ja	Ja	?

Additive Quantenzahlen: $Q, B, L, S^*, C^*, B^*, T^*$ (strangeness, charme, bottom, top)
 Multiplikative QZ: C, P, T