

# Wu Experiment

Entdeckung der Paritätsverletzung



Seminarvortrag von Max Lamparth; 12. Dezember 2014



# Gliederung

- 1) Theoretische Grundlagen
- 2) Historischer Hintergrund und Motivation
- 3) Konzept des Experiments
- 4) Experimentelle Umsetzung
- 5) Messergebnisse
- 6) Interpretation und Folgen



# Gliederung

- **1) Theoretische Grundlagen**
- 2) Historischer Hintergrund und Motivation
- 3) Konzept des Experiments
- 4) Experimentelle Umsetzung
- 5) Messergebnisse
- 6) Interpretation und Folgen

# Theorie: Parität

Paritätsoperator **P**:

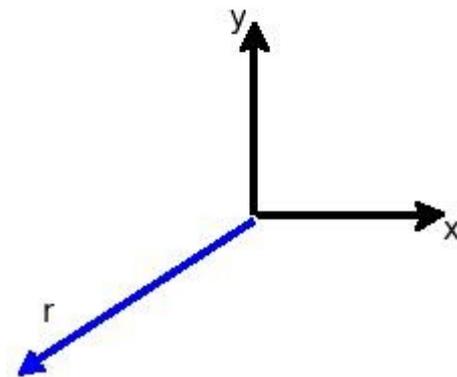
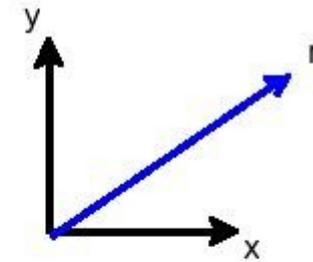
**Inversion** in allen Raumkoordinaten

$$\mathbf{P} (x, y, z) = (-x, -y, -z)$$

$$\mathbf{P} \psi(\vec{r}) = \psi(-\vec{r})$$

Eigenwerte +/- 1

→ Paritätsquantenzahl



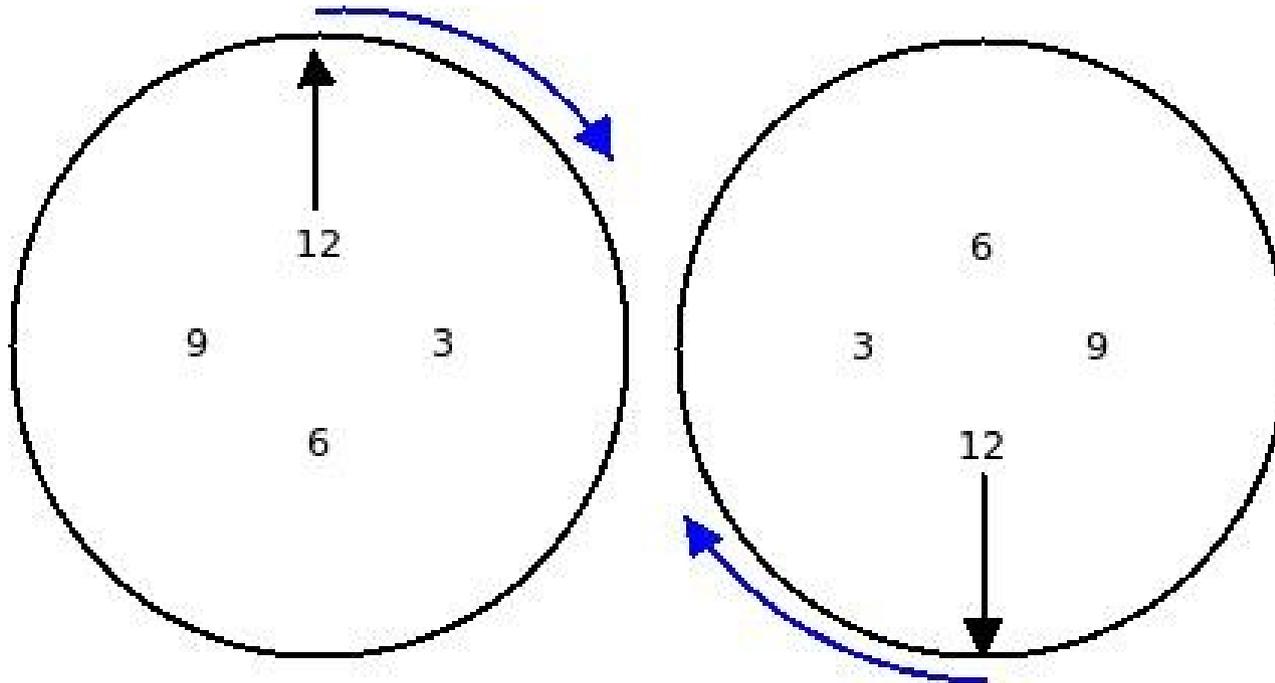
# Theorie: Parität

Wirkung von  $\mathbf{P}$  auf

- Impuls: 
$$\mathbf{P} \frac{\partial}{\partial \vec{x}} = - \frac{\partial}{\partial \vec{x}}$$
$$\mathbf{P} \vec{p} = -(-i\hbar \nabla) = -\vec{p}$$
- Drehimpuls: 
$$\mathbf{P} \vec{L} = (-\vec{x}) \times (-\vec{p}) = \vec{L}$$

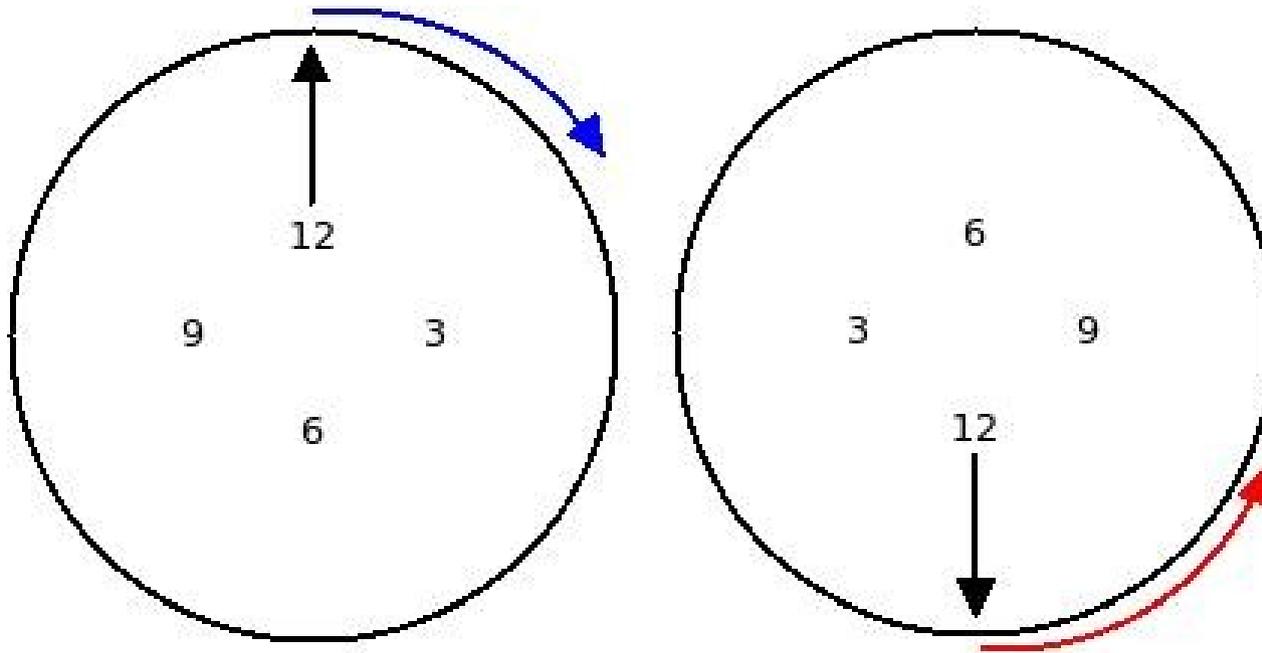
→ Drehimpuls erhalten → Spin erhalten
- Kugelflächenfunktionen: 
$$\mathbf{P} Y_{lm}(\theta, \varphi) = (-1^l) Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

