

Universität Heidelberg

Seminar: Schlüsselexperimente der
Teilchenphysik

Dozenten: Prof. Dr. Herrmann / Dr. Michel De
Cian

Referent: Felix Hahne

Datum: 27.11.15 WS 2015



Paritätsverletzung

Ist die Welt symmetrisch?

Die Frage der Paritätserhaltung.

„So if the laws of physics are symmetrical, we should find that if some demon were to sneak into all the physics laboratories and replace the word “right” for “left” in every book in which “right-hand rules” are given, and instead we were to use all “left-hand rules,” uniformly, then it should make no difference whatever in the physical laws.“

- Richard Feynman

Zur Frage der Paritätserhaltung

1. Was ist Parität?
2. Das Wu-Experiment
3. Folgerungen

1.1. Einige Erhaltungsgrößen

Symmetrioperation ist mit einer Erhaltungsgröße verbunden

- Noethertheorem kontinuierlicher Symmetrien:
 - Zeitverschiebung (Energie) $(t \rightarrow t + \Delta t)$
 - Ortsverschiebung (Impuls) $(\underline{x} \rightarrow \underline{x} + \Delta \underline{x})$
 - Rotation (Drehimpuls) $(\varphi \rightarrow \varphi + \Delta \varphi)$
- Erweitertes Noethertheorem diskreter Symmetrien:
 - Ladungsspiegelung (Teilchen $\leftrightarrow$ Antiteilchen)
 - Zeitumkehr $(t \leftrightarrow -t)$
 - Raumspiegelung $(\underline{r} \leftrightarrow -\underline{r})$

1.2. Paritätstransformation

Klassische Vorstellung:

- Physikalische Größe $A(\underline{r}) \rightarrow A(-\underline{r}) \equiv$ Spiegelung + 180° Drehung

$$A(-\underline{r}) = A(\underline{r}) \leftrightarrow \text{gerade Parität}$$

$$A(-\underline{r}) = -A(\underline{r}) \leftrightarrow \text{ungerade Parität}$$

- Beispiel: unsere Hände (ungerade Parität)

1.3. Paritätsoperator

Quantenmechanische Vorstellung

- Paritätsoperator und Wellenfunktion:

$$P \Psi(\underline{x}) = \Psi(-\underline{x}) ; \text{unitär } P^2 \Psi(\underline{x}) = \Psi(\underline{x})$$

Eigenwerte: $p = \pm 1$ "intrinsische / innere Parität"

- Wenn Wellenfunktion sphärische Symmetrie: Parität der Drehimpulseigenfunktionen ist $(-1)^L$ "äußere Parität"

→ Parität eines Mehrteilchensystems: innere x äußere Parität

1.4. Intrinsische Parität

Parität von Teilchen ist Konvention:

- Spin $\frac{1}{2}$ – Fermionen: $p = +1$ (p, n, e^- , $\bar{\mu}$, Quarks)
→ Antifermionen: $p = -1$
- Bosonen + Antibosonen gleiche Parität
- Andere Partikel (π^+ , K^+ , ...):
obige Konvention + Erhaltung der Parität in WW
→ meistens werden Experimente benötigt

1.4. Beispiel: Parität des Pions

Einfang des Pion eines Deuterium:



Wir wissen:

$$s(\pi) = 0 ; s(d) = 1 ; s(n) = \frac{1}{2} ; p(d) = 1$$

- Anfangszustand: $L = 0 \rightarrow J = 1$
 - Parität: $p(AZ) = p(d) \cdot p(\pi) \cdot (-1)^0 = p(\pi)$
- Endzustand: Wellenfunktion muss antisymmetrisch und $j = 1$
 - einziger Zustand ist ${}^3P_1 \rightarrow L = 1$
 - Parität: $p(EZ) = p(n) \cdot p(n) \cdot (-1)^L = -1$

$$p(\pi) = -1$$

1.5. Einige physikalische Größen

Unterscheide zwischen **skalaren**- und **vektoriellen** Größen:

→ Wie transformieren diese?

