

7. Lee, Yang, Wu und die Verletzung der Parität 'P'



T. D. Lee



C. N. Yang

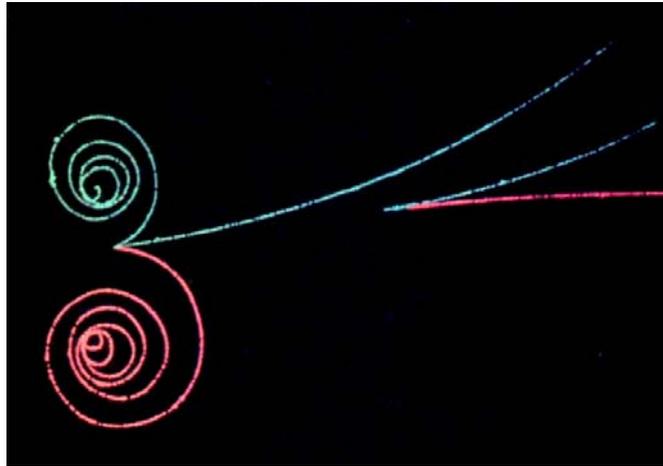
Tsung Doa Lee *1926 und Chen Ning Yang *1922, Nobelpreise 1957



Wolfgang Pauli (1900 - 1958) und Chien-Shiung Wu (1913 - 1997)

"Physik ist die Suche nach der Symmetrie der Welt" -

in dieser Kurzformel kann man die Bedeutung der **'Symmetrie' als fundamentales Konzept** der modernen Physik zusammenfassen.



'Paarerzeugung' von Elektron und Positron

Was bedeutet **'Symmetrie'** in unserem natürlichen Sprachgebrauch? Noch ohne tieferes Nachdenken mag man sagen: wenn ein Gegenstand 'links' genauso aussieht wie 'rechts', ist er 'symmetrisch'; oder: wenn die eine Hälfte eines Gegenstands sich durch die Spiegelung der anderen Hälfte an einer bestimmten Linie ergibt, ist der Gegenstand 'spiegelsymmetrisch' zu dieser Linie; oder noch größer: 'Symmetrie ist, wenn man etwas tut, sich dabei aber **'nichts' ändert'**.

Bereits diese spontanen Formulierungen führen ins Zentrum des physikalischen Symmetriebegriffs, für den gilt: Jede **'Symmetrieoperation'** ist mit der Erhaltung oder **'Invarianz' einer physikalischen Größe** verknüpft. Daher bilden Erhaltungssätze und Symmetrieoperationen ein Paar siamesischer Zwillinge. Dies wurde erstmals von Emmy Noether in die klassische Form des **'Noetherschen Theorems'** gebracht:



Emmy Noether 1882 - 1935

'Für jede (kontinuierliche) **Symmetrie(operation)** physikalischer Gesetze muss ein **Erhaltungssatz** existieren',

'Für jeden **Erhaltungssatz** muss es eine (kontinuierliche) **Symmetrie(operation)** geben'

Beispiele **kontinuierlicher Symmetrieoperationen** : (7.1)

- Verschiebung in der Zeit t

Postulat: physikalische Gesetze unabhängig vom Zeitpunkt
Erhaltungsgröße: **Energie** [= Zeitinvarianz]

- Verschiebung im Raum

Postulat: physikalische Gesetze unabhängig vom Ort
Erhaltungsgröße: **Impuls** [= 'Translationsinvarianz']

- Rotation um eine Symmetrieachse

Postulat: physikalische Gesetze unabhängig vom Drehwinkel
Erhaltungsgröße: **Drehimpuls** [= Rotationsinvarianz]

Beispiele **diskreter** Symmetrieoperationen:

- **Vertauschung**: Teilchen \leftrightarrow Antiteilchen ('C' = 'charge conjugation')

Postulat: physikalische Gesetze gleich für Teilchen u. Antiteilchen
Erhaltungsgröße: **alle** physikalischen Gesetze

- **Raumspiegelung**: $\mathbf{r} \leftrightarrow -\mathbf{r}$ [oder Spiegelung + 180° Rotation] ('P' = 'Parity')

Postulat: physikalische Gesetze unabhängig von Raumspiegelung
Erhaltungsgröße: **alle** physikalischen Gesetze

- **Zeitumkehr**: $t \leftrightarrow -t$ ('T' = 'Time reversion')

Postulat: (mikroskopische) Gesetze unabhängig von Zeitrichtung
Erhaltungsgröße: **alle** physikalischen Gesetze

Bis zum Jahr 1956 nahm man, in unbesehenem Vertrauen auf die 'Symmetrie' der Natur an, dass **alle Naturgesetze invariant gegen jede einzelne der Operationen C, P, T** sind - d.h. im Sinn des auf diskrete Symmetrieeoperationen erweiterten Noetherschen Theorems, dass

alle (mikroskopischen) Naturgesetze

- identisch für **Teilchen und ihre Antiteilchen ('C')** gelten
- **unabhängig sind von Raumspiegelungen** bzw. Koordinatensystemen ('P')
- **unabhängig sind von der Zeitrichtung ('T')** (7.2)

(Die Einschränkung auf '**mikroskopisch**' erfolgt hier im Blick auf den **2. Hauptsatz** der Thermodynamik, der eine Aussage über die **Asymmetrie der Zeitrichtung makroskopischer Systeme** macht...).

