



---

## Das Wu-Experiment

---

Inga Höfmann  
5. November 2018

## Überblick

**Theoretische Grundlagen**

**Historischer Hintergrund**

**Konzept des Experiments**

**Aufbau und Durchführung**

**Resultate**

**Zusammenfassung**

**Ausblick**

**Appendix**

**Literaturverzeichnis**

## Der Paritätsoperator $\hat{P}$

Eine Paritätstransformation bedeutet eine Inversion in allen Raumkoordinaten.

$$\hat{P}^2 \rightarrow 1, \lambda = \pm 1$$

$$\hat{P}\hat{r} = -\hat{r}$$

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

Der Drehimpuls ist unter der Parität invariant. → Der Spin ist ebenfalls erhalten.  
Für Zerfälle in mehrere Teilchen gilt:

$$P(XY) = P(X)P(Y)(-1)^l \quad (1)$$

## Parität - Beispiel

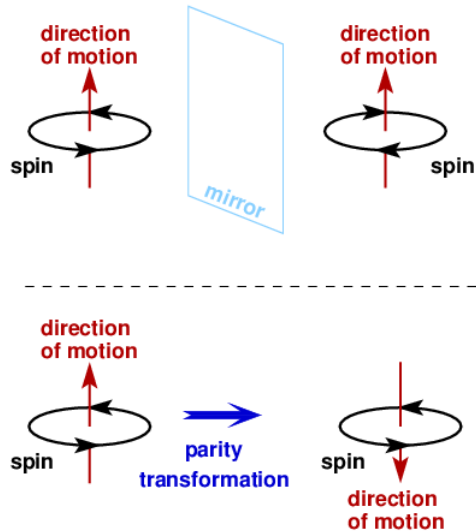


Abbildung: Darstellung eines gespiegelten und tatsächlichen Bildes [Hei16].

## Überblick

- 1927 Eugene Paul Wigner führt die Quantenzahl der Parität ein (Erhaltungsgröße).
- Parität erweist sich als Erhaltungsgröße in der Nuklear- und Atomphysik (gemäß der gefundenen Auswahlregeln).
- 1954 R.H. Dalitz untersucht den Zerfall eines  $\tau$ -Mesons in drei  $\pi$ -Mesonen.  
→ Das  $\tau - \theta$ -Puzzle

Bekannte Teilchen zu der damaligen Zeit:

$$e^+, e^-, p, n, \pi, \nu, \gamma, \theta, \tau, \Lambda$$

## Das $\tau - \theta$ -Puzzle

Gefundene Zerfälle:

$$\tau^+ = \pi^+ \pi^+ \pi^- \qquad \qquad \qquad 0^- \qquad \qquad (2)$$

$$\theta^+ = \pi^+ \pi^0 \qquad \qquad \qquad 0^+ \qquad \qquad (3)$$

Gemessen wurden identische Massen, Ladungen und Halbwertszeiten, obwohl die Teilchen unter Parität unterschiedlich transformieren.

$$\theta = \tau?$$

Zwei mögliche Erklärungen:

1. Zwei unterschiedliche Teilchen
2. Paritätsverletzung

- 1927 Eugene Paul Wigner führt die Quantenzahl der Parität ein (Erhaltungsgröße).
- ... Parität erweist sich als Erhaltungsgröße in der Nuklear- und Atomphysik (gemäß der gefundenen Auswahlregeln).
- 1954 R.H. Dalitz untersucht den Zerfall eines  $\tau$ -Mesons in drei  $\pi$ -Mesonen.  
→ Das  $\tau - \theta$ -Puzzle
- 1956 Tsung Dao Lee und Chen Ning Yang veröffentlichen ein Paper: Question of Parity Conservation in Weak Interactions [LY56].

Kleines Interview von Murray Gell-Mann bezüglich der Theorie von Lee und Yang [Sto]:

<https://www.youtube.com/watch?v=GuVxobozMiw>,

<https://www.youtube.com/watch?v=3Bd8b6uDjTg>.