Polarskalare: $p = 1$

Pseudoskalare: $p = -1$

Polarvektoren: $p = -1$

Pseudo-/Axialvektoren: $p = 1$

<i>Gerade</i>	<i>Ungerade</i>
Zeit t	Helizität h
Masse m	Ortsvektor $\underline{r}$
Drehimpuls $\underline{L}$	Geschwindigkeit $\underline{v}$
magn. Feld $\underline{B}$	Kraft $\underline{F}$
Magnetisierung $\underline{M}$	el. Feld $\underline{E}$

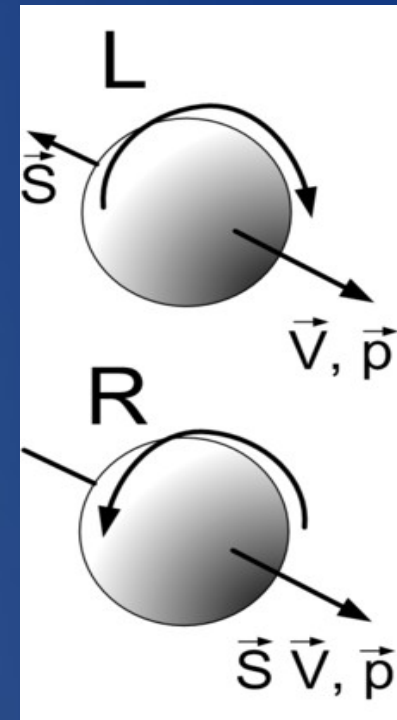
1.6. Helizität

Helizität: $h = \underline{s} \cdot \underline{p} / |\underline{s}| \cdot |\underline{p}|$

Werte: $h = \pm 1$

linkshändig: -1 rechtshändig: +1

→ Gibt Schraubensinn an



Wikibooks.org

1.7. Paritätserhaltung

- Phys. Gesetz unter Paritätstransformation erhalten
- Q.M.: erhalten, wenn Kommutator mit wechselwirkendem Hamiltonian H verschwindet

$$[H, P] = 0$$

- K.M.: räumlich gespiegelter Prozess ununterscheidbar von seinem Ursprungsprozess

1.8. Das $\theta - \tau$ - Puzzle

- Zerfall von zwei K^+ -Mesonen unter schwacher Wechselwirkung

$$\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$$

$$\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$

Aber:

beide Kaonen scheinen
ununterscheidbar zu sein
bis auf ihre Parität!

- Parität des Pion: $p(\pi) = -1$

$$p(\theta^+) = (-1)(-1) = 1$$

$$p(\tau^+) = (-1)(-1)(-1) = -1$$

$$M \approx 500 \text{ MeV}/c^2$$

$$q^{\text{el}} = 1e$$

$$\tau \approx 1,2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

1.8. Das $\theta - \tau$ - Puzzle

Zwei Alternativen für das Dilemma:

1. Zwei verschiedene Teilchen
2. Parität nicht erhalten

Yang



Lee



Lee und Yang:

[Wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)

fehlende experimentelle Überprüfung der Paritätserhaltung in schwacher Wechselwirkung + Vorschlag von Experimenten

2.1. Das Wu-Experiment

- Chien-Shiung Wu mit einer amerikanischen Tieftemperaturgruppe im Jahr 1956
- Betrachteten vorgeschlagenen β^- – Zerfall von ^{60}Co



Britannica.com

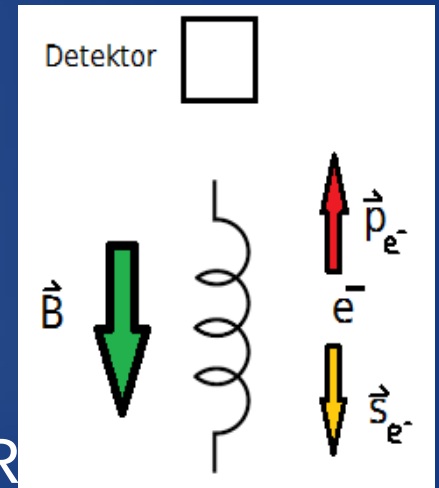


2.2. Idee des Versuchs

- Ausrichtung **magnetischer Momente** der ^{60}Co -Kerne parallel zum Magnetfeld (z-Achse): $\underline{\mu} \parallel \underline{B}$
- Drehimpulserhaltung**: z-Spin der e^- und $\bar{\nu}_e$ parallel zu dem des Mutterkerns $\rightarrow$ B-Feld legt Spinrichtung der e^- fest!