Erst **1956** machten sich **Yang und Lee** Gedanken zu der bisher selbstverständlichen Annahme der Invarianz der Naturgesetze bezüglich der drei Symmetrieeoperationen C, P und T in **allen** Wechselwirkungen. Ausgangspunkt dafür war der merkwürdige **Zerfall des 'Tauons τ '**. Dieses Teilchen (heute heißt es '**K₀**') konnte offenbar entweder in **zwei oder** aber in **drei Pionen** zerfallen. Lee und Yang vermuteten als Grund dieses rätselhaften Verhaltens, dass in der '**schwachen Wechselwirkung**', die dem Betazerfall zugrundeliegt, möglicherweise die **Symmetrie (Invarianz) bezüglich der Raumspiegelung (P) verletzt** sein könnte. Sie schlugen zur Überprüfung dieser Hypothese verschiedene Experimente vor, unter anderem die Untersuchung des **Betazerfalls von ^{60}Co** . Dieses Experiment wurde **1957** unter der Leitung von **C.S. Wu** in einem Labor des NIST (National Institut of Standards) durchgeführt, mit spektakulärem Ausgang.

7.1. Das Experiment von C.S. Wu zur Paritätsverletzung

Als Physiker muss man sich fragen: wie kann man die Invarianz oder Nicht-Invarianz des **Betazerfalls von ^{60}Co** bezüglich der Symmetrieeoperation '**P**' ($\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$) nachprüfen? Zuerst muss man natürlich schauen, was in diesem β^- -Zerfall überhaupt passiert: ein **Neutron** des ^{60}Co -Kerns ($Z = 27$, Kernspin $I_C = 5^+$) verwandelt sich unter Emission eines **Elektrons** (e^-) und eines **Elektron - Antineutrinos** ($\bar{\nu}_e$) in ein **Proton**, wodurch (in 99% aller Fälle) der angeregte Tochterkern ^{60}Ni ($Z' = 28$, $I_N = 4^+$, Anregungsenergie $E = 2,5$ MeV) entsteht.



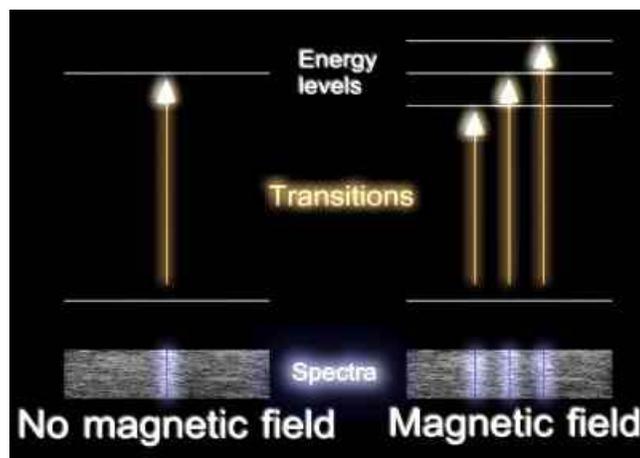
Wie kann man den **Zerfall (7.3) 'raumgespiegelt'** ablaufen lassen ??? Etwa, indem man sein Koordinatensystem, mit dem man die Orte und Richtungen der Zerfallsteilchen (Elektron und Antineutrino) misst, spiegelt ($x \rightarrow -x, y \rightarrow -y, z \rightarrow -z$)?? Abgesehen davon, dass man nur das Elektron nachweisen kann, würde einem das wenig bringen: dem Elektron dürfte es nämlich ziemlich 'schnurz' sein, welches Koordinatensystem der Betrachter ausgewählt hat (Augen hat es ja wohl noch nicht)!

Um das Problem zu knacken, brauchte Madame Wus Gruppe drei gute Ideen:

1. Beobachtung der Elektronenemission relativ zu einer **durch den (Mutter)-Atomkern definierten Achse**
2. **Ausrichtung** dieser Achse in eine bestimmte Richtung (= **z-Richtung**)
3. **Drehung** dieser Achse um 180° (entspricht $\mathbf{z} \rightarrow -\mathbf{z}$ und damit der 'Rauminversion')

1a) als kerneigene Achse wurde die **Spinrichtung, bzw.** die Richtung des **magnetischen Moments μ_C** des ^{60}Co -Kerns gewählt.