# Theorie: Paritätserhaltung



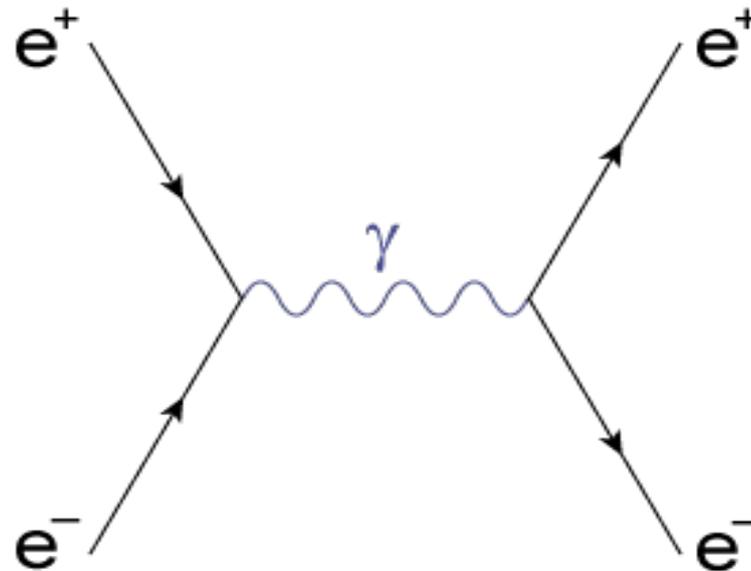
Messgröße  $\rightarrow$  Funktionsweise der Uhr

# Theorie: Paritätsverletzung



# Theorie: Beispiel für Parität

Betrachte Bsp. der  $e^-e^+$  Zerstrahlung/Paarbildung:



$$P(e^-)=1; P(e^+)=-1; P(\gamma)=-1 \quad P = (-1 * 1) \rightarrow -1 \rightarrow (-1 * 1)$$

# Gliederung

- 1) Theoretische Grundlagen
- 2) **Historischer Hintergrund und Motivation**
- 3) Konzept des Experiments
- 4) Experimentelle Umsetzung
- 5) Messergebnisse
- 6) Interpretation und Folgen



# Historischer Hintergrund und Motivation

1927:

Wigner führt Paritätsquantenzahl ein  
→ Erhaltungsgröße

1956: Lee & Yang

# Historischer Hintergrund und Motivation

$K^+$  - Zerfall „ $T - \theta$  - Puzzle“:

$$T \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^- \quad (P=-1)$$

$$\Theta \rightarrow \pi^+ + \pi^0 \quad (P= 1)$$

Messungen:

$$\begin{array}{lcl} m(T) & \sim & m(\theta) \\ Q(T) & \sim & Q(\theta) \\ \tau(T) & \sim & \tau(\theta) \end{array} \quad \rightarrow T = \theta ?$$

Falls Paritätserhaltung nicht gilt:

$$K^+ = T = \theta \text{ möglich}$$

# Historischer Hintergrund und Motivation

1927:

Wigner führt Paritätsquantenzahl ein  
→ Erhaltungsgröße

1956: Lee & Yang

- Kritik an Beweis für Paritätserhaltung
- Schlugen diverse Experimente vor, auch für  $\beta^-$  - Zerfall von  $^{60}\text{Co}$

# Historischer Hintergrund und Motivation

1957: Chien-Shiung Wu

- Führt Experiment durch
- Bestätigt Paritätsverletzung
- Lee & Yang Nobelpreis



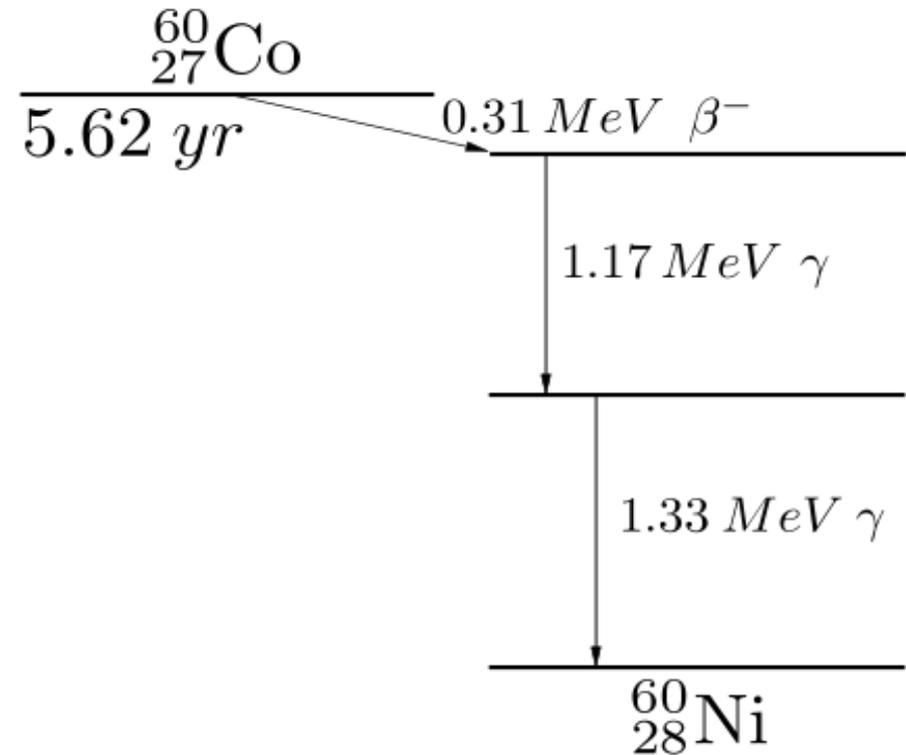
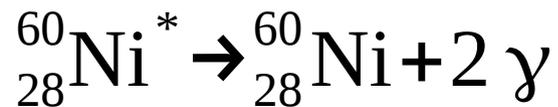


# Gliederung

- 1) Theoretische Grundlagen
- 2) Historischer Hintergrund und Motivation
- 3) **Konzept des Experiments**
- 4) Experimentelle Umsetzung
- 5) Messergebnisse
- 6) Interpretation und Folgen