$$\underline{\mu} \parallel \underline{l} \parallel \underline{s}_e \parallel \underline{B}$$

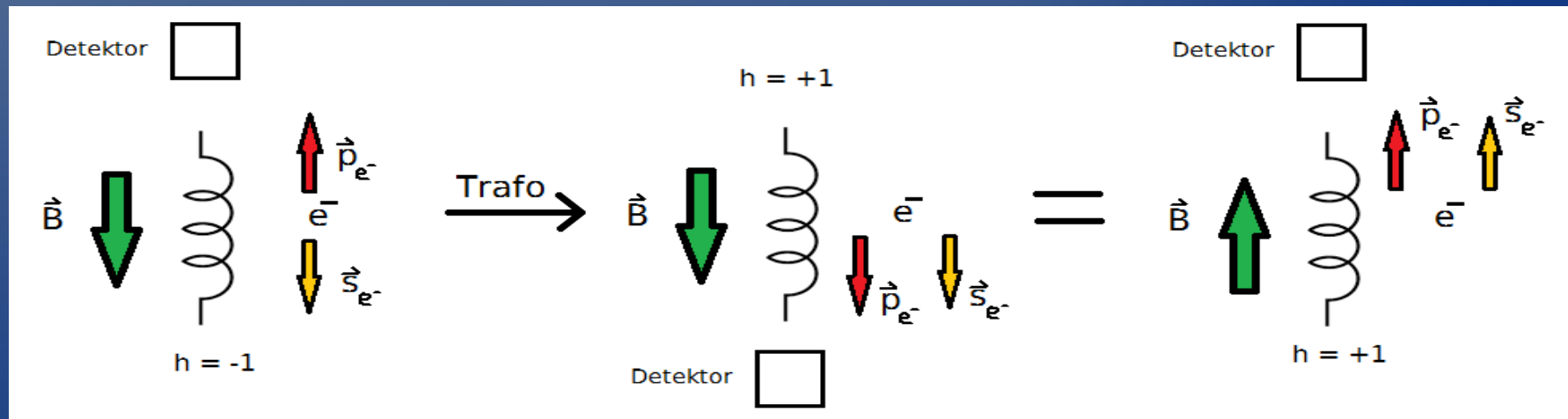
- Messe e^- -Emission in **negative** z-Richtung
- Pole Spule um: messe e^- -Emission in **positive** z-Richtung



2.2. Idee des Versuchs

Wieso funktioniert das?

- Umpolung des Magnetfeldes entspricht Raumspiegelung:
polarer Impulsvektor $\vec{p}$ dreht sich um, **axiales** Magnetfeld $\vec{B}$ bleibt
- linkshändig $\rightarrow$ rechtshändig
- Wenn Parität erhalten $\leftrightarrow$ **gleiche** Zählrate!



2.3. Schwierigkeiten und tatsächlicher Aufbau

- Wollen möglichst viele $^{60}\text{Co}(5)$ -Kerne durch die Spule polarisieren
→ Magnetisierung $M \sim B / T$
- Adiabatische Entmagnetisierung:
 1. Richte magn. Momente durch starkes B-Feld (2,3T) aus
→ Ordnung steigt / Entropie sinkt
 2. Schalte Magnetfeld unter Wärmeisolation langsam ab
(adiabatisch, $S^{\text{TOT}} = \text{const.}$)
→ Entzug thermischer Energie zur Aufbrechung magn. Dipolordnung
 3. Damit wurde $T = 3\text{mK}$ und dadurch eine Polarisierbarkeit von 60% erreicht