2a) für ein in z-Richtung angelegtes **Magnetfeld \mathbf{B}** hat der Kernspin $|\mathbf{S}_C| = 5 \hbar$ **diskrete Einstellmöglichkeiten** ($m_S = -5, -4, \dots, +4, +5$) relativ zu \mathbf{B} . Jede dieser Einstellungen hat eine unterschiedliche Energie (Zeeman-Aufspaltung) mit äquidistanten Energieabständen $\Delta E = g \mu_N B$ ($g = \text{Landé-Faktor}, \mu_N = \text{Kernmagneton} = e / (2m_N) \hbar = 5 \times 10^{-27} \text{ J/T}$). Kühlt man nun die Kerne bei einem Magnetfeld von 2,3 T auf 0.003 K ab (durch 'adiabatische Entmagnetisierung') erreicht man, dass i.w. nur das tiefste Energieniveau besetzt ist ($g = 7,5$ für ^{60}Co)



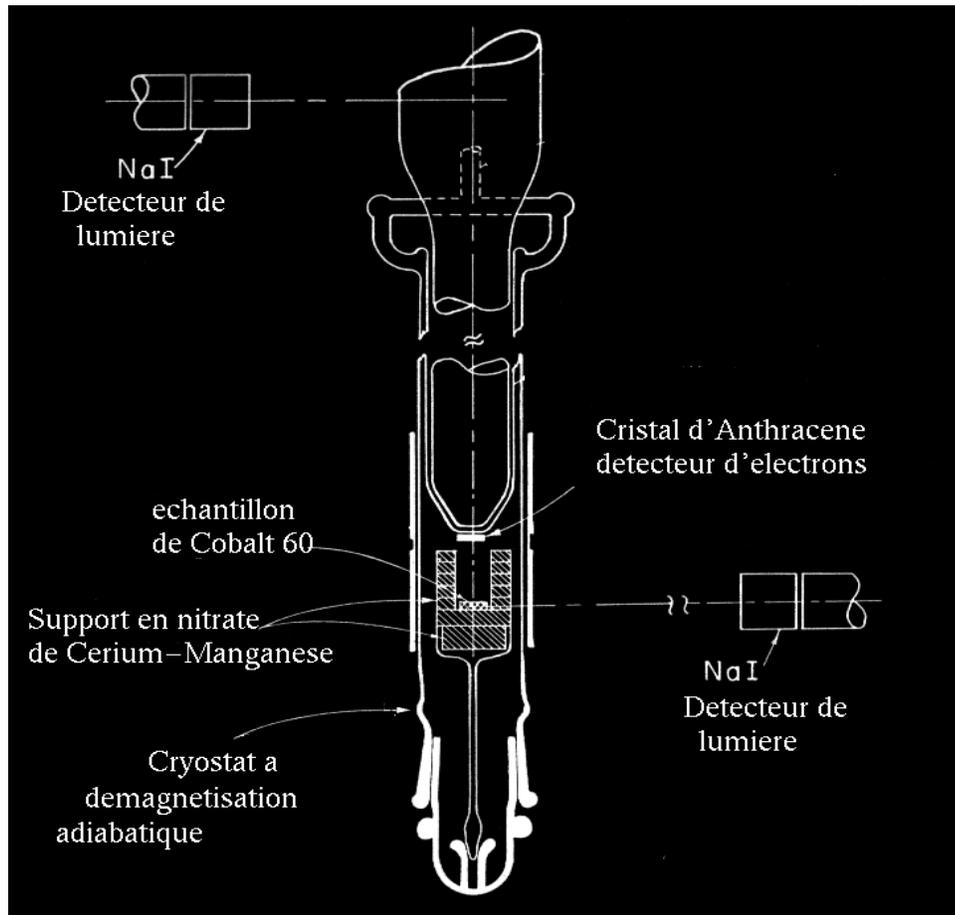
Zeeman- Aufspaltung der Energieniveaus im Magnetfeld

mit $\Delta E = 7,5 \times 5 \times 10^{-27} \text{ J/T} \times 2,3 \text{ T} = 8,6 \times 10^{-26} \text{ J}$; kT ($T = 3 \text{ mK}$) $= 3,3 \times 10^{-26} \text{ J}$ ist dann die Besetzungswahrscheinlichkeit $W(\Delta E)$ des zweittiefsten Niveaus: $W(\Delta E) = e^{-\Delta E/kT}$