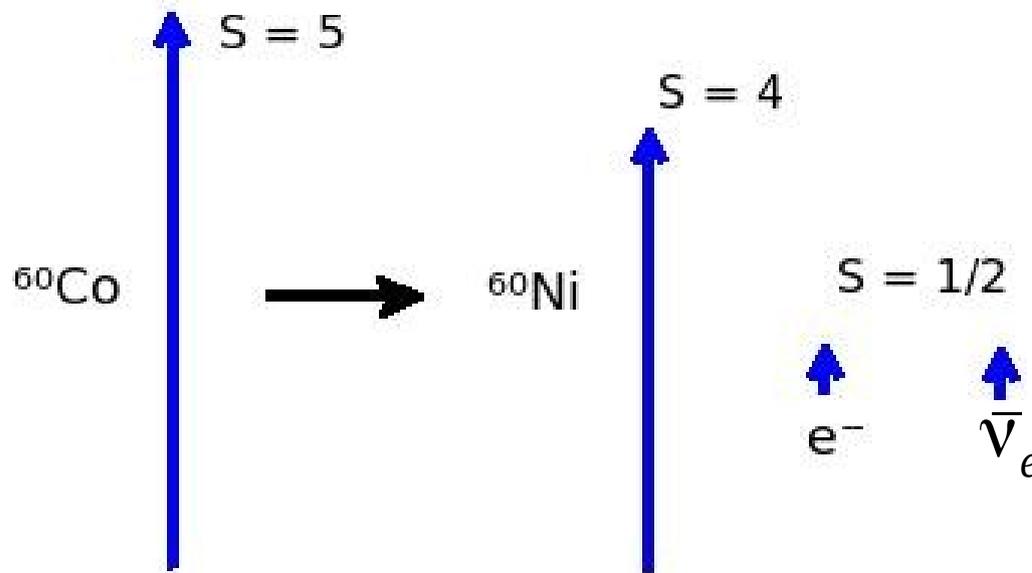
# Exp. Konzept: Zerfall von $^{60}\text{Co}$

$\beta^-$ -Zerfall von  $^{60}\text{Co}$ :

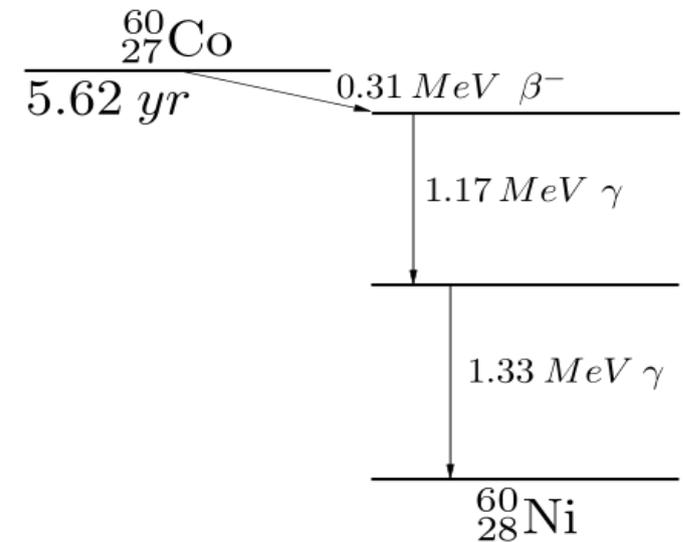


# Exp. Konzept: Zerfall von $^{60}\text{Co}$

Spin für Zerfall von  $^{60}\text{Co}$ :



$$S(^{60}\text{Co}) = +5 \rightarrow S(^{60}\text{Ni}^*) = +4; S(e^-) = +1/2; S(\bar{\nu}_e) = +1/2$$



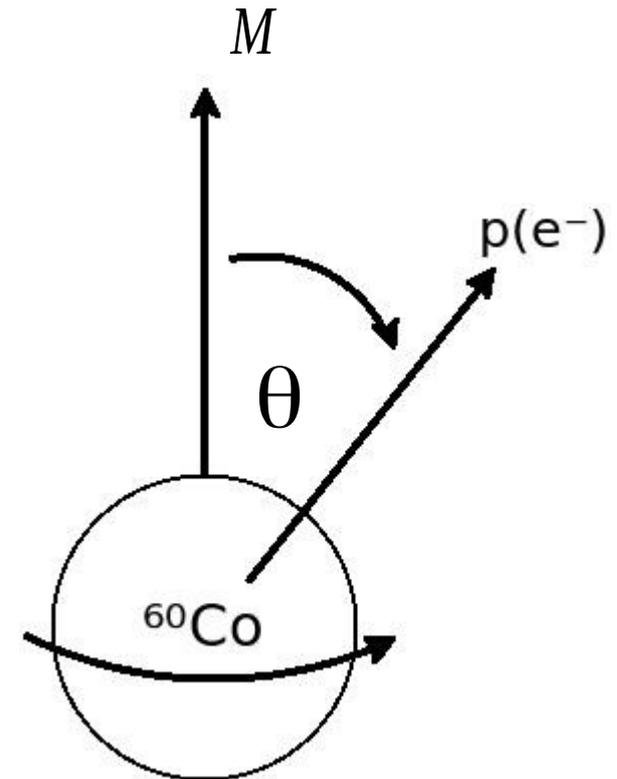
# Exp. Konzept: Paritätsmessung

- Systemeigene Koordinatenachse:

Spinvektor des  $^{60}\text{Co}$ -Kerns

→ Spinpolarisation

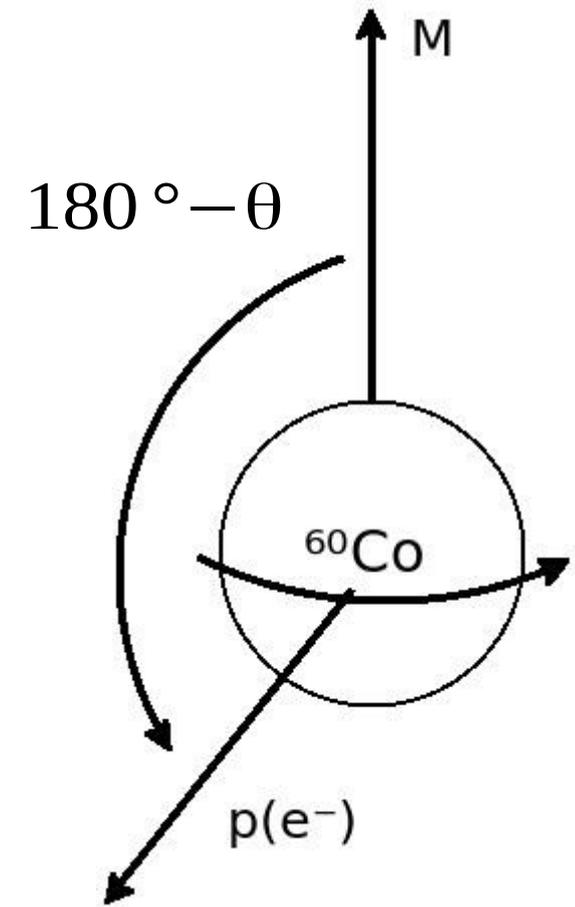
- Zerfall rauminvers ablaufen lassen?