## Vorgehensweise

Allgemeiner Ansatz: Mischzustände bei Paritätstransformation existieren. → Dies führt dazu, dass diese miteinander wechselwirken können.

→ Allgemeinster Hamiltonian (!)

Bilde eine Linearkombination aus fünf unterschiedlichen Anteilen:

- Skalare,
- Vektorielle,
- Tensorielle,
- Axiale,
- Pseudoskalare.

Jeder dieser Anteil, wird mit einer eigenen Kopplungskonstante versehen;  
für den paritätserhaltenden ( $C_i$ ) und -verletzenden ( $C'_i$ ) Fall.



## Aussagen und Annahmen des Papers

- Paritätsverletzung ist möglich
- Ausschließlich bei der schwachen Wechselwirkung
- Es existieren Paritätsmischzustände
- Mischungsgrad  $\mathcal{F}^2$  gering
- Wechselwirkung zwischen Mischzuständen  $\propto \mathcal{F}^2$
- Elektrisches Dipolmoment  
Genaueste Messung bis 1956 durch Purcell, Ramsey und Smith für das Neutron mit  $\mathcal{F}^2 < 3 \cdot 10^{-13}$   
→ Für den Nachweis der Paritätserhaltung wird eine Genauigkeit von  $\mathcal{F}^2 < 10^{-24}$  benötigt.

## Ergebnis der Überlegungen

- Interferenzterme mit den Konstanten der Paritätserhaltung ( $C_i$ ) und -verletzung ( $C_i'$ ). → Ein **Pseudoskalar** muss als Messgröße gewählt werden.
- Idee von T.D. Lee und C.N. Yang [LY56]: Messung der Winkelverteilung der Elektronen eines  $\beta$ -Zerfalls.

Ein Pseudoskalar wäre zum Beispiel:

$$S_p = \vec{p}_1 \cdot (\vec{p}_2 \times \vec{p}_3), \quad (4)$$

denn

$$\hat{P}S_p = -\vec{p}_1 \cdot (-\vec{p}_2 \times (-\vec{p}_3)) = -S_p \quad (5)$$

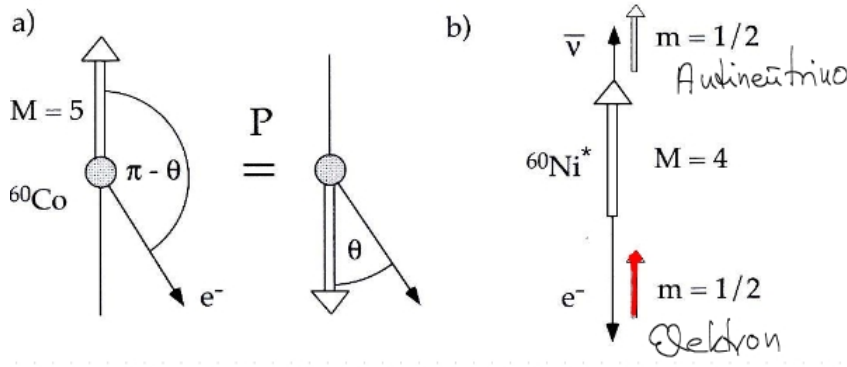


Abbildung: Darstellung eines Pseudoskalars [Den07].

## Mögliche Messgröße

Die Winkelverteilung der  $\beta$ -Strahlung [LY56]:

$$I(\theta)d\theta = (\text{constant})(1 + \alpha \cos(\theta)) \sin(\theta)d\theta \quad (6)$$

Dabei ist  $\alpha$  proportional zu dem Interferenzterm von  $C_i$  und  $C_i'$  und aus

$$\alpha = 2 \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} I(\theta)d\theta - \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} I(\theta)d\theta}{\int_0^{\pi} I(\theta)d\theta} \quad (7)$$

ermittelt werden.