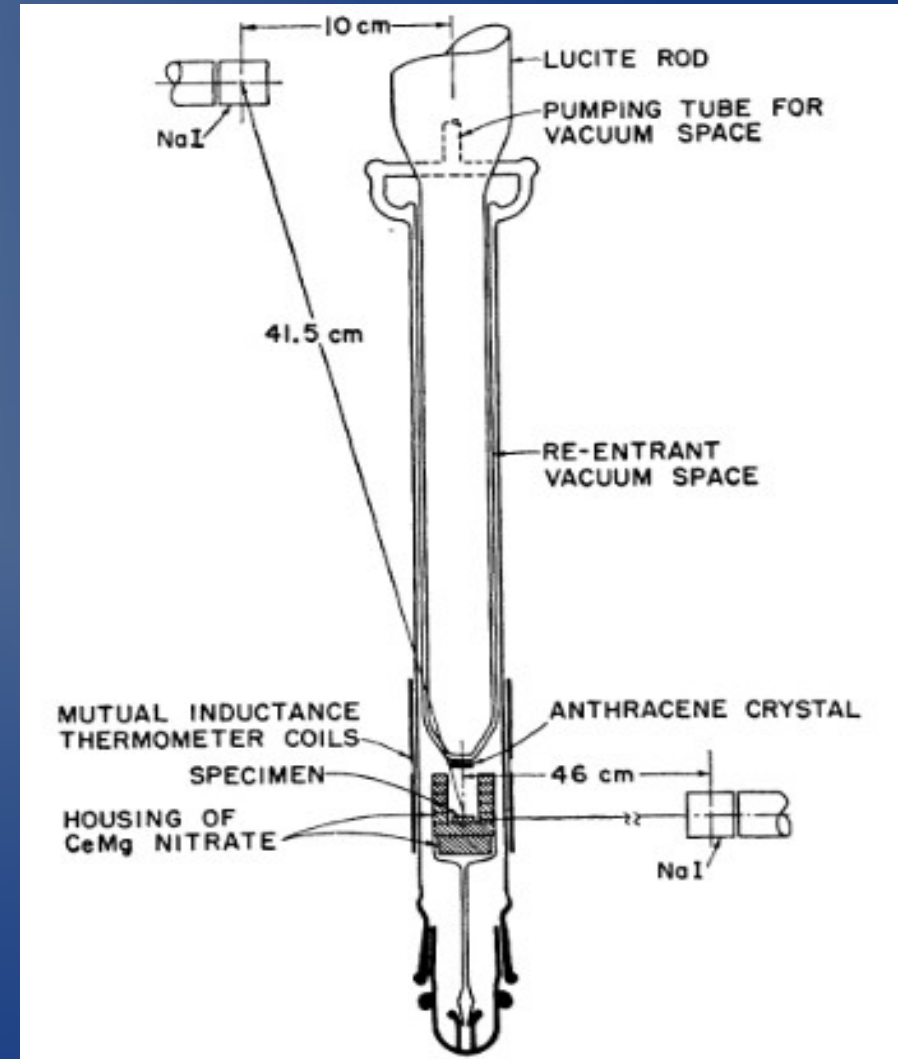
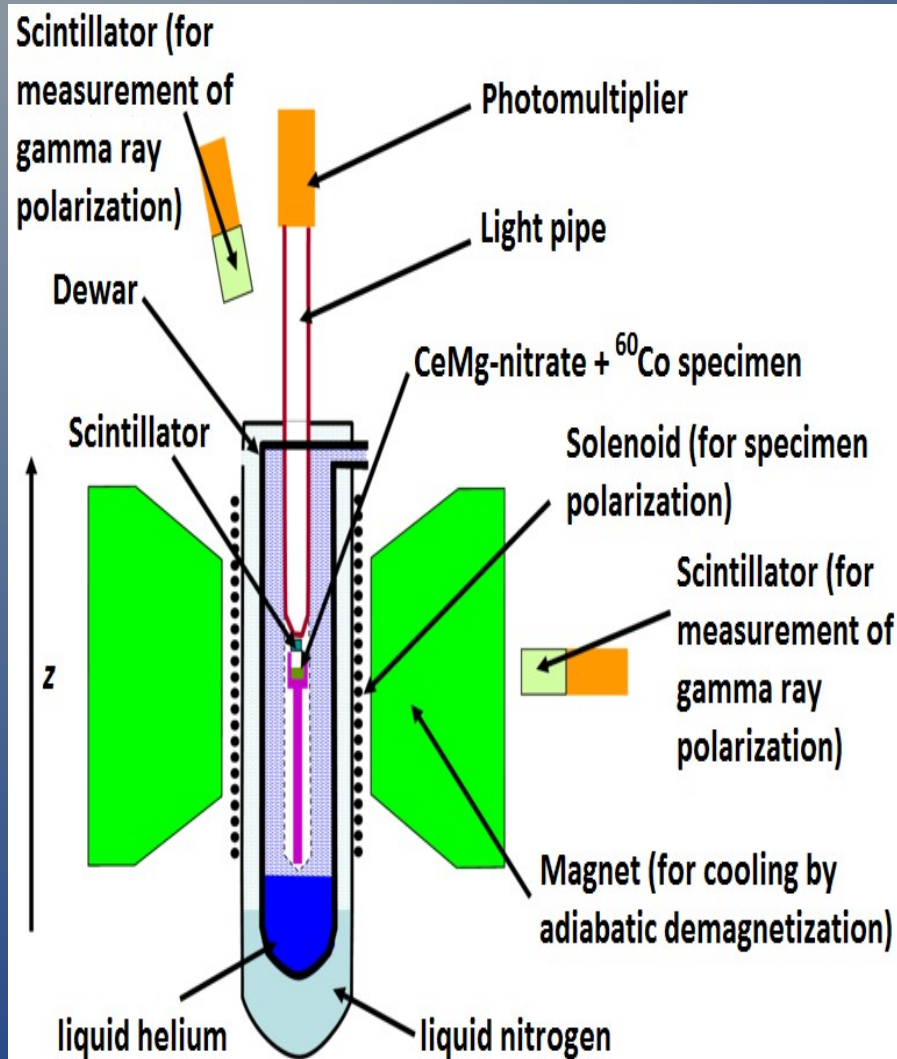
2.3. Schwierigkeiten und tatsächlicher Aufbau