# Exp. Konzept: Paritätsmessung

- Spin **invariant** unter **P**
- Messgröße:  
Winkelverteilung der  $e^-$
- Bei Paritätserhaltung:

$$W(\theta) = W(180^\circ - \theta) \quad \forall \theta \in [0, \pi]$$

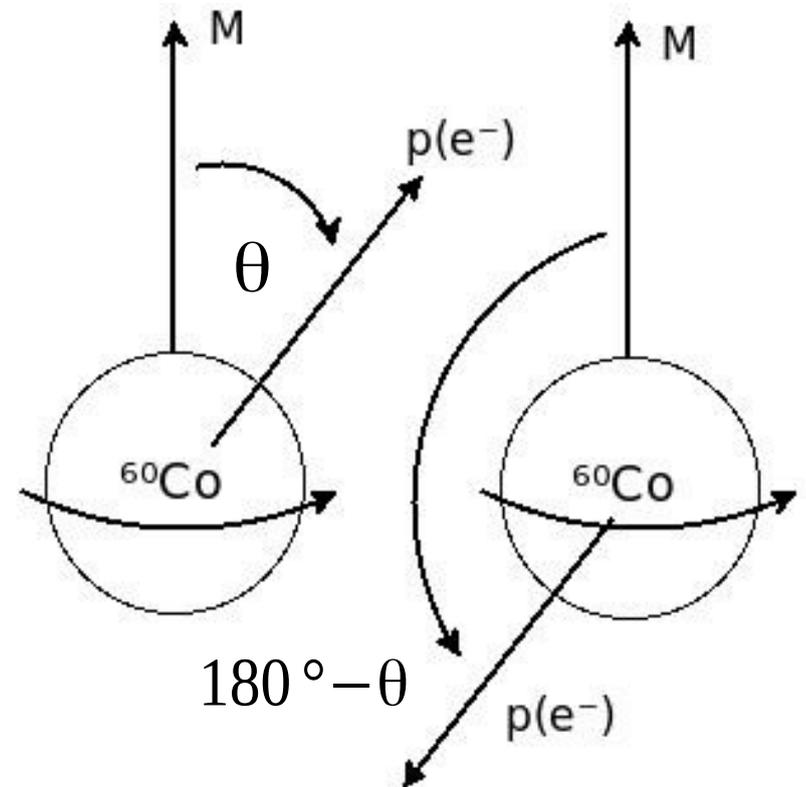


# Exp. Konzept: Paritätsmessung

- Falls Ungleichheit  
 $W(\theta) \neq W(180^\circ - \theta)$   
→ Parität nicht erhalten

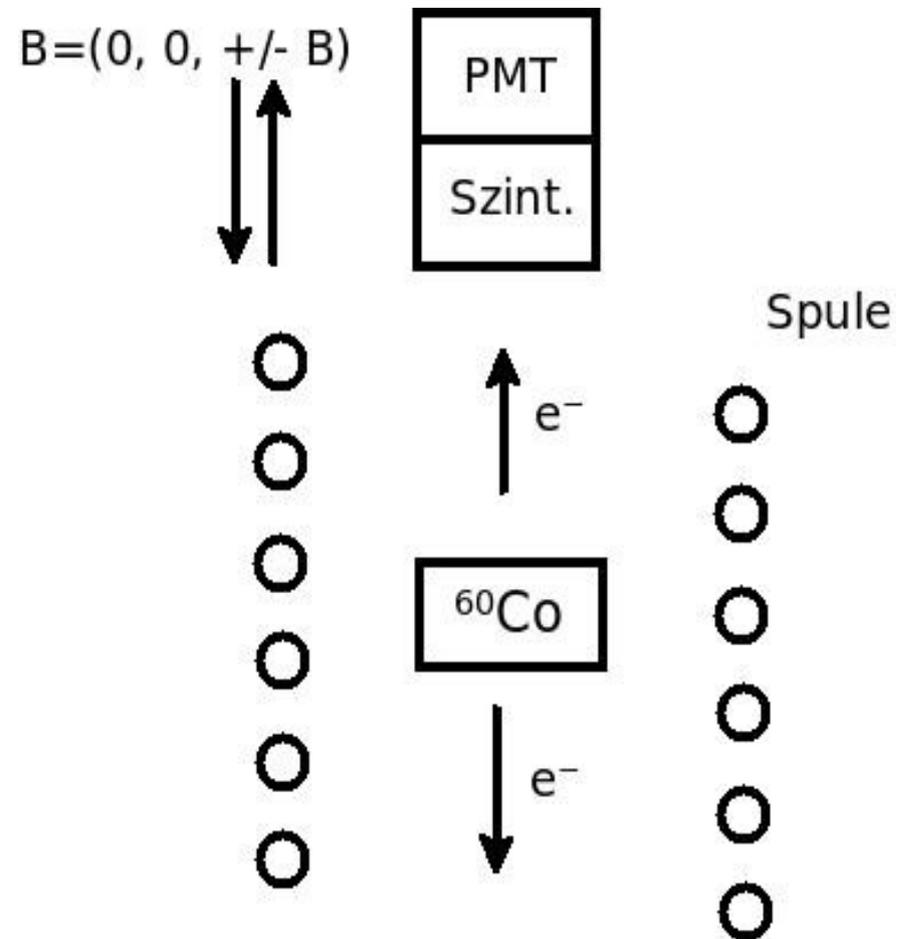
- Gemessene Winkel

$$\theta = 0^\circ \text{ und } \theta' = 180^\circ$$



# Exp. Konzept: Aufbau 1

- Kernspin mit Magnetfeld ausrichten (z-Richtung)
- Durch Zerfall emittierte  $e^-$  in Feldrichtung messen
- Feld umkehren (simuliert Paritätstransformation)
- $e^-$  nochmal in z-Richtung messen



## Exp. Konzept: Polarisation von $^{60}\text{Co}$

- Polarisationsgrad von  $^{60}\text{Co}$ ?
- Es gilt:  $\gamma$  werden vorzugsweise in **Spin-Richtung emittiert!**
- Für den Zerfall von Co gilt:

$$S(^{60}\text{Co}) = +5 \rightarrow S(^{60}\text{Ni}^*) = +4 ; S(e^-) = +1/2 ; S(\bar{\nu}) = +1/2$$

- Für die Abregung von Ni gilt:

$$S(^{60}_{28}\text{Ni}^*) = +4 \rightarrow S(^{60}_{28}\text{Ni}) = 0 ; 2 S(\gamma) = +1$$

→ Durch messen der  $\gamma$ -Verteilung in horizontaler und vertikaler Richtung lässt sich **Rückschluss auf Polarisation** der  $^{60}\text{Co}$ -Kerne ziehen.