## Das Wu-Experiment

- Wer: C-S. Wu mit Hilfe der Low Temperature Group
- Wann: Im Jahr 1956
- Wo: Am US National Bureau of Standards in Washington DC

## Chien-Shiung Wu ([Ead],[Swe])

- Geboren in China am 31. Mai 1912 und am 16. Februar 1997 gestorben
- Eine der wenigen bekannten Physikerinnen ihrer Zeit
- Arbeit: MIT, Princeton, Columbia, the Manhattan Project
- $\beta$ -Zerfall Untersuchung seit 1946

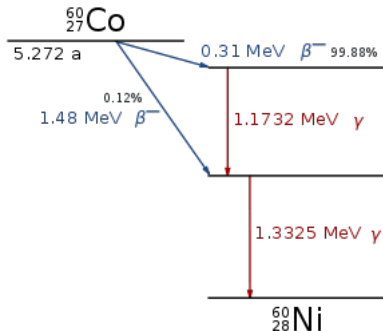


## Chien-Shiung Wu ([Ead],[Swe])

- Kein einziger Nobelpreis, dennoch: Wolf Prize (1978)
- Neun Monate and diesem Experiment gearbeitet - neben ihrem Job



## Konzept des Experiments I



Untersuchung des  $\beta$ -Zerfalls von Kobalt:



Abbildung: Zerfallschema von Kobalt ( $\text{Co}^{60}$ ) [18].



## Konzept des Experiments II

- Achsen des Systems: Spin des Mutterkerns
- Kernspinpolarisation
- Zerfall im Raum invertieren?
- Spin ist invariant unter P (vgl. Theoretische Grundlagen)
- Messgröße: Winkelverteilung der Emission der Elektronen
- Kontrollgröße:  $\gamma$ -Verteilung in horizontaler und vertikaler Ebene; werden vorzugsweise in Spin-Richtung emittiert.

## Erwartetes Ergebnis

Wenn die Parität erhalten wäre,  
würde für die Winkel

$$\phi_1 = \theta$$

$$\phi_2 = \pi - \theta$$

bei den jeweiligen Versuchsteilen  
ergeben.

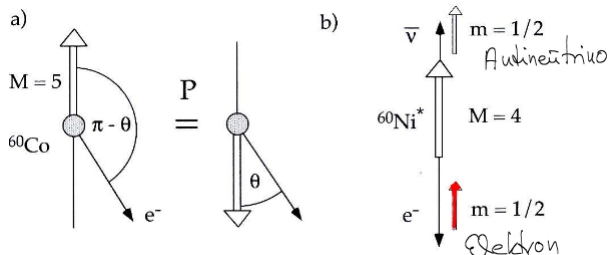


Abbildung: Erwartetes Ergebnis der beiden Messungen - Darstellung des Pseudoskalars [Den07].

## Herausforderung: Polarisation der Kerne bei niedriger Temperatur

Ausrichtung der Kerne ist notwendig, um die Achse dieser im Laborsystem festzulegen. Polarisation erfordert:

- Sehr geringe Temperaturen
- Starke Magnetfelder

→Rose-Gorter-Methode

## Rose-Gorter-Methode ([Gor48], [Ros49]) I

Revolutionär(!) (1948) Temperaturen bis zum Millikelvinbereich möglich.

Idee: Verwende die Hyperfeinstrukturkopplung unterschiedlicher paramagnetischer Salze.

Allgemein gilt nach Zeemann:

$$\Delta E = -mg_{\text{Co}}\mu_K B \quad (8)$$

Annahme: Thermisches Gleichgewicht.

Damit ergibt sich nach Boltzmann eine absolute Wahrscheinlichkeit für den Zustand m:

$$W(m) = \frac{\exp\left(\frac{-\Delta E_m}{k_b T}\right)}{\sum_{m=-l}^l \exp\left(\frac{-\Delta E_m}{k_b T}\right)} \quad (9)$$

Falls

$$\frac{|\Delta E_m|}{k_b T} \ll 1$$

gilt, sind alle Zustände gleichmäßig besetzt.