Polarisierbarkeit über Detektion von γ -Partikeln analysierbar:



- Emission der Photonen von polarisierten ${}^{60}\text{Co}(5)$ ist **anisotrop**:
 - direkter Zusammenhang der Emissionsrichtung zur Polarisierbarkeit
- Emissionsraumverteilung war bekannt: Aufstellen zweier Szintillatoren (maximale & minimale Wahrsch.)

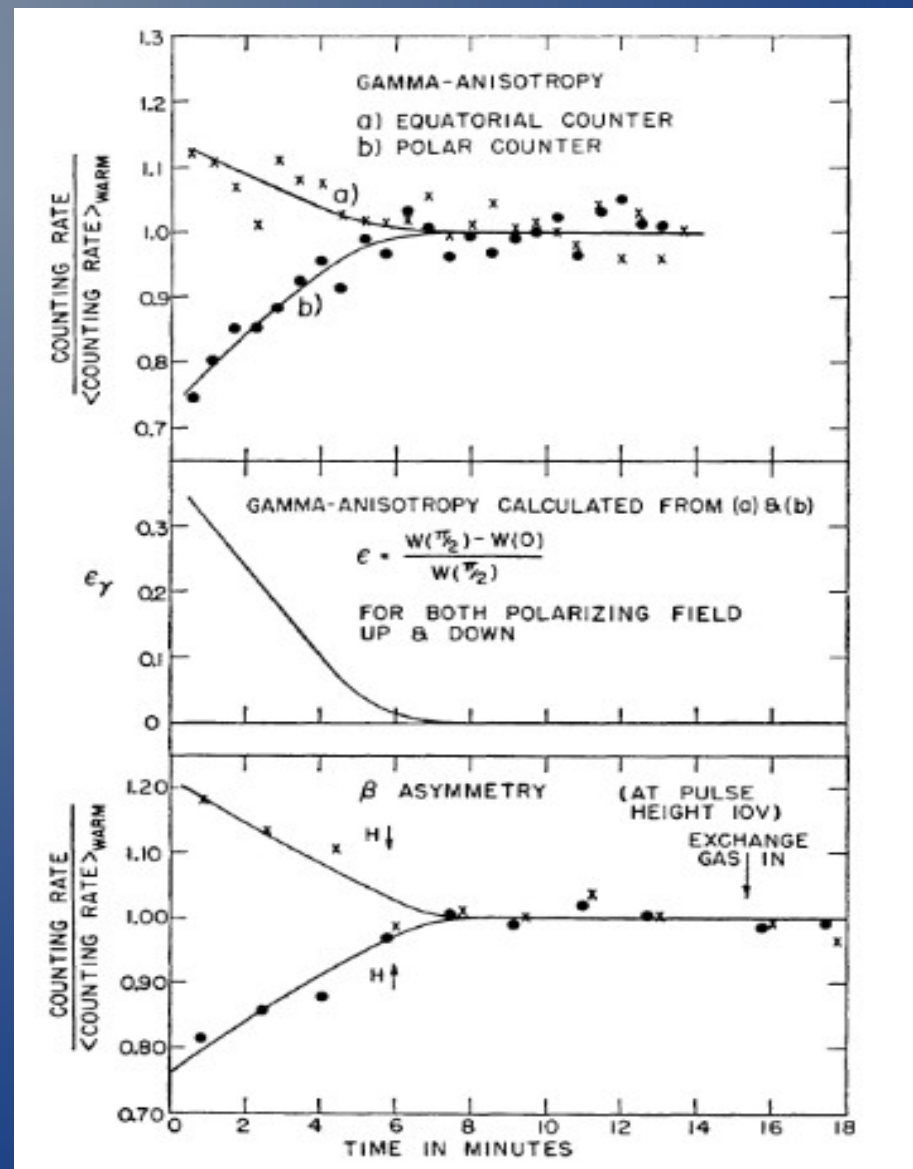
2.3. Schwierigkeiten und tatsächlicher Aufbau