# Exp. Konzept: Aufbau 2

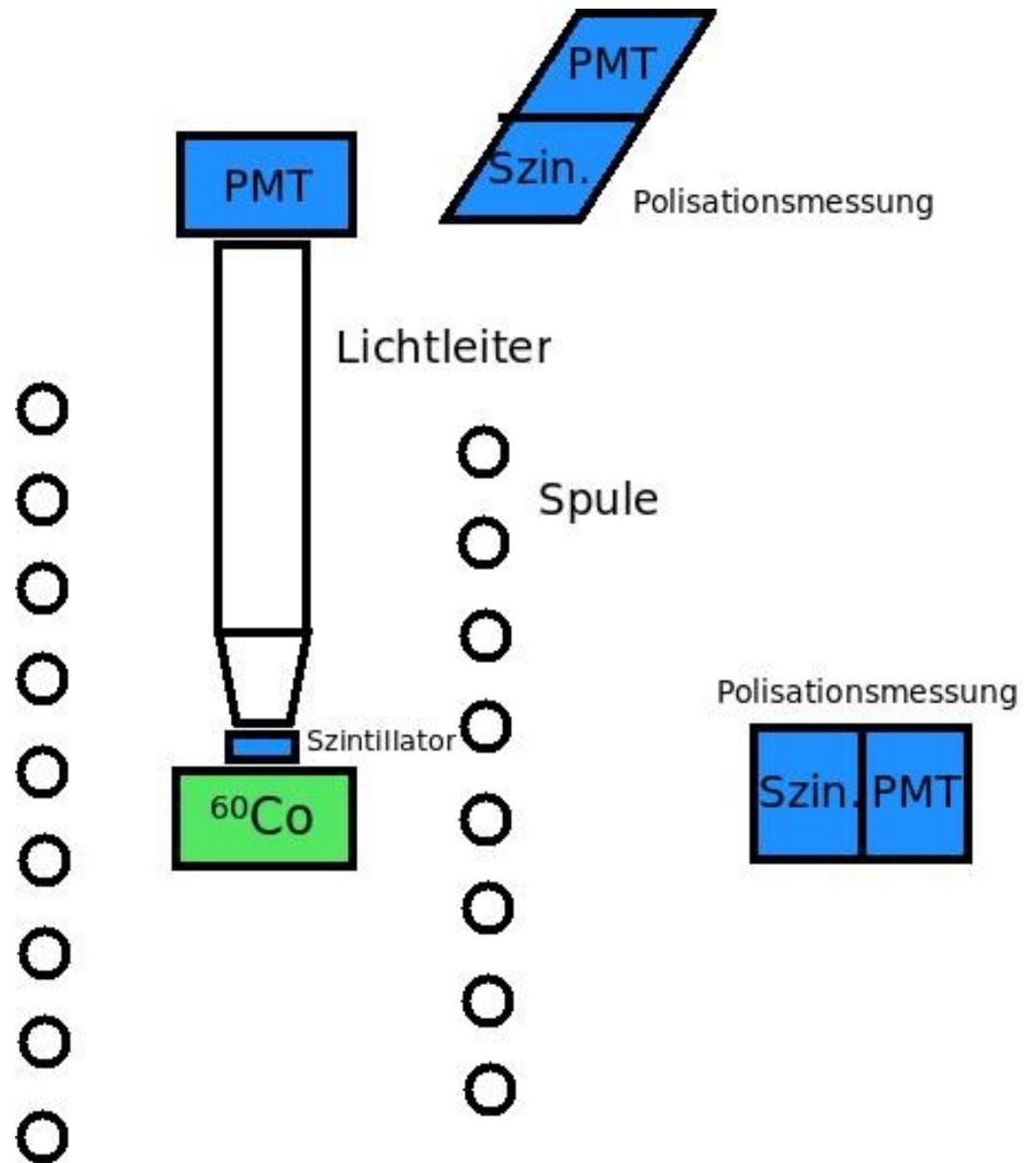
Messung der Polarisation der  $^{60}\text{Co}$  Kerne:

2 Detektoren

- einen äquatorial
- einen polar

→ Vergleich von gemessenen  $e^-$  und  $\gamma$

→ Rückschluss auf Parität



# Gliederung

- 1) Theoretische Grundlagen
- 2) Historischer Hintergrund und Motivation
- 3) Konzept des Experiments
- 4) **Experimentelle Umsetzung**
- 5) Messergebnisse
- 6) Interpretation und Folgen

# Exp. Umsetzung: Polarisation von $^{60}\text{Co}$

- In Praxis: Polarisation von  $^{60}\text{Co}$  sehr schwer!

Nach Zeemann gilt:  $\Delta E = -m g_{\text{Co}} \mu_K B$

im therm. GG nach Boltzmann:  $W(m) \propto \exp\left(\frac{-\Delta E_m}{k_B T}\right)$

Absolute Wahrscheinlichkeit  
für Zustand  $m$ :

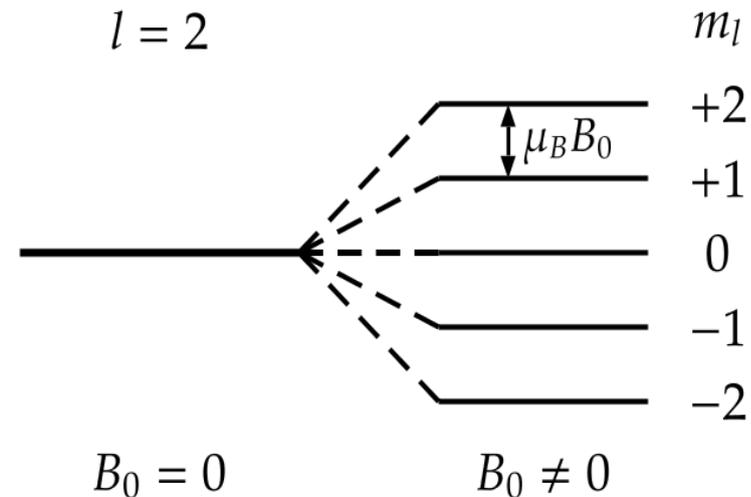
$$W(m) = \frac{\exp\left(\frac{-\Delta E_m}{k_B T}\right)}{\sum_{m=-l}^l \exp\left(\frac{-\Delta E_m}{k_B T}\right)}$$

→ für  $|\Delta E_m| \ll k_B T$  alle Zustände  
gleiche stark Besetzt

# Exp. Umsetzung: Polarisation von $^{60}\text{Co}$

- Für Spinausrichtung braucht man stark bevorzugte Besetzung

$$\Delta E = -m g_{\text{Co}} \mu_K B$$



- Für  $|\Delta E_m| = k_B T$  erhält man Polarisation von 88%

$$\rightarrow \frac{B}{T} \approx \frac{k_B}{g_{\text{Co}} \mu_K} = 2.73 \cdot 10^3 \frac{\text{T}}{\text{K}}$$

→ Mit  $B = 10 \text{ T}$  bräuchte man wenige mK!

## Exp. Umsetzung: starkes Magnetfeld

Lösung: verwende Kristall [ CeMg-Nitrat ]

- Leichtes äußeres B-Feld (0,01 – 0,1 T) wird durch Hüllenelektronen auf  $^{60}\text{Co}$  stark verstärkt  
→ Feldstärken von bis zu 1000 T in Kristallen möglich
- Dünne Lage von  $^{60}\text{Co}$  auf CeMg-Nitrat
- Temperatur, muss nach wie vor in  $10^{-2}$  bis  $10^{-3}$  Bereich [K] !

# Exp. Umsetzung: Adiabatische Entmagnetisierung

- Lösung: Adiabatische Entmagnetisierung  
(1926 von Debye vorgeschlagen)

Es gilt der 1. HS:  $dU = T dS - p dV$

– Isotherme Magnetisierung:

- paramagn. Salz wird durch He(g) gekühlt  $\sim 1\text{K}$
- Starkes Magnetfeld  $\rightarrow$  Energieniveaus spalten auf, niedrigere werden besetzt
- $dS < 0 \rightarrow dU < 0$ , He(g) nimmt Wärme auf