## Rose-Gorter-Methode ([Gor48], [Ros49] ) II

Forderung: Starke Besetzung eines einzelnen Zustands:

$$\frac{\mu H}{k_b T} \approx 1 \longrightarrow \frac{B}{T} \approx \frac{k_b}{g_{Co} \mu_K} \propto 10^3 \frac{T}{K}$$

Lösung: Verwende Kristall (CeMg-Nitrat)

Zwei solcher Salze werden benötigt, eines für die Ausrichtung, ein weiteres um einen guten thermischen Kontakt herzustellen, um die Abkühlung zu gewährleisten.

Schwaches äußeres Magnetfeld(0,01T) wird durch die Hüllenelektronen stark verstärkt (bis zu 1000 T).

Dennoch sehr geringe Temperatur notwendig.

## Realisierung der Abkühlung

TuS: Erster Hauptsatz der Thermodynamik

$$dU = TdS - pdV$$

- Kühlung des Salzes mit gasförmigen Helium
- Anlegen eines B-Feldes (entlang maximalem g-Faktor)
- Aufspaltung der Energieniveaus nach Zeemann, niedrigere werden besetzt.
- Wärmeabgabe an das Helium, da:  $dS < 0 \rightarrow dU < 0$
- Adiabatische Entmagnetisierung:
  - Das System wird thermisch isoliert ( $U = \text{const.}$ )
  - Das Magnetfeld nimmt ab
  - Die Energieaufspaltung wird geringer
  - $dS > 0$ , d.h. T muss abnehmen.

Mit dieser Methode können bis zu  $10^{-3}\text{K}$  erreicht werden.

## Lösungsansatz für die Polarisation und Ablauf

- Polarisation realisieren:
- Ein zusätzliches Magnetfeld  $\rightarrow$  Erwärmung
- Stattdessen: Anlegen eines Magnetfeldes entlang der Achse mit minimalem g-Faktor
  - Die Temperatur steigt minimal
  - Die Elektronen werden in der Hülle der Kobaltkerne polarisiert  $\rightarrow$  Starke Zunahme des B-Feldes in Kernnähe
  - Polarisationsgrad der Kerne erreicht bis zu 60 %

Ein hoher Polarisationsgrad und eine niedrige Temperatur werden zeitgleich realisiert.

### Versuchsschritte

- Nachweis der Kernspinpolarisation über die  $\gamma$ -Zähler
- Die Elektronen werden über den Szintillationskristall direkt über den Photomultiplier gemessen.
- Untergrund durch Compton-Streuung wird automatisch abgeschnitten (Kalibrierung der  $\gamma$ -Szintillatoren)

Dies wird für zwei entgegengesetzte Richtungen des Magnetfeldes ausgeführt.

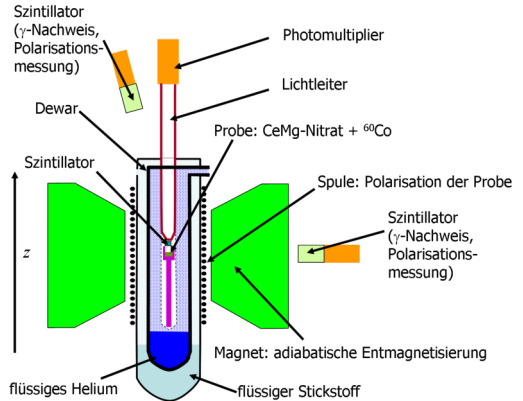
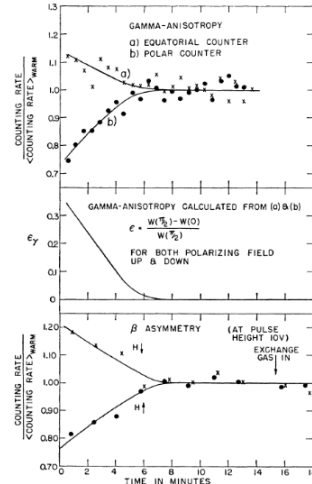


Abbildung: Aufbau des Experiments [Pen].