$$\rightarrow W(\Delta E) = \exp \{- 8,6/3,3\} = 0,074 \quad (7.4)$$

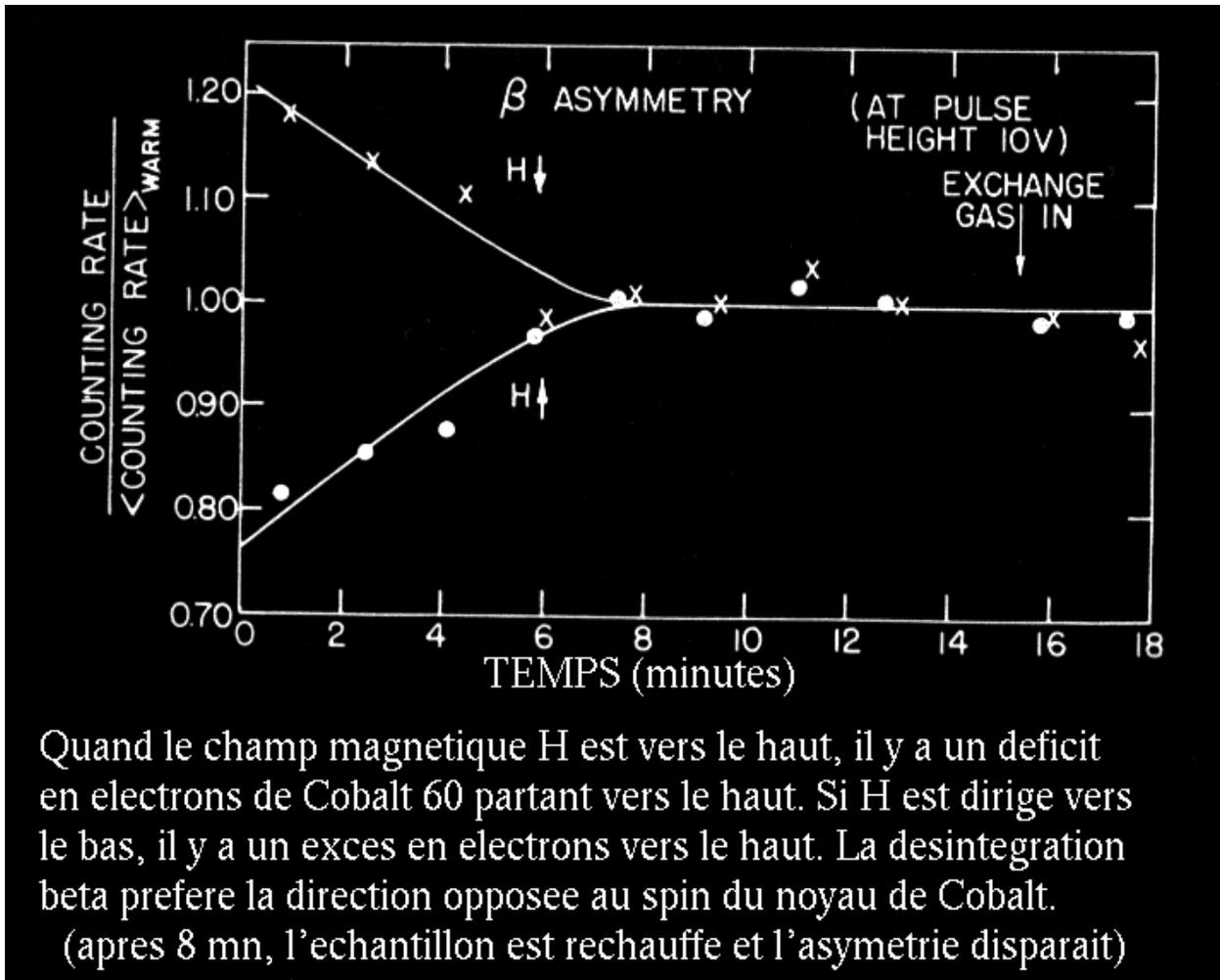
der ^{60}Co -Kern ist also zu über 92% polarisiert.

3a) **dreht** man nun die Richtung von **B um 180°**, dann entspricht dies der Änderung **$z \rightarrow -z$** , also der 'Raumspiegelung' oder, anders gesagt, der '**Paritätsoperation**'.



Aufbau des **Wu- Experiments** mit $^{60}\text{Co}^\uparrow$ von 1957

Die ^{60}Co -Quelle (Halbwertszeit 5,3 Jahre) befindet sich auf einem paramagnetischen Salz aus Cer-Mangan-Nitrat, mit dessen Hilfe man die **Temperatur von 3 mK** erreicht. Quelle und **Elektronendetektor (Anthracen-Szintillator, 2 cm oberhalb)** befinden sich in einem **Helium-Kryostat und einem Magnetfeld B** (in Richtung der Detektorachse) von **2,3 Tesla**. Mit Natrium-Jodid (NaJ) -Detektoren beobachtet man die γ -Strahlen (1,17 und 1,33 MeV) des angeregten Tochterkerns ^{60}Ni , woraus sich der Polarisationsgrad der ^{60}Co -Quelle bestimmen lässt. Da sich das magnetische Moment des polarisierten ^{60}Co -Kerns parallel zum Magnetfeld einstellt, steht der **Kernspin S parallel oder antiparallel zu B** (abhängig vom Vorzeichen von g_{Co} , das man 1957 noch nicht kannte). Je nach Polung des Magnetfelds misst man also die **Emission der Elektronen unter einem Winkel von 0° bzw. 180° relativ zu B**, und dies heißt: unter einem **Winkel von 0° oder 180° relativ zum Kernspin S** (bei welcher Polung man welchen Winkel zu **S** hat, weiß (wusste) man aber nicht!).



