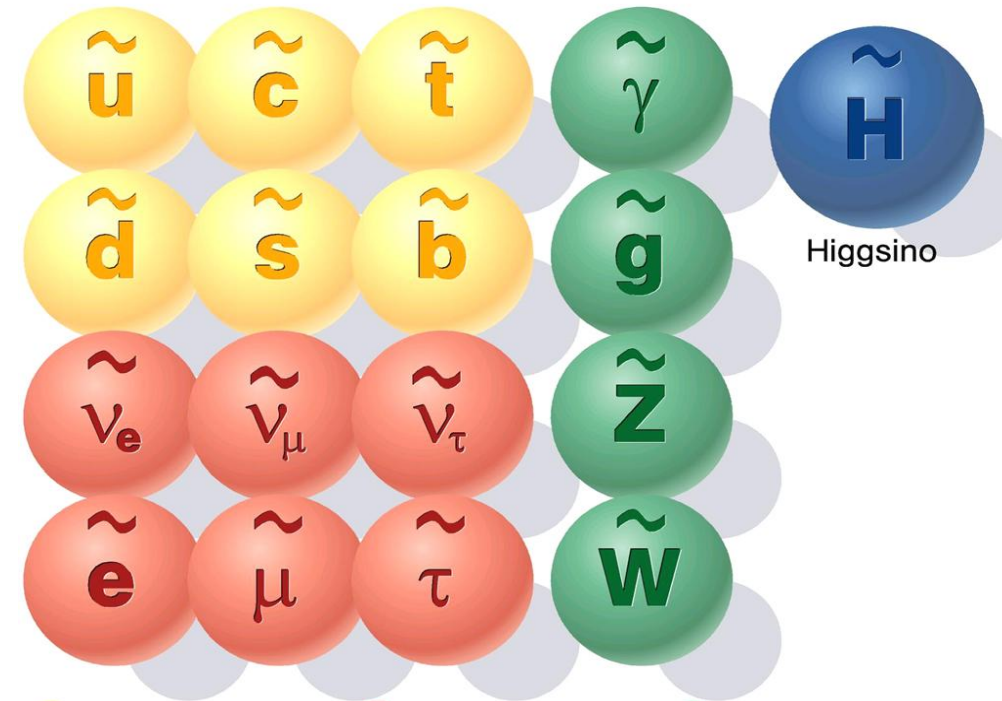


Kerne und Teilchen

Physik VI

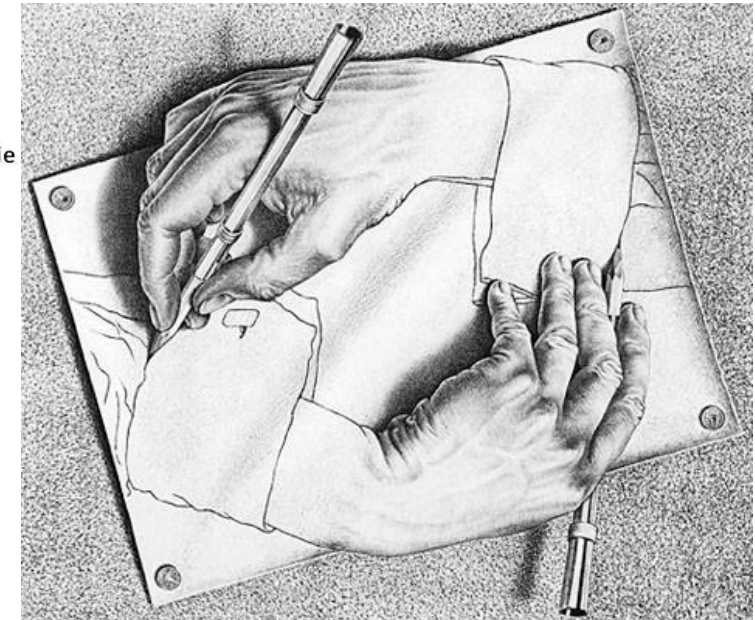
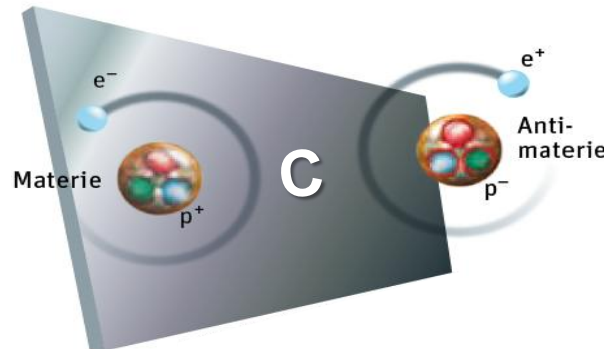
Vorlesung # 20 24.6.2010

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik



Symmetrien

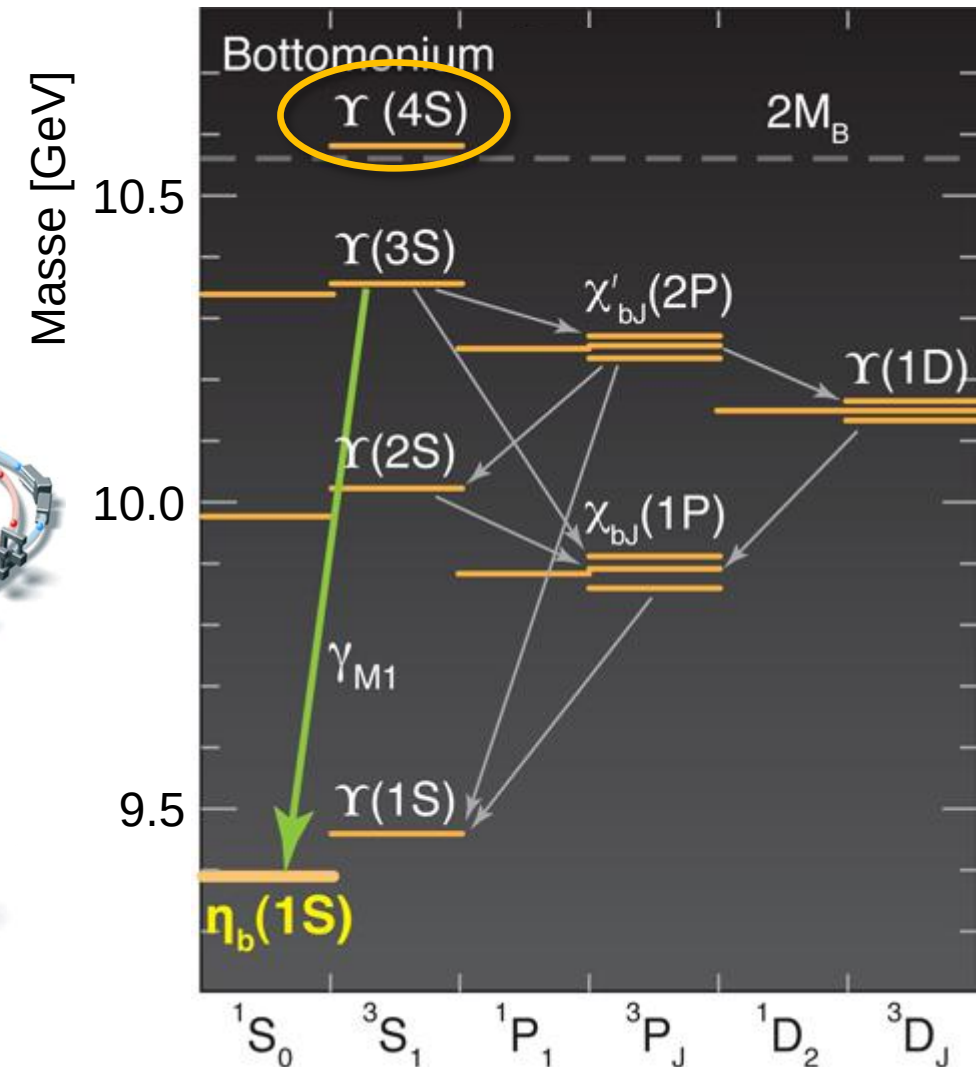
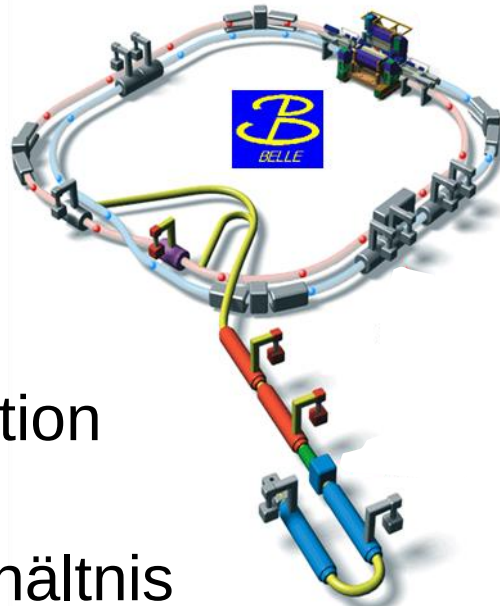
- Ladungskonjugation C
- Zeitumkehrinvarianz T
- CP Symmetrie
- Neutrino-Zustände & CP
- Supersymmetrie SUSY
- Hierarchie-Problem