## Experimentelles Ergebnis

- Die Temperatur war niedrig genug (Kernspins signifikant polarisiert).
- Elektronenemission in Abhängigkeit des Kernspins gemessen.
- Einzelne Linien:
  - äquatorialer und polarer Zähler
  - nach unten bzw. nach oben gerichteter Kernspin



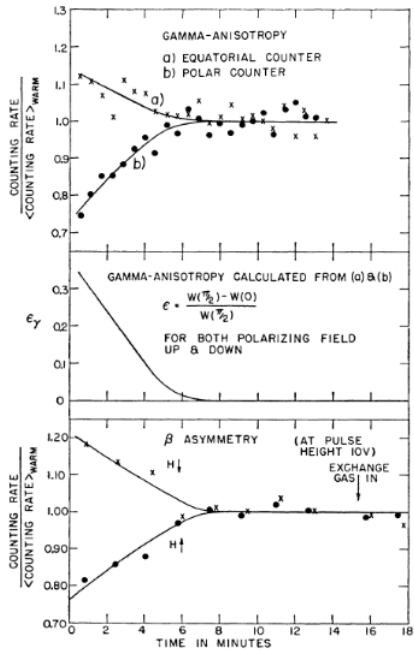


Abbildung: Messergebnisse des Wu-Experiments für beide Polarisationen des B-Feldes [Wu+57].

1. Kernspin  $Co^{60}$  - oben: Weniger Elektronen nach oben emittiert.
2. Kernspin  $Co^{60}$  - unten: Mehr Elektronen nach oben emittiert.

Schlussfolgerung: Die Parität ist bei der schwachen Wechselwirkung nicht erhalten!  
Sie wird maximal verletzt.

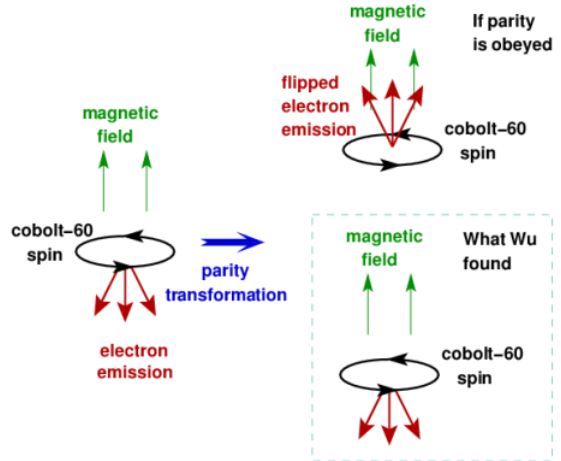


Abbildung: Reale und erwartete Ergebnisse - qualitativ [Fra14].

## Experiment von Garwin, Lederman und Weinrich ([GLW57])

"Confirmation of this proposal in form of preliminary result on  $\beta$ -decay of oriented nuclei by Wu et al. reached us before this experiment was begun."

## Zusammenfassung

- Problematik:  $\tau$ - $\theta$ -Puzzle - Was steckt hinter dem Zerfall?
- Vorschlag eines Experiments nach Lee und Yang
- Von Chien-Shiung Wu durchgeführt
- Ergebnis des Experiments: Die Parität wird bei der schwachen Wechselwirkung maximal verletzt.

Weitere Fragen um die 1960er:

- Mirror Matter
- CP-Verletzung
- CPT-Theorem

Mit späteren Erkenntnissen folgte:

- 1956/58 Gell-Mann, Sardashan, Marshak und Feynman: V-A-Theorie Die schwache Wechselwirkung koppelt nur an linkshändige Teilchen und rechtshändige Antiteilchen

$$\mathcal{L}_W = \mathcal{L}_{CC} + \mathcal{L}_{NC}$$

mit dem linkshändigen Strom:

$$J_L^\mu = \bar{u}\gamma^\mu \frac{1-\gamma^5}{2} u = \frac{1}{2} (\bar{u}\gamma^\mu u - \bar{u}\gamma^\mu \gamma^5 u) = \frac{1}{2} (J_V^\mu - J_A^\mu)$$