Ergebnis des Wu - Experiments: **Verletzung der 'Parität'**

Madame Wus Gruppe maß nun das **Verhältnis der Elektronenzählraten im kalten** (polarisierten) **und im warmen** (unpolarisierten) **Zustand der ⁶⁰Co-Quelle als Funktion der Richtung des Magnetfelds B** (das hier nach früherem, etwas ungenauem Brauch 'H' genannt wird): nach 'oben' **H↑** bzw. nach 'unten' **H↓** und fand

dass im kalten (polarisierten) Zustand

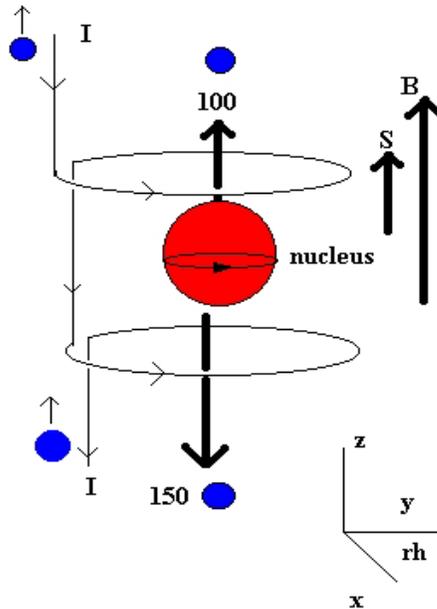
in Richtung des Magnetfelds stets 33% weniger als im warmen Zustand emittiert werden, und

entgegen der Richtung des Magnetfelds 33% mehr als im warmen Zustand.

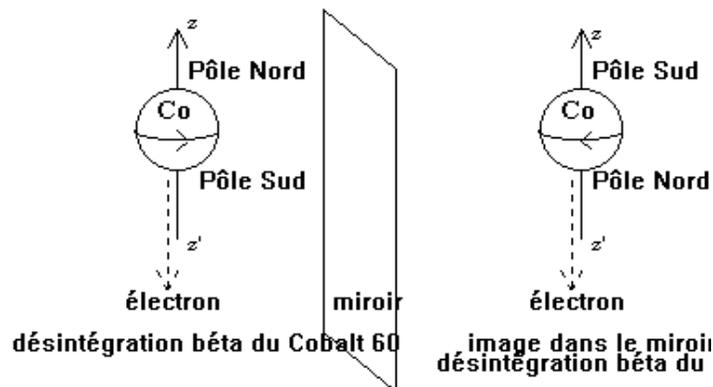
7.2 Spätere Folgerungen aus dem Wu'schen Experiment

Als man später das Vorzeichen des magnetischen Moments von ^{60}Co bestimmt hatte, wusste man, dass im polarisierten ^{60}Co Kern der Spin S in Richtung des Magnetfelds zeigt. Man konnte dann das Ergebnis des Wu'schen Experiments so zusammenfassen:

Es werden immer **mehr Elektronen gegen die Spinrichtung** emittiert als in Richtung des Spins.



Wie sähe jetzt das Wu-Experiment in einem in der x/z -Ebene aufgestellten **Spiegel** aus, der also $y \rightarrow -y$ transformiert, bzw. aus einem 'rechtshändigen' (rh) ein 'linkshändiges' Koordinatensystem macht, wenn man noch bedenkt, dass man dem **Spin einen Kreisstrom** zuordnen kann, der bei der Spiegelung seinen **Drehsinn ändert**? Die **meisten** Elektronen kommen **stets aus dem 'Südpol'**!



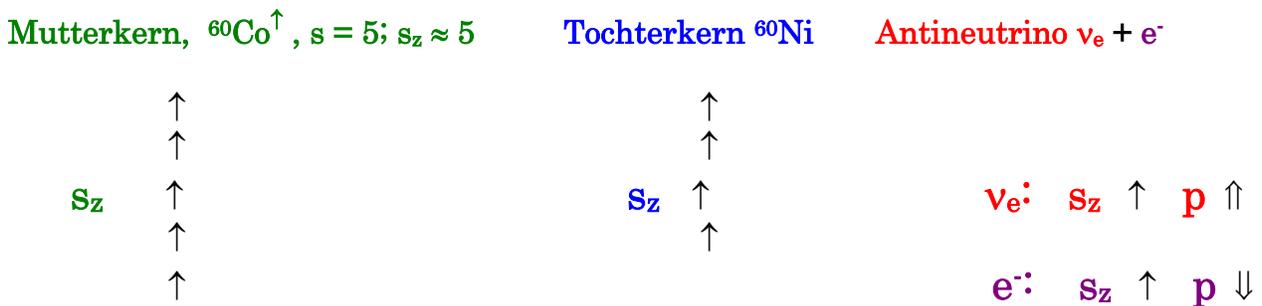
Das **rechte** Spiegelbild kommt daher in der Natur **nicht** vor!!