# Exp. Umsetzung: Adiabatische Entmagnetisierung

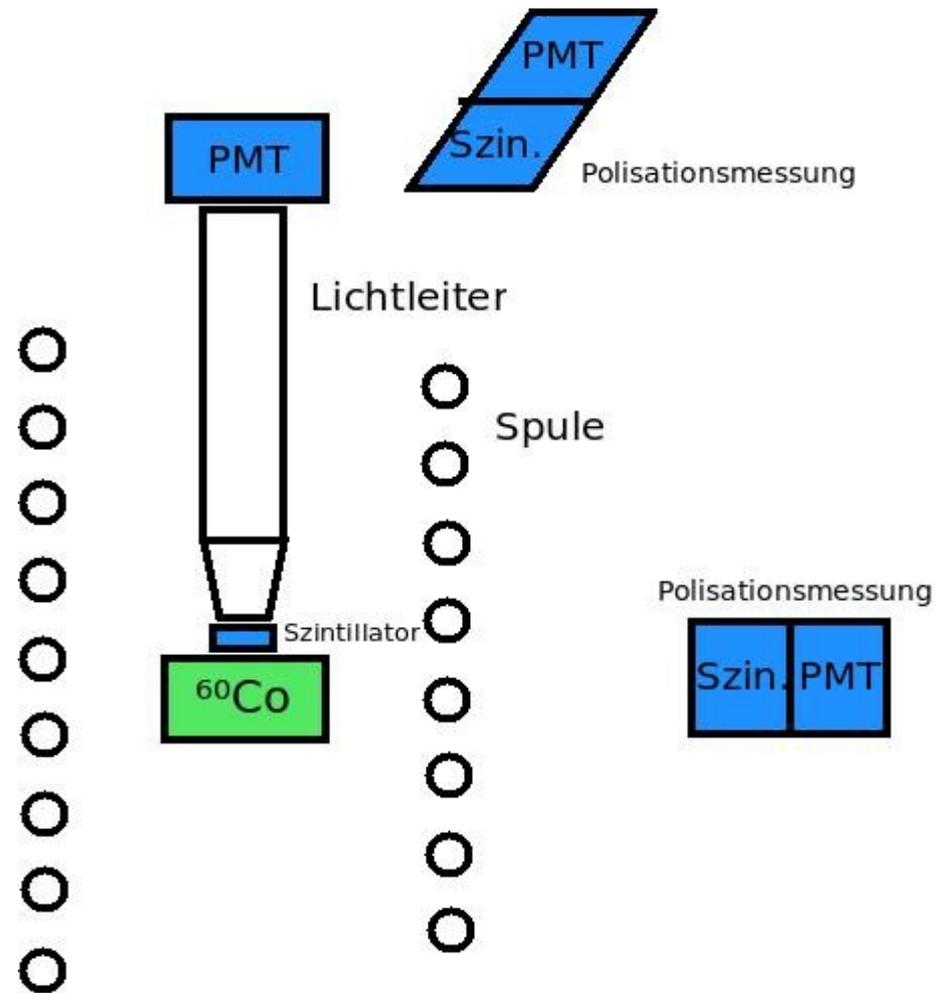
- Thermische Isolierung:
  - He(g) wird abgeführt
- Adiabatische Entmagnetisierung:
  - Magnetfeld langsam runter fahren
  - Energieaufspaltung wird kleiner
  - System besetzt höhere Niveaus, aber  $dU = \text{const.}$  aufgrund Isolation  
→  $dS > 0$  → T nimmt ab
- Hier ca. **0.003 K** erreichbar!

## Exp. Umsetzung: Kombination der Lösungen

- Braucht jedoch Feld zur Polarisation!
  - Magnetfeld würde zu Erwärmung führen
- Nutze Kristall mit **stark anisotropen g-Faktor**
$$\Delta E = -m g \mu_K B$$
  - in Polarisationsrichtung schwachen g Faktor, maximales g für Entmagnetisierung
  - fast kein Temperaturanstieg
  - **ausgerichtetes Feld bei niedriger Temperatur!**

# Exp. Umsetzung: Aufbau 3

- Aufbau aus Konzept:

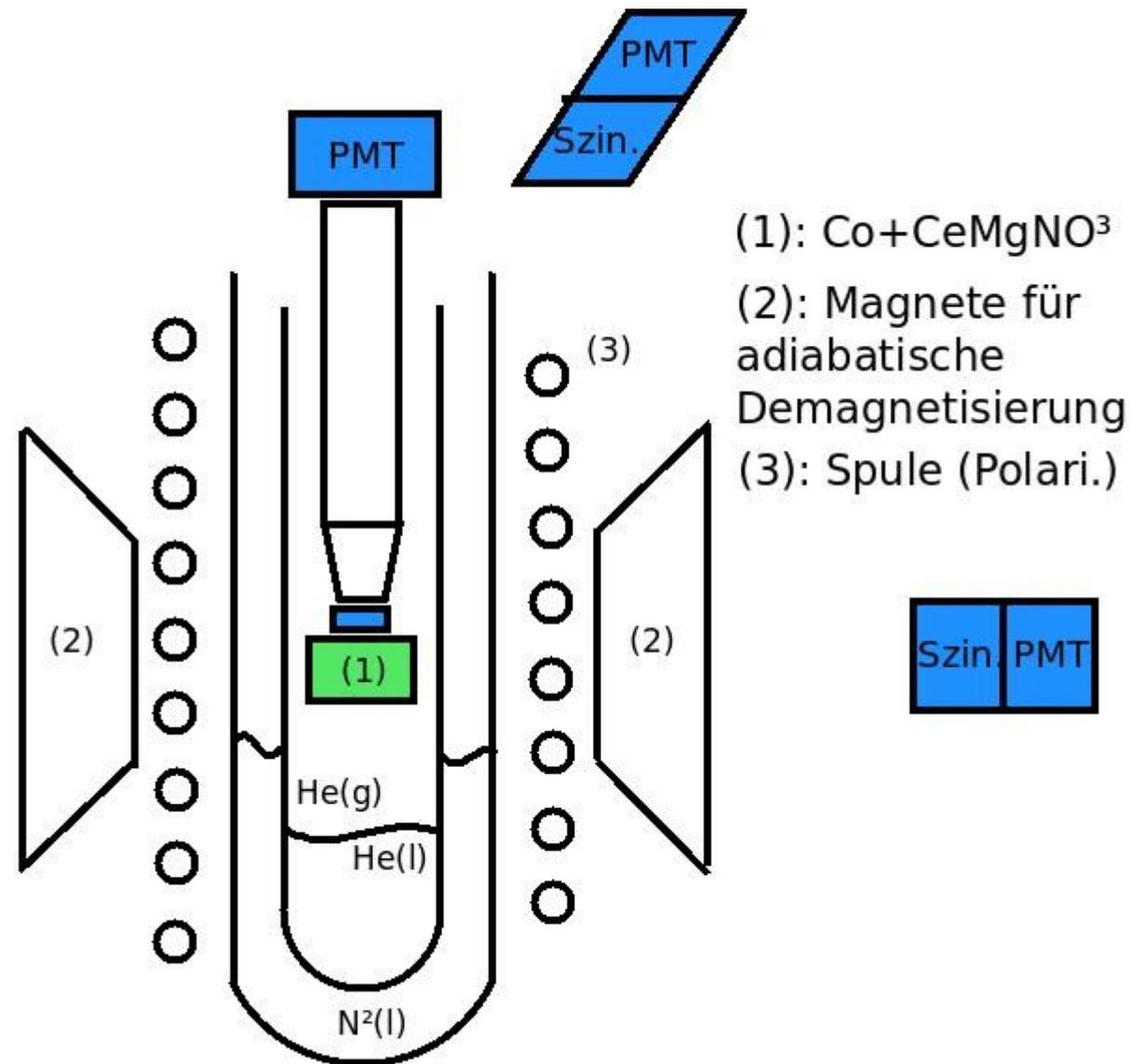


# Exp. Umsetzung: Aufbau 3

- Modifizierter Aufbau:

## Szintillatoren

- an Polarisationsmessern: NaJ-(Ti)
- bei  $^{60}\text{Co}$ : Anthrazen



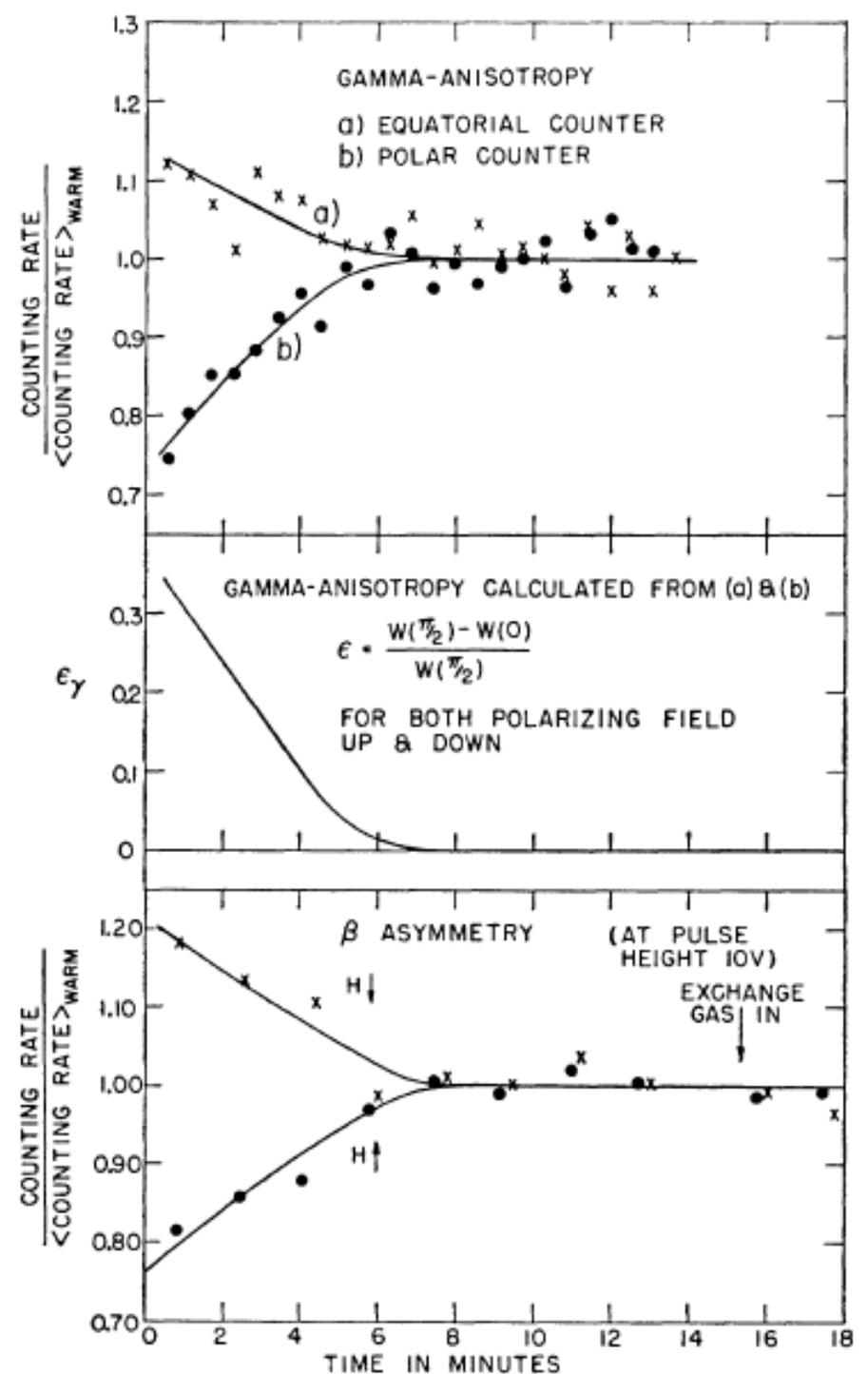


# Gliederung

- 1) Theoretische Grundlagen
- 2) Historischer Hintergrund und Motivation
- 3) Konzept des Experiments
- 4) Experimentelle Umsetzung
- 5) **Messergebnisse**
- 6) Interpretation und Folgen

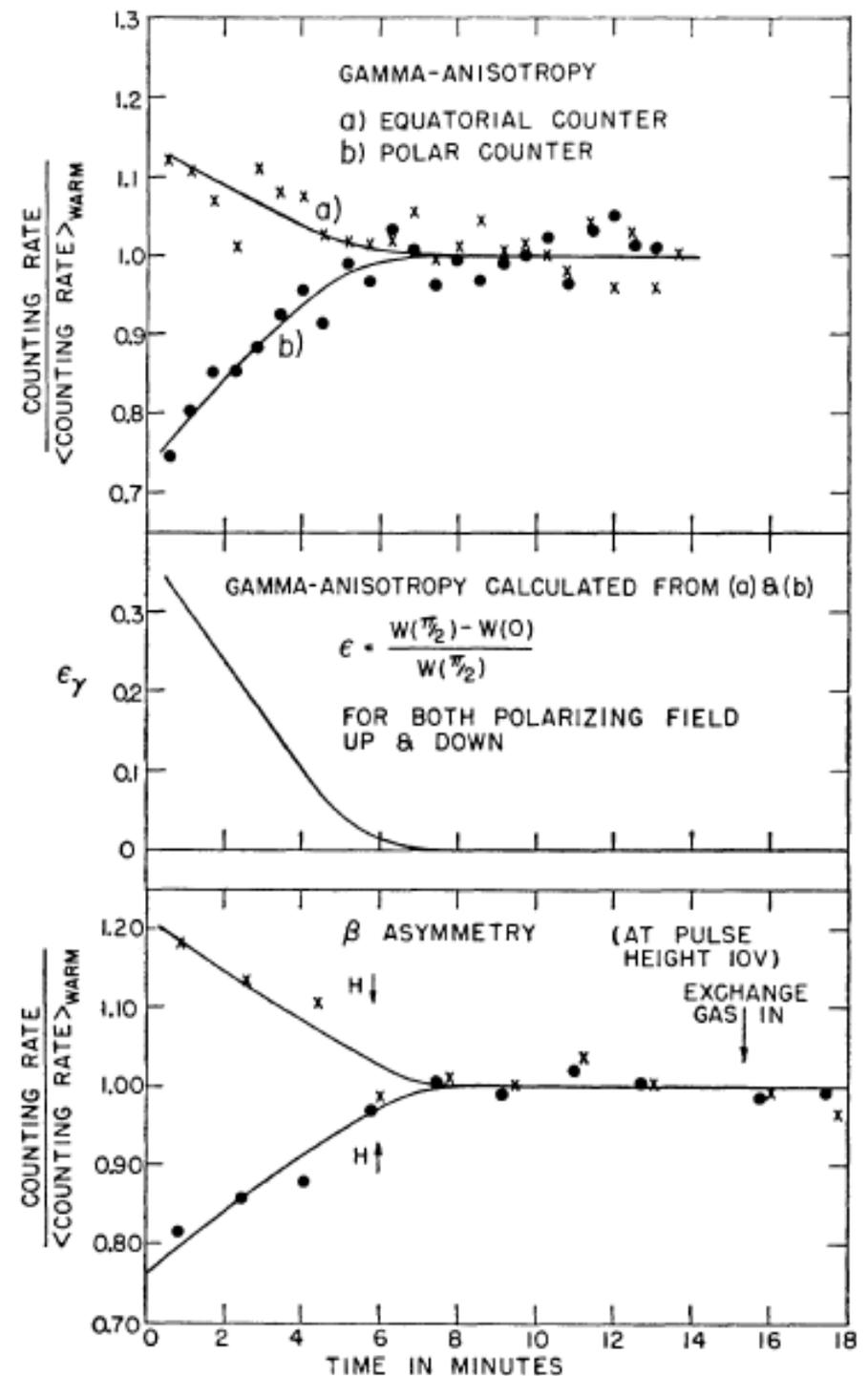
# Messergebnisse

- Es wird in Zyklen gemessen
  - Abkühlung
  - Polarisationsfeld
  - Messung während Erwärmung
  - Wiederholung