- 1961/67 Eichtheorie der schwachen Wechselwirkung
- 1983 Eichtheorie des Standardmodells

## Langrangedichte der schwachen Wechselwirkung

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_W &= \mathcal{L}_{CC} + \mathcal{L}_{NC} \\ \mathcal{L}_{NC} &= \frac{g}{\cos \theta_W} J_\mu^{NC} Z^\mu = \frac{g}{\cos \theta_W} (J_\mu^3 - \sin^2 \theta_W J_\mu^{em}) Z^\mu \\ \mathcal{L}_{CC} &= -\frac{g}{\sqrt{2}} \left[ (J_{d'u}^\mu)_L^+ + (J_{e\nu}^\mu)_L^+ \right] W_\mu^+ - \frac{g}{\sqrt{2}} \left[ (J_{ud'}^\mu)_L^- + (J_{\nu e}^\mu)_L^- \right] W_\mu^-\end{aligned}$$

mit dem linkshändigen Strom:

$$J_L^\mu = \bar{u} \gamma^\mu \frac{1 - \gamma^5}{2} u = \frac{1}{2} (\bar{u} \gamma^\mu u - \bar{u} \gamma^\mu \gamma^5 u) = \frac{1}{2} (J_V^\mu - J_A^\mu)$$

## Literaturverzeichnis I



Gammastrahlung. 31.10.2018. 2018. URL:  
<https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Gammastrahlung>.



G. Denninger. 4.4.5 Spins, Helizität, Parität. 2007. URL: [http://www.pi2.uni-stuttgart.de/official/g.denninger/KERN\\_2007/PASSWORT/PDF/paritaetsverletzung.pdf](http://www.pi2.uni-stuttgart.de/official/g.denninger/KERN_2007/PASSWORT/PDF/paritaetsverletzung.pdf).



Lara Ead. *Biography of Chien-Shiung Wu*. 31.10.2018. URL:  
<https://eadsl.wordpress.com/culture-site/biography-of-chien-shiung-wu/>.



Matthew Francis. *Madame Wu and the backward universe*. 31.10.2018. 2014. URL:  
<https://galileospendulum.org/2014/03/08/madame-wu-and-the-backward-universe/>.



Richard L Garwin, Leon M Lederman und Marcel Weinrich. "Observations of the failure of conservation of parity and charge conjugation in meson decays: the magnetic moment of the free muon". In: *Physical Review* 105.4 (1957), S. 1415.



CJ Gorter. "A new suggestion for aligning certain atomic nuclei". In: *Physica* 14 (1948), S. 504–504.



## Literaturverzeichnis II



P.J. Heinz. *The Curious Quantum World: Part 9 - Immortal Protons and the Decaying Strangeness of  $\Lambda^0$* . 31.10.2018. 2016. URL:  
<https://steemit.com/science/@pjheinz/the-curious-quantum-world-part-9>.



Tsung-Dao Lee und Chen-Ning Yang. "Question of parity conservation in weak interactions". In: *Physical Review* 104.1 (1956), S. 254.



Bild-frei Pen88 - Powerpoint-Drawing. 31.10.2018. URL:  
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?curid=7507004>.



ME Rose. "On the Production of Nuclear Polarization". In: *Physical Review* 75.1 (1949), S. 213.



Web of Stories - Life Stories Of Remarkable People. 28.10.2018. URL:  
<https://www.youtube.com/watch?v=GuVxobozMiw>.



Will Sweatman. *Biography of Chien-Shiung Wu*. 31.10.2018. URL:  
<https://hackaday.com/2017/09/28/there-is-no-parity-chien-shiung-wu/>.

## Literaturverzeichnis III



Chien-Shiung Wu et al. “Experimental test of parity conservation in beta decay”. In: *Physical Review* 105.4 (1957), S. 1413.