Im Lichte dieser Erkenntnisse können wir jetzt den Ausgang des ^{60}Co -Experiments nachvollziehen. Dabei betrachten wir stets die **Richtung des Magnetfelds B** als **Quantisierungsachse 'z'**, Spin s und Spinprojektion s_z nehmen wir **in Einheiten \hbar** .

Elektron und Antineutrino haben $s_z = \pm 1/2$, der spinpolarisierte **Mutterkern ^{60}Co mit $s = 5$ hat $s_z \approx 5$** , der **Tochterkern ^{60}Ni hat $s = 4$** und daher ein maximal mögliches $s_z (^{60}\text{Ni}) = 4$. Im Mutterkern sind **fast alle Kerne im tiefsten Energiezustand E_{\min}** , der für positives magnetisches Moment $\mu = g \mu_N s$ für $s_z(^{60}\text{Co}) = 5$ erreicht wird gemäß

$$E = - \mu B = - \mu_z B = - g \mu_N s_z \quad (7.6)$$

(für einen Spin $s = 5$ ist $s_z = 5$ der maximal mögliche Wert; er ergibt E_{\min})
Das Magnetfeld B zeige nach 'oben' = 'z' -Achse': $\uparrow B$

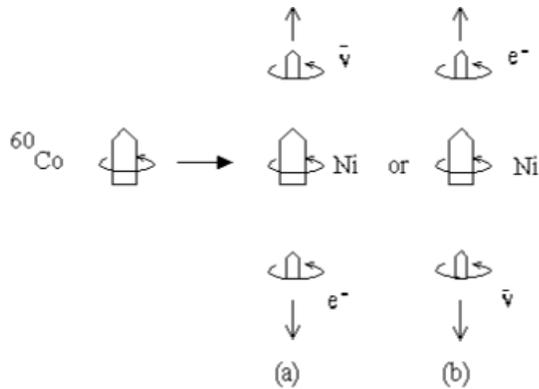


Die **Erhaltung von s_z** vor ($s_z = + 5$) und nach dem Zerfall verlangt, dass **Elektron und Antineutrino jeweils $s_z = + 1/2$** haben müssen (das maximal mögliche s_z des Tochterkerns ist ja $s_z (\text{max}) = 4$). Wenn das **Antineutrino aber zu 100% 'rechtshändig'** ist (Spinprojektion **in** Impulsrichtung $s \cdot p / (|s| |p|) (\nu_e) = h = + 1$), muss sein **Impuls p nach 'oben'** zeigen -und wegen der Impulserhaltung muss das **Elektron vornehmlich nach 'unten'** emittiert werden, wobei wegen $s_z (e^-) = + 1/2 \hbar$ gilt:

$$s \cdot p / (|s| |p|) (e^-) = -1 \quad (7.7)$$

d.h. das **Elektron muss** (vornehmlich) **'linkshändig'** sein.

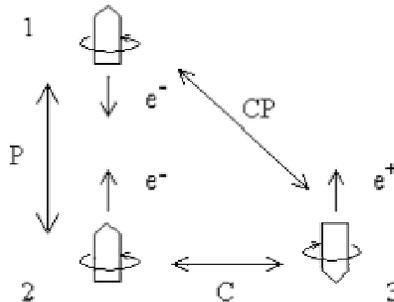
Die obige Analyse ist aber nur 'halbrichtig', da nach ihr ja **alle Elektronen entgegen der Richtung des ^{60}Co -Spins** (und des Magnetfelds) emittiert werden sollten. In Wirklichkeit tut dies aber nur die Mehrzahl. Eine vollständige Analyse hat zu bedenken, dass a) **nicht alle ^{60}Co -Kerne** im Zustand mit $s_z = + 5$ sind; b) der **Impuls** nach dem Zerfall **auf alle drei Teilchen** (Tochterkern, Antineutrino und Elektron) aufgeteilt wird; c) ein Eigenzustand der Helizität (hier auch der Chiralität) $h = +1$ für das Antineutrino quantenmechanisch **nicht** bedeutet, dass der Impuls p und der Spin s **'exakt' kollinear** sind. Tut man dies (kompliziert!), erhält man eine sehr gute Übereinstimmung mit den Experimenten, sowohl für ^{60}Co als auch für ^{58}Co .