2.4. Erwartungen

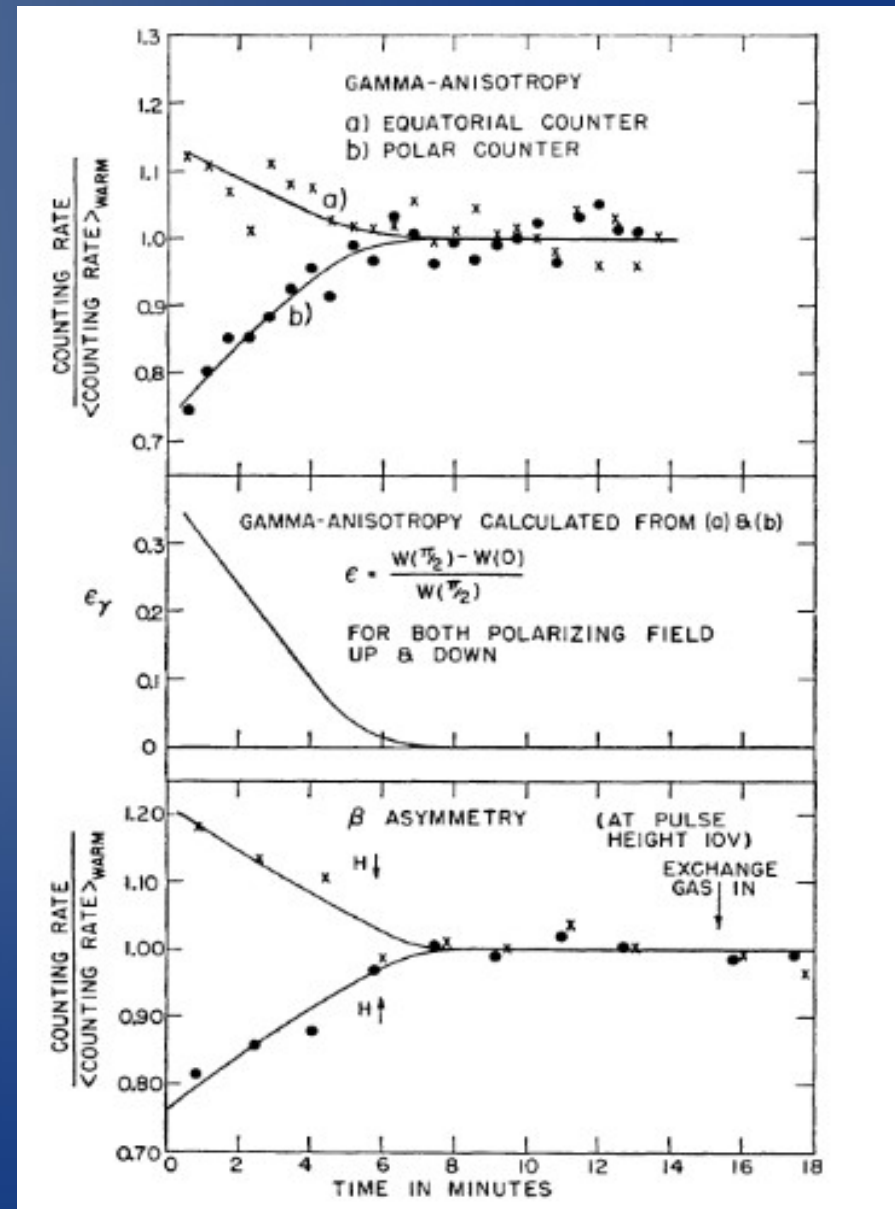
- Wenig Glaube an Symmetrieverletzung
- „Ich glaube nicht, dass der Herr ein schwacher Linkshänder ist, und ich bin bereit, eine sehr hohe Summe zu wetten, dass die Versuche symmetrische Ergebnisse liefern.“
 - Wolfgang Pauli
- „Ich las sie (Kopie des Papers). Ich las sie zweimal. Ich sagte: `das ist sehr interessant` oder dergleichen. Aber ich hatte nicht die Vorstellungskraft zu sagen: `Donnerwetter, wenn das wahr ist, eröffnet es einen ganz neuen Zweig der Physik!`“
 - Freeman J. Dyson