Bottomonium, B-Fabriken , Top & R_{hadr}



- **Bottomonium-Spektroskopie** ($b\bar{b}$ -System), $\Upsilon(1S) = 9.46$ GeV
enge Analogie zum Charmonium-($c\bar{c}$)-System
- wichtig: die **kinematische Schwelle** für den
Zerfall in $B\bar{B}$ -Mesonen liegt zwischen der
 $\Upsilon(3S)$ und $\Upsilon(4S)$ Resonanz
- **B-Fabriken**: e^+e^- bei $\Upsilon(4S)$ Resonanz
 $E_{\text{CMS}} = 10.58$ GeV (Belle, BaBar)
 $4S \rightarrow B^+ B^-, 4S \rightarrow B^0 \bar{B}^0$
- **Top-Quark**: $\tau \sim 10^{-25}$ s
 $t \rightarrow b + W^+$ (Zerfall noch
vor der Hadronisation)
- **$R_{\text{hadronisch}}$** : bei e^+e^- Annihilation
in Hadronen ($q\bar{q}$) und $\mu^+\mu^-$
Paare beobachtet man Verhältnis
 $R \sim Q_F^2$ (**Quarkflavour-Freiheitsgrade**)

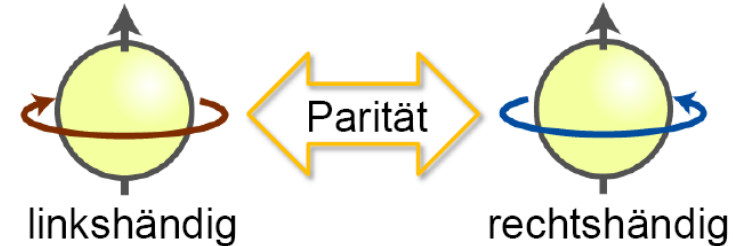


Eigenschaften & Sturz der Parität



■ Parität P:

- räumliche Spiegelung am Ursprung
- Unterscheidung der **Händigkeit**
- Transformation polarer ($\vec{p}$, $\vec{r}$) & axialer ($\vec{L}$, $\vec{B}$) Vektoren
- Zustände mit positiver/negativer Parität



■ Helizität h:

- pseudoskalare Größe: Projektion von $\vec{S}$ auf $\vec{p}$
- 4 Teilchen: LH/RH Teilchen/Antiteilchen

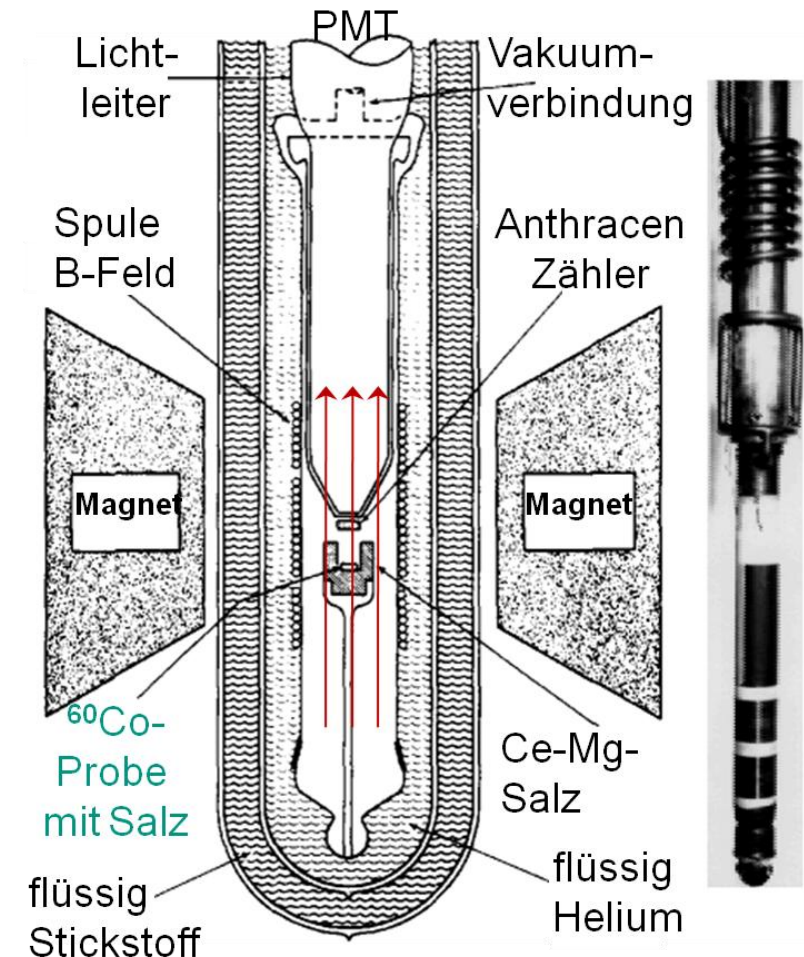
■ Sturz der Parität

- **Lee & Yang**: Parität in der schwachen Ww.?
- **Wu-Experiment**:

Beobachtung einer Vorzugsrichtung der β -Zerfallselektronen relativ zu ^{60}Co Spin

↪ endlicher Erwartungswert für $\vec{J}_{\text{Kern}} \cdot \vec{p}_e$

↪ **maximale Verletzung der Parität**



Pionzerfall in Myon und Neutrino

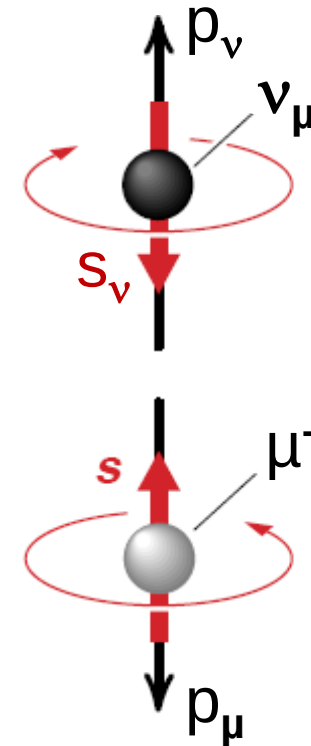
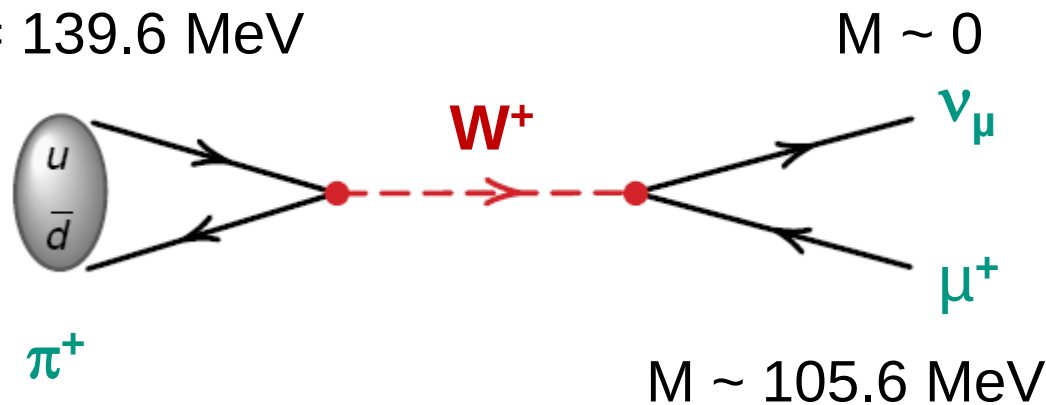
- beim **Pionzerfall** über die schwache Wechselwirkung wird ebenfalls eine **maximale Verletzung der Parität P** beobachtet:

Anfangszustand des π^+ :

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

Spins der Leptonen antiparallel

$M = 139.6 \text{ MeV}$



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

‘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: $P(\mu\text{-Kanal}) \sim (1 - \beta_\mu) = 0.72$

Pionzerfall in Elektron & Neutrino

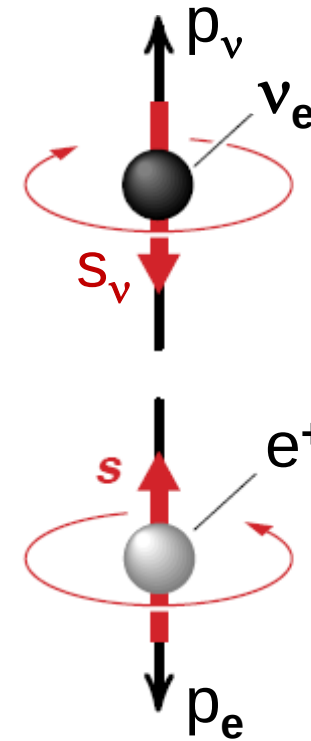
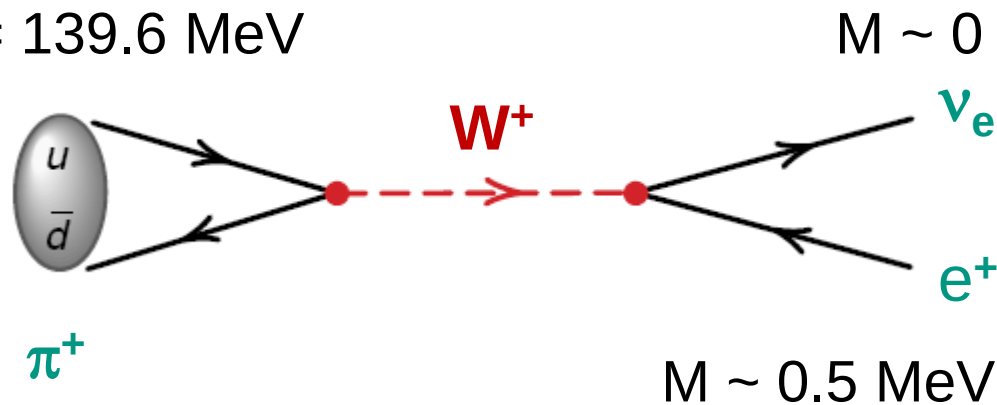
- beim **Pionzerfall** über die schwache Wechselwirkung wird ebenfalls eine **maximale Verletzung der Parität P** beobachtet:

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: $P(\text{e-Kanal}) \sim (1 - \beta_e) = 3 \cdot 10^{-5}$

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

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

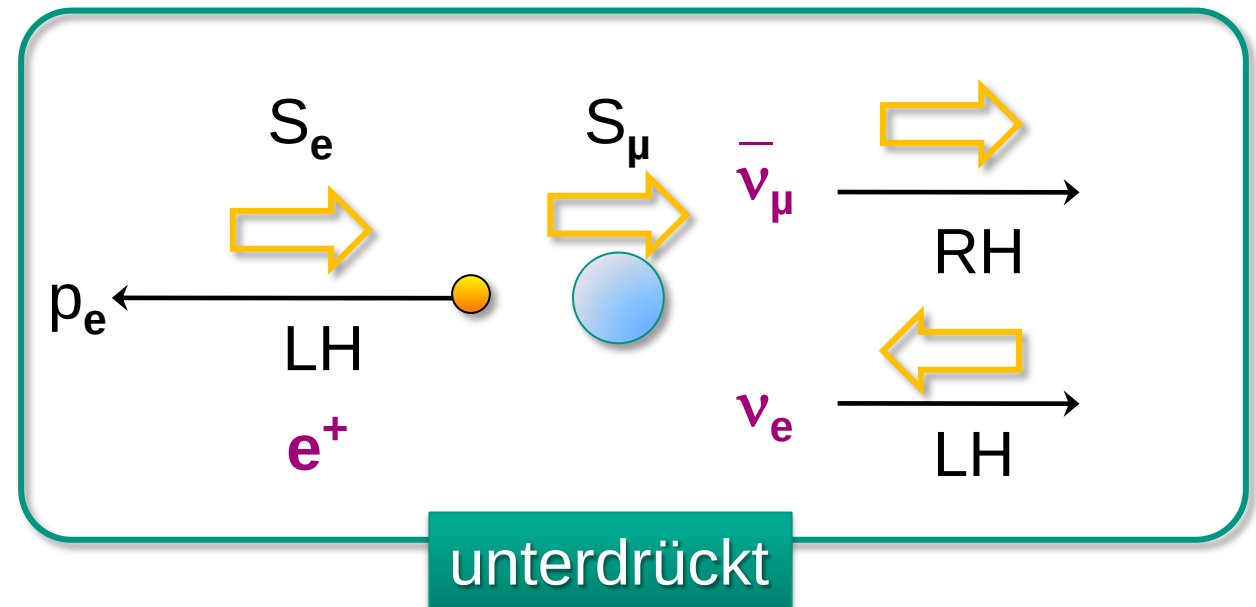
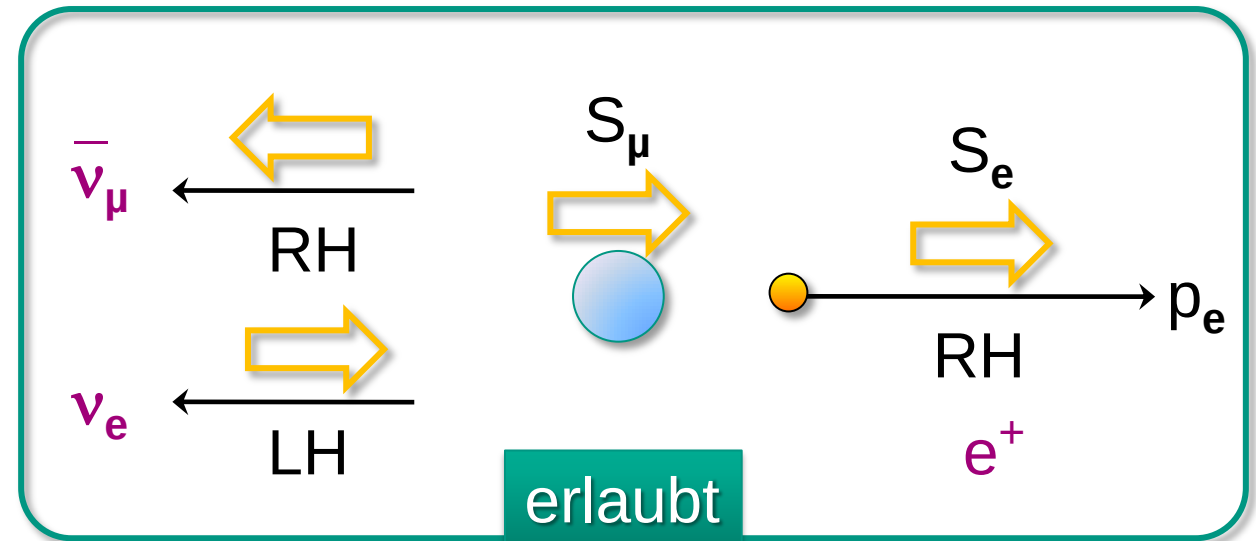
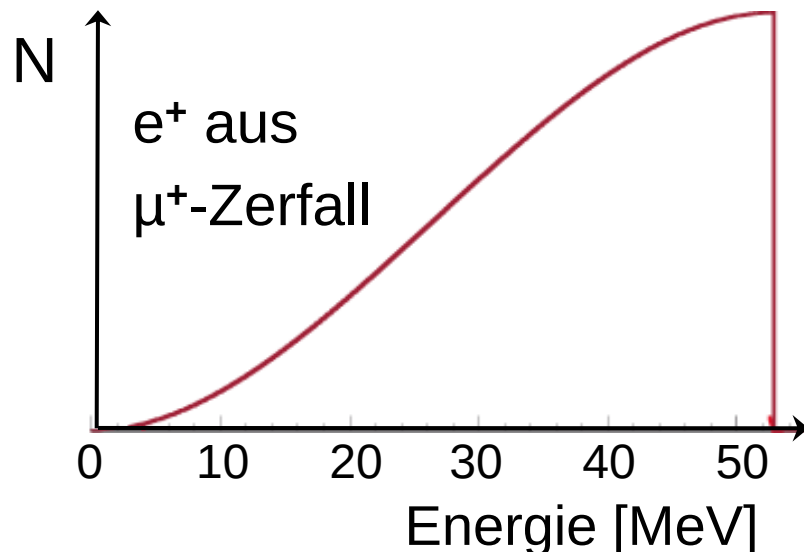
$$R_{exp} = (1.267 \pm 0.023) \cdot 10^{-4}$$