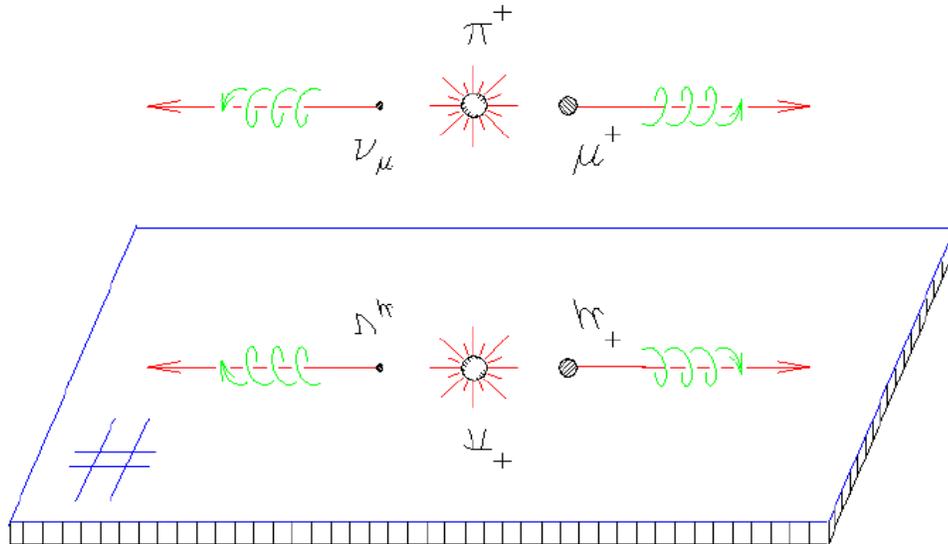
Die Asymmetrie des Zerfalls von ^{60}Co wird nochmals an obigem Bild deutlich: die Spinprojektion ($s_z = 5$) des polarisierten ^{60}Co zeige nach 'oben', in Richtung des Magnetfelds, symbolisiert durch die Kreisbewegung eines 'Elementarstroms'.

a) zeigt die in der Natur vorzugsweise **realisierte Situation** nach dem Zerfall: Der ^{60}Ni -Kern ist im (maximal möglichen) Zustand mit $s_z = 4$; das nach 'oben' emittierte **'rechtshändige'** (Spin zeigt **in die Richtung** des Impulses) **Antineutrino** hat $s_z = + 1/2$, ebenso das nach 'unten' emittierte **'linkshändige'** (Spin zeigt gegen die Richtung des Impulses) **Elektron**; Σs_z der drei Teilchen = 5, wie vor dem Zerfall.

b) zeigt den vorzugsweise **nicht realisierten Zerfall**: da sowohl Elektron wie Antineutrino $s_z = + 1/2$ haben müssen (Σs_z muß ja = 5 sein!), müsste ein nach 'oben' emittiertes **Elektron 'rechtshändig'** sein (Spin in Richtung des Impulses), das nach unten emittierte **Antineutrino** aber **'linkshändig'**.



Das obige Bild zeigt nun die Auswirkung dieser Erkenntnisse auf die Symmetrieoperationen **'P'** (**Parität**) und **'C'** (**Ladungskonjugation**, Teilchen-Antiteilchen-Austausch): **1)** die Operation **'P'**, macht aus einem (nach unten fliegenden), 'linkshändigen' Elektron (Spin zeigt nach 'oben') ein nach oben fliegendes, 'rechtshändiges' Elektron; ein solches ist aber mit der Stärke v/c unterdrückt: **'P' ist verletzt** (für $v = c$ sogar maximal). **2)** **'C'**, macht aus dem unterdrückten rechtshändigen Elektron ein 'erlaubtes' linkshändiges Anti-Elektron = Positron ('C' ändert das Vorzeichen der Ladung und damit die Richtung des Kreisstroms). **'C' ist verletzt**. Die hintereinander ausgeführten Operationen **PC** oder **CP** machen aus einem 'erlaubten' linkshändigen Elektron ein 'erlaubtes' rechtshändiges Positron. Daraus folgt: die **schwache Wechselwirkung verletzt P und C**, aber **nicht PC** (oder CP). 70



All dies wird besonders eindrucksvoll deutlich am **Zerfall des Pions**. Dieser Fall ist einfach, weil sich hier nur **zwei Teilchen** im Ausgangskanal befinden. Ein **ruhendes**, positiv geladenes **Pion (π^+)** mit **S = 0** kann **nur über die 'schwache' WW** zerfallen (es hat die kleinste Masse aller 'stark' wechselwirkenden Teilchen). Die Bedingungen für die beiden Zerfallsprodukte sind daher (z-Achse = Richtung von μ^+):

1. $\sum q_i = +1$ (Ladungserhaltung); 2. $\sum \mathbf{p}_i = 0$ (Impulserhaltung)
3. $\sum \mathbf{s}_i = 0$ (Drehimpulserhaltung); 4. $\sum s_z(i) = 0$ (Erhaltung der Drehimpulsprojektion)
5. $\sum E_i = m(\pi^+) c^2$ (Energieerhaltung); 6. $\sum \text{Teilchen} + \text{Antiteilchen (pro 'Familie')} = 0$

Warum zerfällt das π^+ **fast nur** in ein **Anti-Myon (μ^+)** und ein Myon-Neutrino (ν_μ), aber **kaum** in ein **Positron** und ein Elektron-Neutrino (Wahrscheinlichkeit = 10^{-4}), obwohl doch das Positron durch den höheren 'Phasenraum' stark begünstigt wäre?