2.5. Messergebnisse



2.6. Was bedeutet das jetzt?

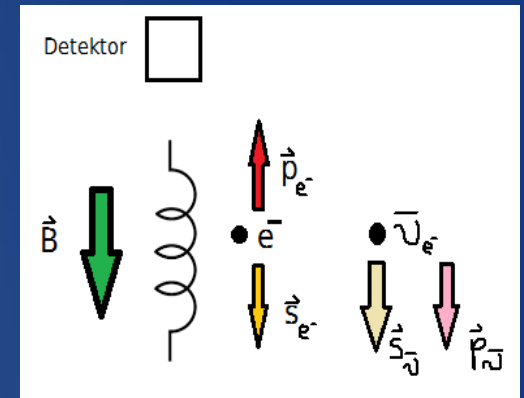
- In Richtung von B:
~33% **weniger** Emission
(rechtshändig)
- Gegen Richtung von B:
~ 33% **mehr** Emission
(linkshändig)
- → Bevorzugte linkshändige Emission
- → Keine Erhaltung der Parität bei schwacher WW



3.1. Eine „etwas genauere“ Analyse

- Goldhaber Experiment (1957):

$$h(\text{Neutrino}) = -1 \quad h(\text{Antineutrino}) = 1$$



Betrachte s_z mit B-Feld als Quantisierungsachse:



- Antineutrino hat $\underline{p} \parallel \underline{B}$
- Impulserhaltung $\rightarrow$ Elektron hat $-\underline{p} \parallel \underline{B}$ antiparallel

$\rightarrow$ allg.: Elektronen sind **linkshändig** in schwachen Zerfällen

3.2. Folgerungen

- Innerhalb kurzer Zeit viele weitere experimentelle Befunde der Paritätsverletzung
- Nobelpreis für Lee und Yang
- Krempelt Gedankengang um:
 - Natur nicht immer symmetrisch!
- Spiegelsymmetrie keine „reine Symmetrie“

3.3. Quellen

Lee, T. D.; Yang, C. N. (1956). "Question of Parity Conservation in Weak Interactions". *Physical Review* 104 (1): 254–258

Wu, C. S.; Ambler, E; Hayward, R. W.; Hoppes, D. D.; Hudson, R. P. (1957). "Experimental Test of Parity Conservation in Beta Decay". *Physical Review* 105 (4): 1413–1415

www.physics.ohio-state.edu/~kass/P780_L6_sp03.ppt

http://www.ikp.tu-darmstadt.de/media/ikp/lehre_ikp/fpraktikum_anleitungen/vers27.pdf

<http://www.physik.uni-bielefeld.de/~yorks/pro13/v7.pdf>

<http://ccreweb.org/documents/parity/parity.html>

<http://www.spektrum.de/lexikon/physik/paritaet/10923>

http://www.solstice.de/grundl_d_tph/sm_ww/sm_ww_sch8a.html

https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_refrigeration

http://quantummechanics.ucsd.edu/ph130a/130_notes/node323.html