- 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**)

Myonzerfall

- **Paritätsverletzung beim Myonzerfall:** die beiden Helizitäten $h = -1$ von ν_e & $h = +1$ von $\bar{\nu}_\mu$ sind definiert, daher wird das Positron mit maximaler Energie ($E = m_\mu/2$) in die Richtung des Myonspins emittiert (Gegenrichtung ist verboten), **P-Verletzung**!

Positronimpuls zeigt den μ -Spin



- **Ladungskonjugation C (C-Parität)** : diskrete Symmetrie $\Leftrightarrow$ multiplikative Quantenzahl, C angewandt auf Felder/Kräfte: $\vec{B} \rightarrow -\vec{B}$, $\vec{E} \rightarrow -\vec{E}$, $\vec{F} \rightarrow \vec{F}$

Teilchen-Antiteilchen Transformation mit der Änderung von allen ladungsartigen Quantenzahlen: $+Q \leftrightarrow -Q$, $+\mu \leftrightarrow -\mu$, $+B \leftrightarrow -B$, $+S \leftrightarrow -S$, ...
 $\Rightarrow$ alle Teilchen mit $B, S, Q \neq 0$ sind keine Eigenzustände von C

■ selbst-konjugierte Zustände

neutrale Teilchen ($Q = B = S = L = 0$) sind Eigenzustände von C mit der **Eigenparität +1, -1** da $C^2 |\Psi\rangle = |\Psi\rangle$

Photon γ :

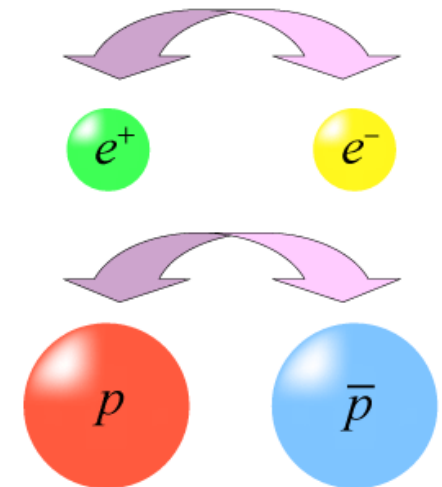
$C |\gamma\rangle = - |\gamma\rangle$ da Potenziale ($\phi \rightarrow -\phi$, $\vec{A} \rightarrow -\vec{A}$) bei $+Q \rightarrow -Q$

$$J^{PC} (\gamma) = 1^{--}$$

neutrales π^0 :

$C |\pi^0\rangle = + |\pi^0\rangle$ da $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ (kein $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma \gamma$, b.r. $< 3 \cdot 10^{-8}$)

$$J^{PC} (\pi^0) = 0^{-+}$$



■ C-Parität von Teilchen - Antiteilchenpaaren :

in Teilchenreaktionen werden oft Teilchen-Antiteilchen-Paare $T\bar{T}$ erzeugt, diese sind selbstkonjugiert und Eigenzustände von C

$$C(T\bar{T}) = (-1)^{\ell+s} \quad \text{relativer Bahndrehimpuls } \ell, \text{ Spin } s$$

$$|\pi^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle) \quad \text{pseudoskalares Pion mit } s = 0, \ell = 0 \quad C = (-1)^0 = +1$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{2}} |d\bar{d} + u\bar{u}\rangle \quad \omega\text{-Vektormeson mit } s = 1, \ell = 0 \quad C = (-1)^1 = -1$$

■ C-Parität & Wechselwirkungen

- starke Wechselwirkung: Erhaltung der C-Parität
- schwache Wechselwirkung: **maximale Verletzung der C-Parität** (Wu et al.)

■ Zeitumkehrinvarianz :

bei Teilchenreaktionen $a + b \rightarrow c + d$ ist bei T-Symmetrie der differentielle Wirkungsquerschnitt der 'Rückreaktion' $c + d \rightarrow a + b$ identisch

Auswirkungen des T-Operators: Felder/Kräfte: $\vec{B} \rightarrow -\vec{B}$, $\vec{E} \rightarrow \vec{E}$, $\vec{F} \rightarrow \vec{F}$, $\vec{v} \rightarrow -\vec{v}$

■ Zeitumkehrinvarianz & Wechselwirkungen:

die T-Invarianz wird von allen 3 Wechselwirkungen eingehalten

Ausnahmen: Verletzung der CP-Invarianz im K^0 - $\bar{K}^0$ und B^0 - $\bar{B}^0$ System impliziert auch Verletzung der T-Invarianz in diesen beiden Systemen

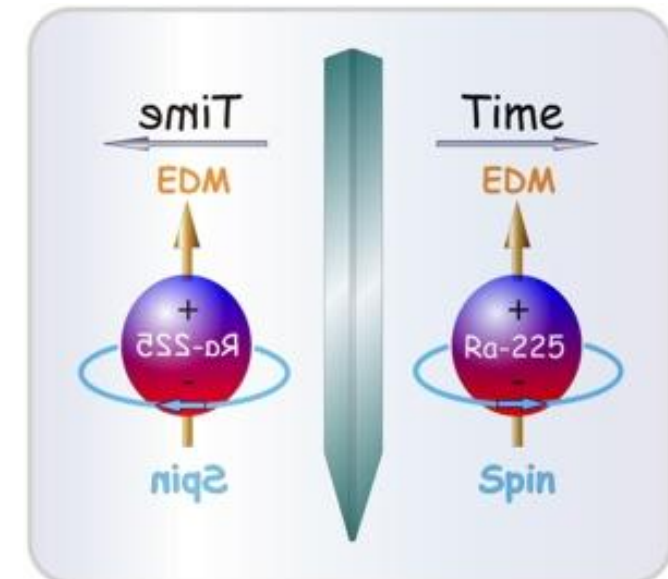
■ Elektrisches Dipolmoment (EDM) & T-Invarianz:

Energie eines magnetischen Dipols μ

$$\vec{s} \cdot \vec{B} \xrightarrow{T} \vec{s} \cdot \vec{B}$$

Energie eines elektrischen Dipols d

$$\vec{s} \cdot \vec{E} \xrightarrow{T} -\vec{s} \cdot \vec{E}$$



Symmetriebrechung durch ein EDM

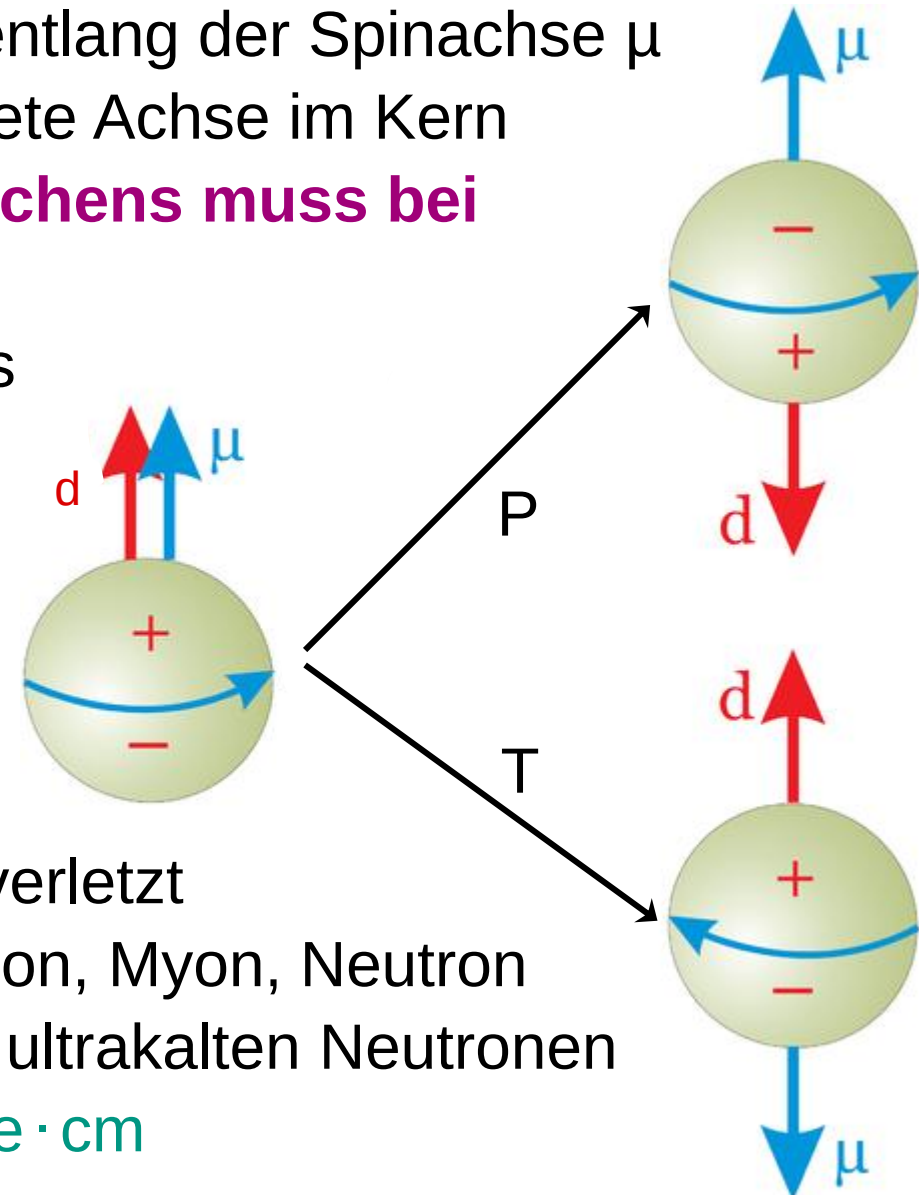
■ Elektrisches Dipolmoment :

- erzeugt asymmetrische Ladungsverteilung entlang der Spinachse μ
- die Spinachse μ ist die einzige ausgezeichnete Achse im Kern
- **das elektrische Dipolmoment d eines Teilchens muss bei T-Invarianz verschwinden**
- Atome und Moleküle können ein elektrisches Dipolmoment durch eine asymmetrische Ladungsverteilung aufweisen (diese definiert die Achse, nicht der Spin!)

■ Suche nach dem EDM :

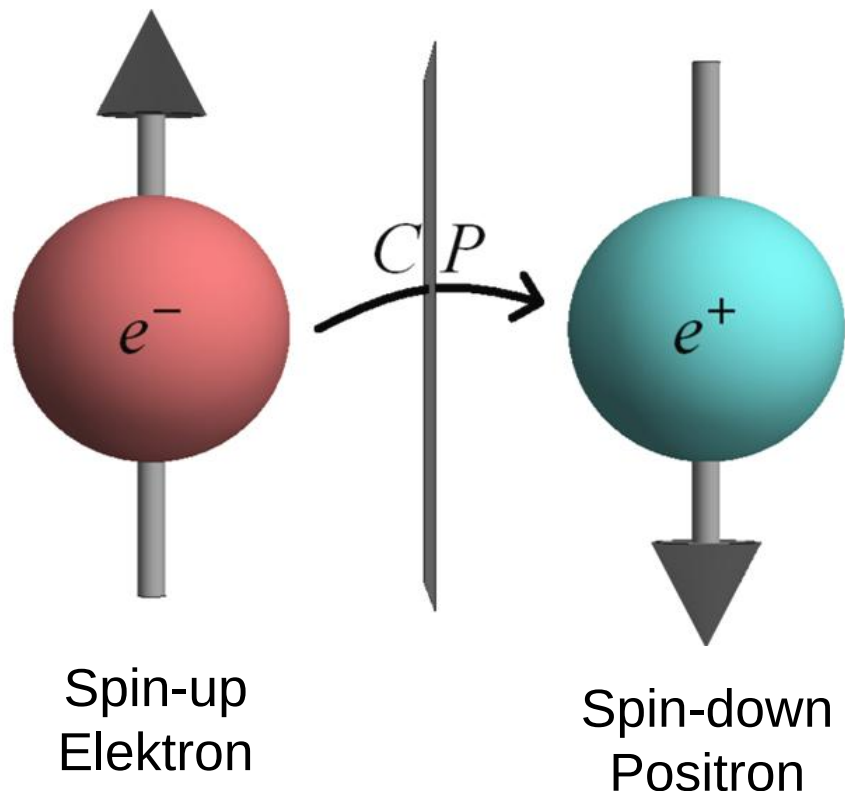
- wird bei einem kugelsymmetrischen Elementarteilchen ein EDM gefunden, ist T verletzt
- Intensive Suche nach dem EDM beim Elektron, Myon, Neutron
- **NMR** (**N**ukleare **M**agnetische **R**esonanz) an ultrakalten Neutronen

Neutron: $d_{\text{exp}} < 2.9 \cdot 10^{-26} \text{ e cm}$, $d_{\text{theo}} = 10^{-32} \text{ e} \cdot \text{cm}$



■ CP - Symmetrie:

- bei einer Verletzung der CP-Invarianz ist auch die T-Invarianz verletzt und umgekehrt
- CP-Verletzung bisher nachgewiesen nur im System der neutralen Kaonen (Cronin & Fitch, Nobelpreis 1980) und im System der neutralen B^0 -Mesonen
↳ Prozesse der schwachen Wechselwirkung in 2. Ordnung (s. Kap. 10.1)



■ CP - Verletzung:

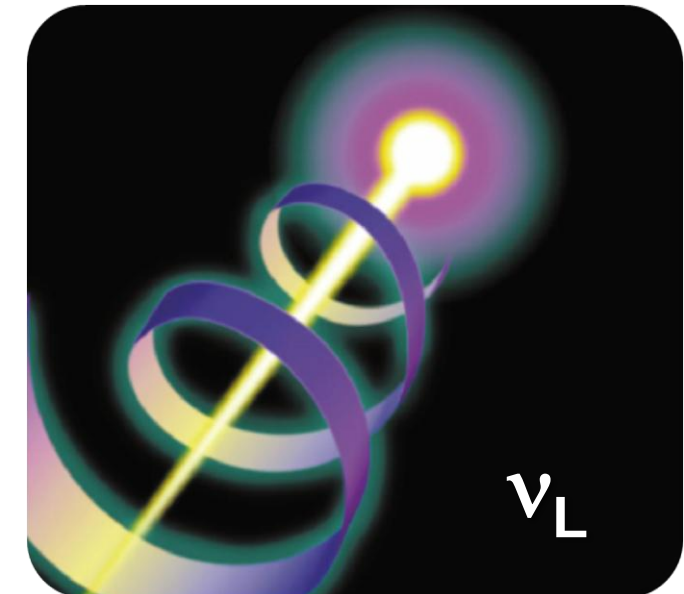
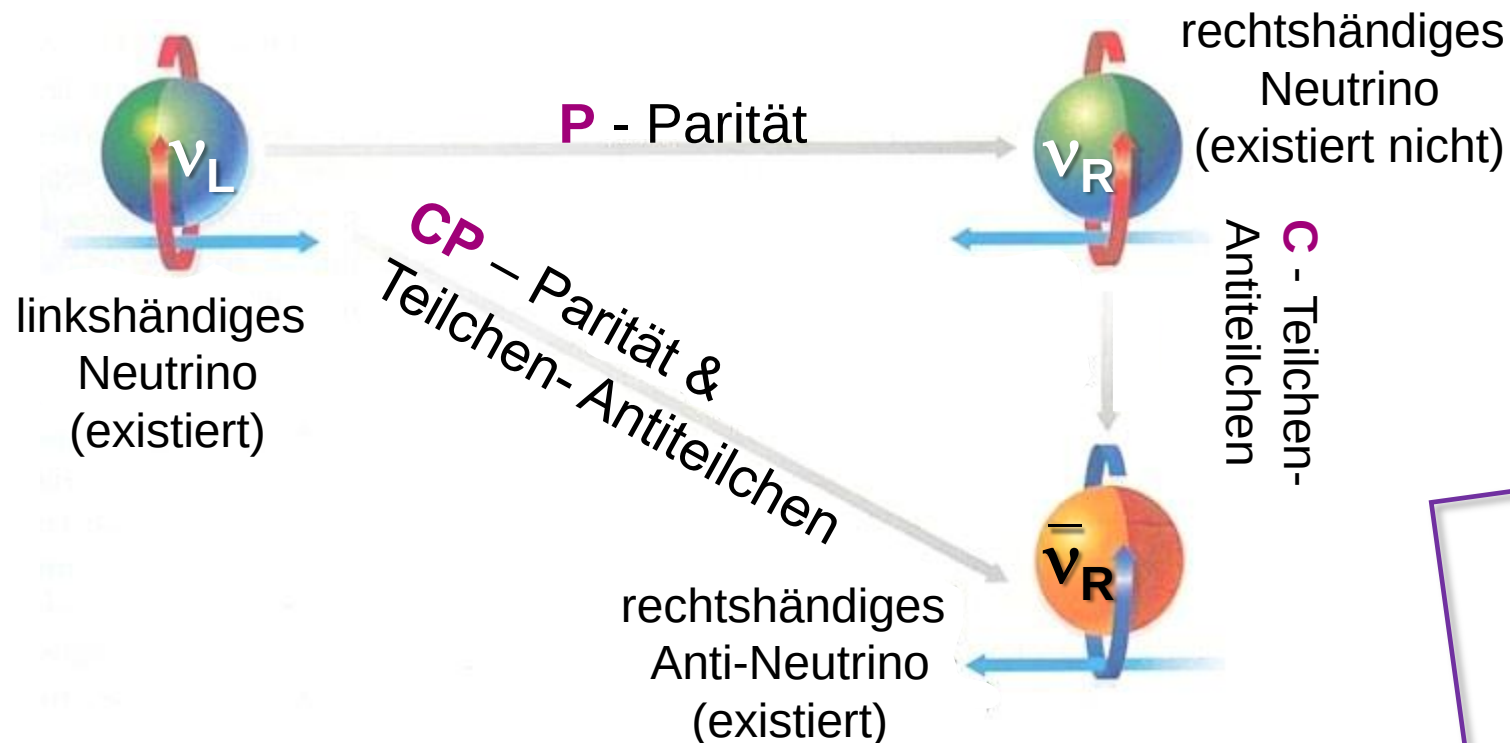
- **Sacharow**: CP-Verletzung ist notwendig für die Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum (Baryogenese)
- ist die CP-Verletzung bei den Mesonen groß genug?
- gibt es CP-Verletzung bei den Leptonen?



Neutrinos: P, C und CP

■ CP – Symmetrie im leptonischen Sektor (Neutrinos):

- masseloses Neutrino: rein LH, (RH Neutrino existiert nicht)
- masseloses Antineutrino: rein RH, (LH Antineutrino existiert nicht)
- bei CP-Symmetrie sind die **Eigenschaften des LH Neutrinos und des RH Antineutrinos identisch!**
- seit 1998: ν 's haben Masse, es gibt also ν_R !



stop press Juni 2010:
sind Mischungseffekte
von Neutrinos & Anti-
Neutrinos unterschiedlich?

Majorana – und Dirac – Neutrinos

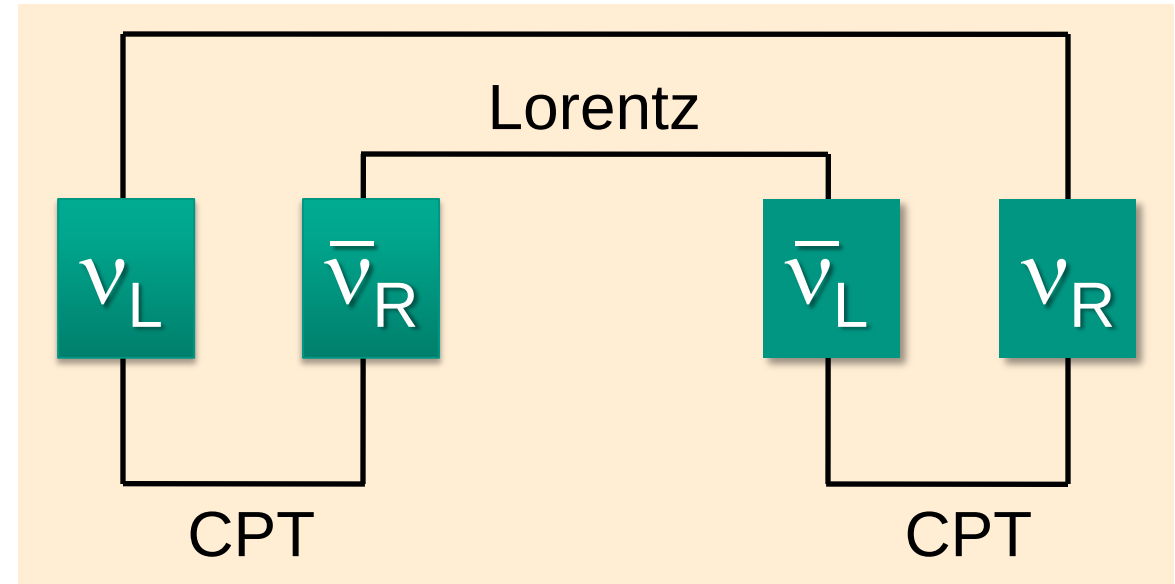
- intrinsische **Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie** von Neutrinos:

Dirac-Neutrino

4 ν -Zustände

**Leptonzahl-
erhaltung** $\Delta L = 0$

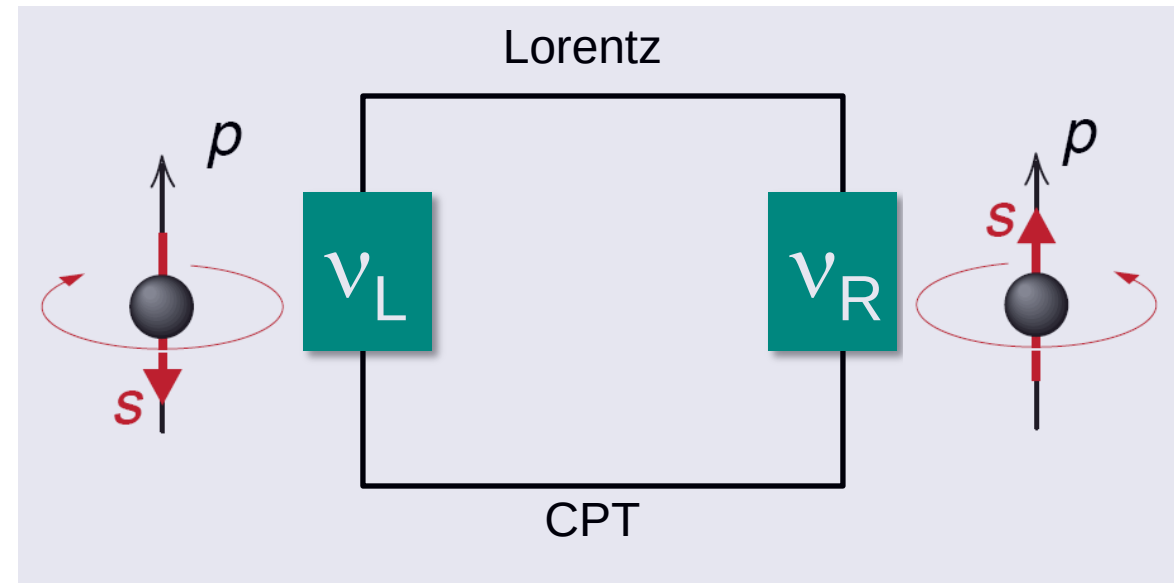
Neutrino $\neq$ Antineutrino



Majorana-Neutrino

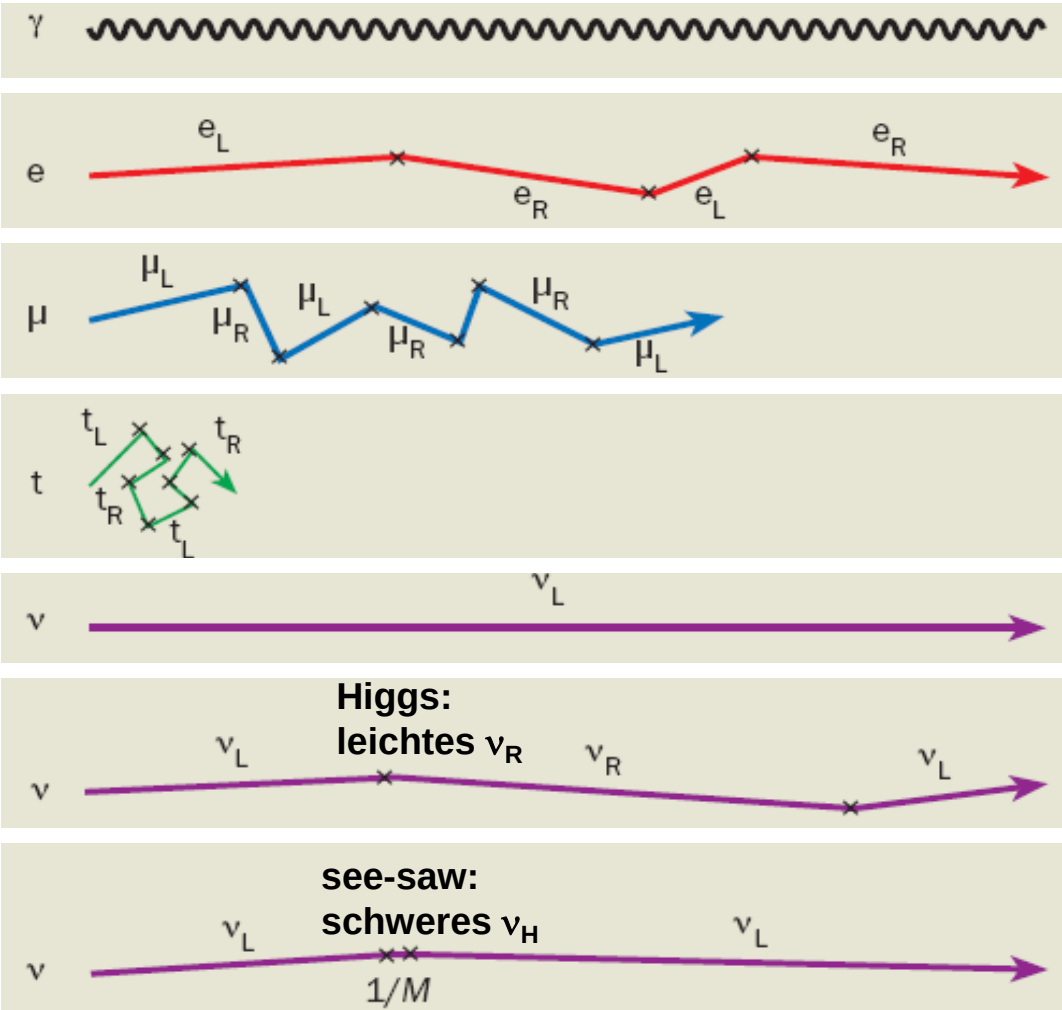
2 ν -Zustände

**Leptonzahl-
verletzung** $\Delta L = 2$



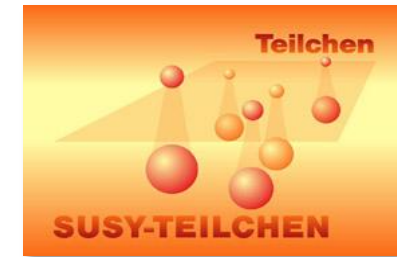
ν^D und ν^M nur unterscheidbar
falls $m_\nu \neq 0$

- **Higgsmechanismus:** Teilchen erhalten Masse durch Wechselwirkung mit dem skalaren Higgs-Boson, dies führt zu einer **Änderung der Händigkeit** (linkshändiges $\leftrightarrow$ rechtshändiges Fermion, d.h. $\nu_{L,R} \leftrightarrow \nu_{L,R}$)



Teilchenart	Skala	m [MeV]
Photon γ	masselos	0
Elektron e	leicht	0.511
Myon μ	mittel	105.6
Top-Quark t	schwer	$1.71 \cdot 10^5$
SM-Neutrino ν_L	masselos	0
Dirac $\nu \quad \nu^D$	sehr leicht	$10^{-8} - 10^{-6}$
Majorana $\nu \quad \nu^M$	sehr leicht	$10^{-8} - 10^{-6}$