Die Antwort liegt in einer Betrachtung der Spinprojektionen s_z bzw. der Helizitäten: Wegen 4) müssen die s_z der beiden Teilchen **entgegengesetzt gleich** sein. Daraus folgt aber, dass beide Teilchen die **gleiche Helizität** haben müssen; da ν_μ als masse-loses Fermion $h = -1$ (linkshändig) hat, muß die Helizität des μ^+ (Antiteilchen des μ) ebenfalls = -1 sein; diese 'falsche' Händigkeit gibt es aber nur mit der **Stärke (1 - v/c)**.

Aus Energie- und Impulssatz und mit $m_\pi c^2 = 139,6 \text{ MeV}$, $m_\mu c^2 = 105,7 \text{ MeV}$ berechnet man für die kinetische Energien T bzw. $\beta = v/c$ von Myon bzw. Elektron:

$$T_{\mu^+} = 4,116 \text{ MeV}; \quad \beta_{\mu^+} = 0,27; \quad T_{e^+} = 69,3 \text{ MeV}; \quad \beta_{e^+} = 0,99997$$

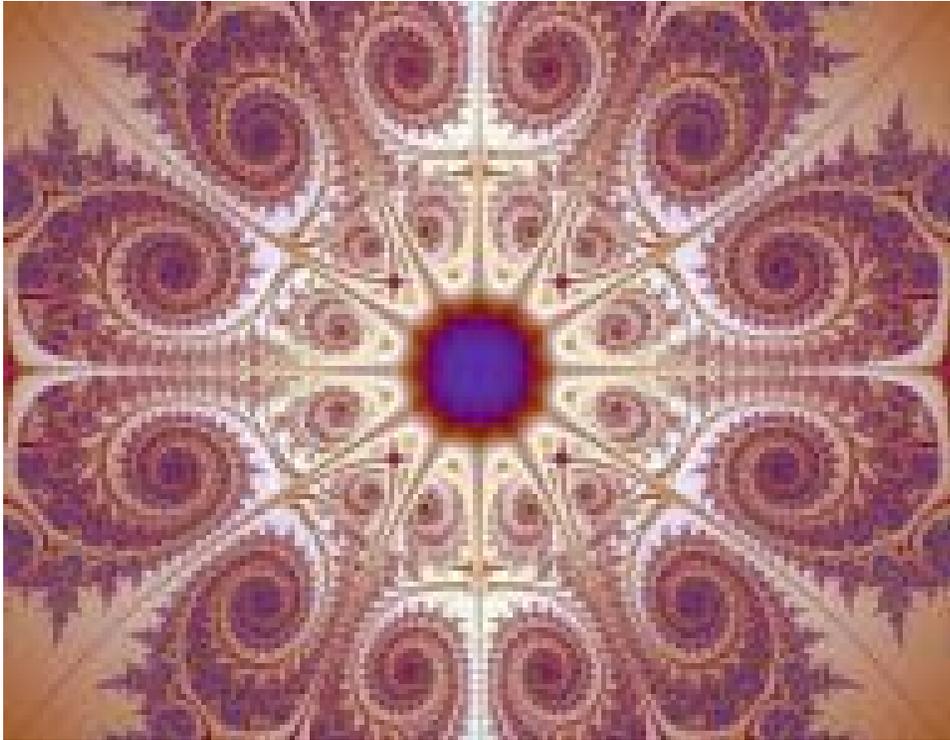
Die erforderliche 'falsche' Linkshändigkeit des **Myons** ist also mit $(1 - \beta_\mu) = 0,73$, die des **Positrons** aber nur mit $(1 - \beta_{e^+}) = 0,00007$ vorhanden. Das Spiegelbild (**P**) des Zerfalls (s. Bild) ist physikalisch **nicht** erlaubt; wohl aber mit der Ersetzung **aller Teilchen des Spiegelbilds durch ihre Antiteilchen (PC)**!

Zusammenfassung:

1. es gibt bisher **kein einziges Experiment**, das eine **Verletzung der CPT-Invarianz** (Hintereinanderausführung von C-, P-, T- Transformation in beliebiger Reihenfolge) gezeigt hat. Daher nimmt man an,

dass alle Naturgesetze CPT-invariant sind.

2. die **schwache Wechselwirkung verletzt** (maximal) die **P-** bzw. **C-Invarianz**, ist aber **CP-invariant** (da sie CPT-invariant ist, muss sie auch T-invariant sein). **Masselose Fermionen** (Neutrinos) sind stets **'linkshändig'** (Helizität bzw. Chiralität = -1), **masselose Antifermionen** stets **'rechtshändig'** (Helizität bzw. Chiralität = + 1). **Fermionen bzw. Antifermionen mit Ruhemasse $\neq 0$** sind links- bzw. rechtshändig $\propto v/c$.
3. eine (schwache) **CP-Verletzung** wurde bisher **nur** beim Zerfall des **K_0 -Mesons** gefunden (sowie neuerdings beim **B-Meson**).



Physik ist die Suche nach der (fraktalen?) **Symmetrie** der Welt