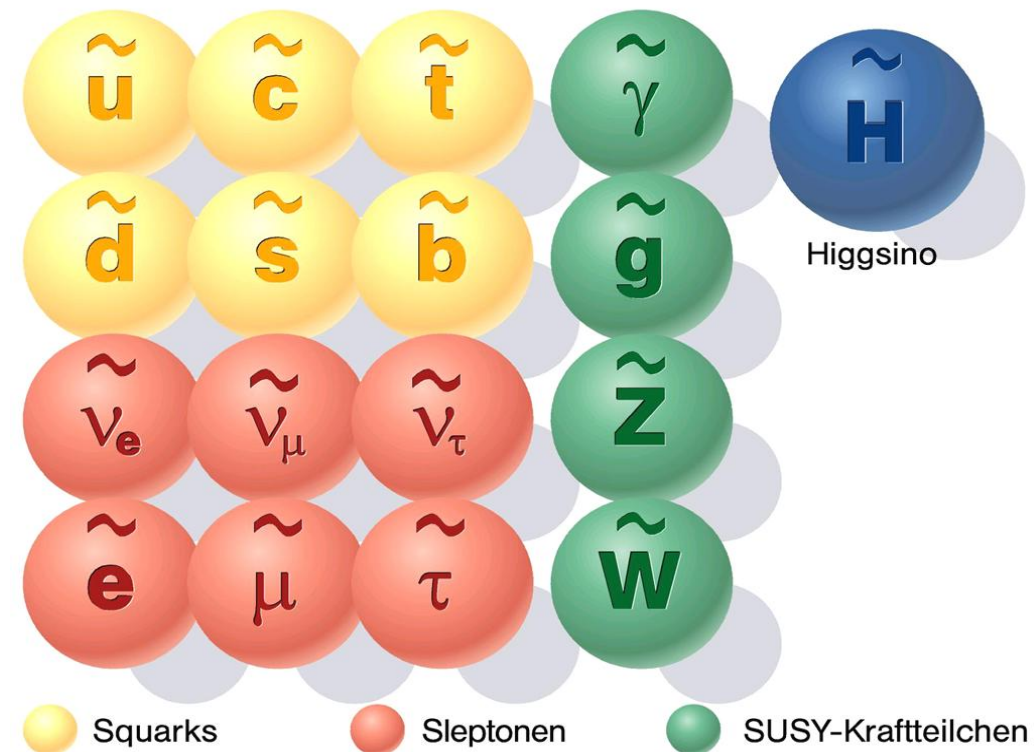
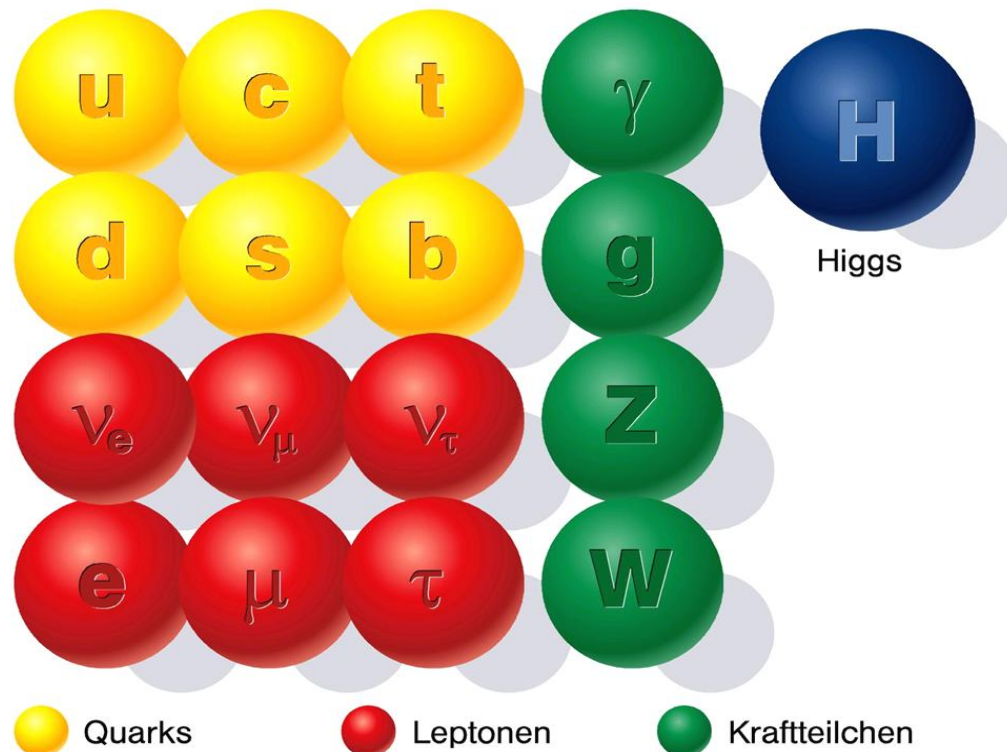
8.3 Supersymmetrie



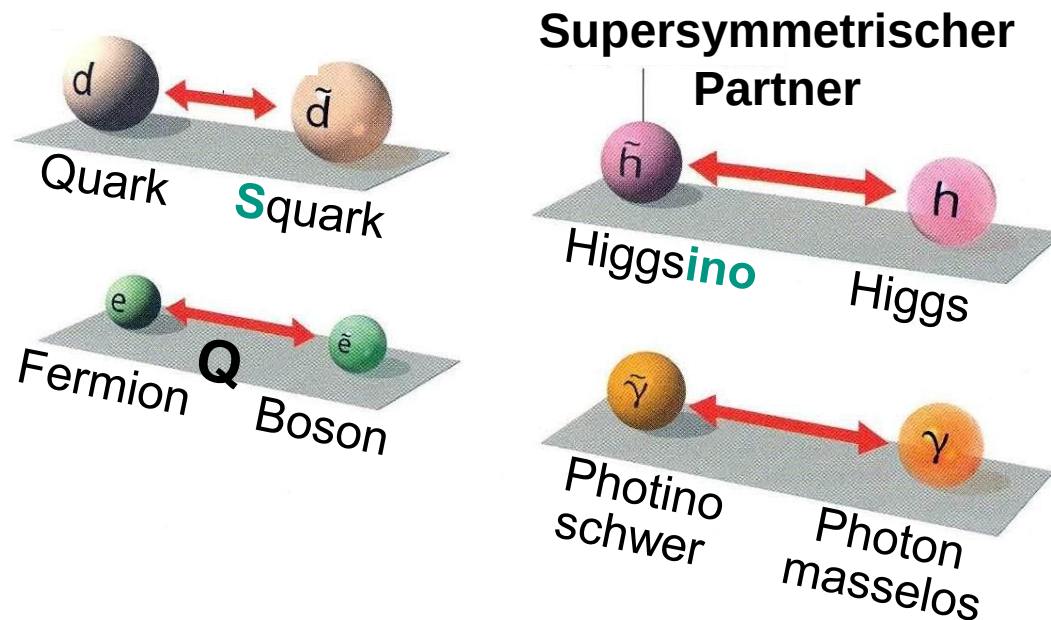
■ Supersymmetrie (SUSY):

ist eine Raum-Zeit Symmetrie, die **Bosonen** mit **Fermionen** verknüpft & durch supersymmetrische Partnerteilchen das bekannte Spektrum der Teilchen des Standardmodells (SM) verdoppelt

- **Superpartner der SM-Teilchen:** bosonische Partner für Fermionen
fermionische Partner für Bosonen



- **SUSY-Operator Q** mit Spin $\frac{1}{2}$ transformiert Boson $\Leftrightarrow$ Fermion :



$$\begin{aligned} Q |Boson\rangle &= |Fermion\rangle \\ Q |Fermion\rangle &= |Boson\rangle \end{aligned}$$

Spin von SM-Teilchen und SUSY-Teilchen differiert um $\Delta s = \frac{1}{2}$

- **Supersymmetrie – eine spontan gebrochene Symmetrie:**

Vakuum ist nicht invariant unter supersymmetrischen Transformationen

↳ Massenunterschiede zwischen SM und SUSY-Teilchen!

↳ Skala der Symmetriebrechung sollte bei $E \sim 1 \text{ TeV}$ liegen

Ursache der Symmetriebrechung?

– 'hidden sector'? (extra Dimensionen) – Gravitation? (Effekte bei M_{Planck})

Hierarchieproblem & SUSY

**Planck
Skala**

**elektroschwache
Skala**

Hierarchie-Problem: $M_{EW} \ll M_{Pl}$

radiative 1-Schleifen Korrekturen zur Higgs-Masse zerstören die Stabilität der elektroschwachen Skala (100 GeV)

Supersymmetrie: bosonische und fermionische Schleifen heben sich auf M_{EW} stabil in allen Ordnungen !