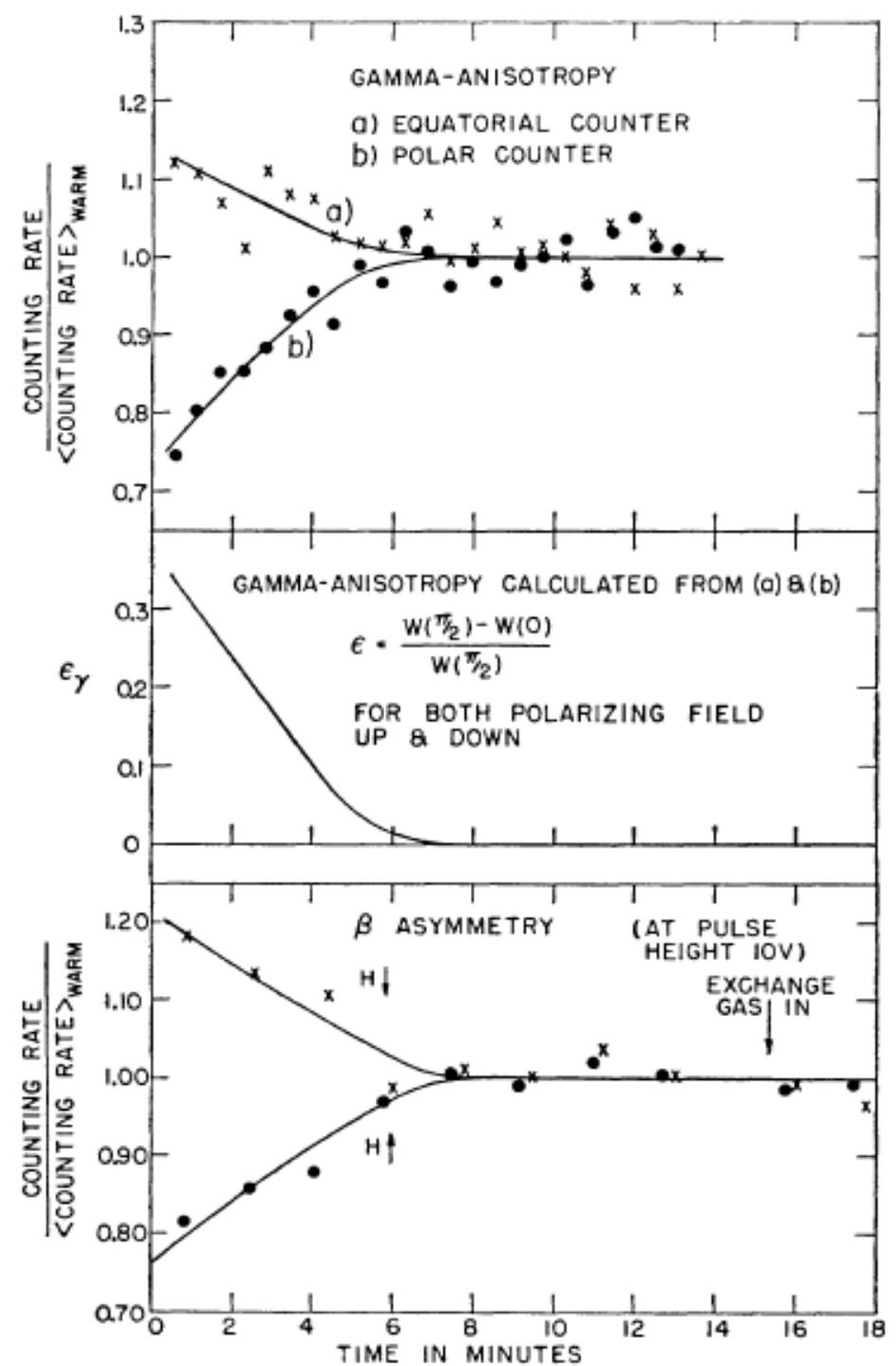
# Messergebnisse

- Im Vergleich zum warmen Zustand erkennt man:
  - Polarisation von  $^{60}\text{Co}$  bei ca. 66%
  - 20% mehr  $e^-$  für  $B^-$ , als im warmen Zustand
  - 20% weniger  $e^-$  für  $B^+$ , als im warmen Zustand



# Messergebnisse

- Klarer Vorzug der  $e^-$  entgegen der Spinrichtung von  $^{60}\text{Co}$
- → Parität nicht erhalten





# Gliederung

- 1) Theoretische Grundlagen
- 2) Historischer Hintergrund und Motivation
- 3) Konzept des Experiments
- 4) Experimentelle Umsetzung
- 5) Messergebnisse
- 6) **Interpretation und Folgen**

# Interpretation: Lee & Yang Vorhersage

- **Parität nicht erhalten!**

Paritätsverletzung ist maximal bei schwacher WW

- Man stellte fest:

$$W(\theta) \neq W(180^\circ - \theta) \forall \theta \in [0, \pi]$$

- Vorhersagen von Lee und Yang:

$$W(\theta) \propto 1 + \alpha \cos(\theta)$$

- Wu-Experiment nur für **qualitatives** Ergebnis,  
aber

$$\alpha \approx 0.4$$

# Interpretation: Helizität

- Einschub - Helicity / Helizität:

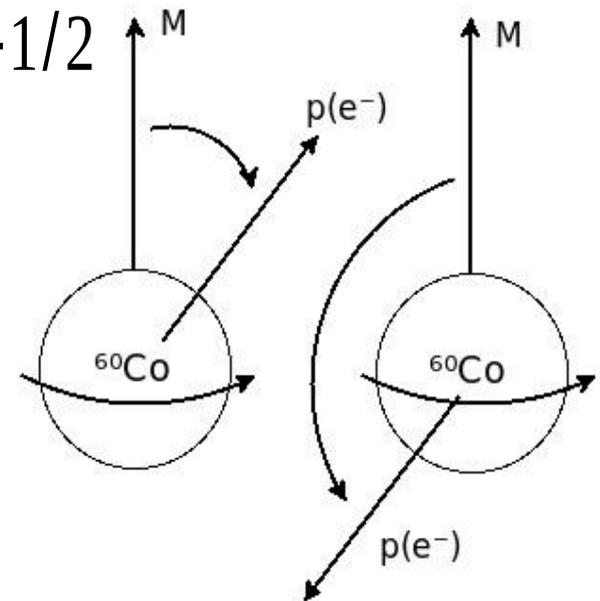
Projektion des Spins in Bewegungsrichtung

$$h = \vec{J} \cdot \hat{p} = \vec{L} \cdot \hat{p} + \vec{S} \cdot \hat{p} = \vec{S} \cdot \hat{p}$$

- Bei Spinpolarisation gilt:

$$S(^{60}\text{Co}) = +5 \rightarrow S(^{60}\text{Ni}^*) = +4 ; S(e^-) = +1/2 ; S(\bar{\nu}) = +1/2$$

→ Vorzeichen der Helizität nur von Bewegungsrichtung des  $e^-$  abhängig



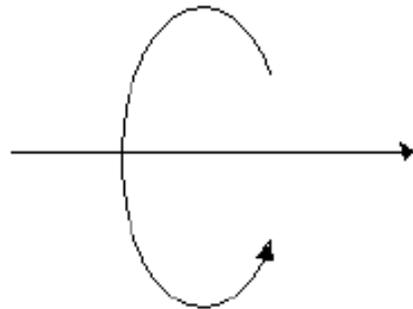
# Interpretation: Helizität

- Daher hier:

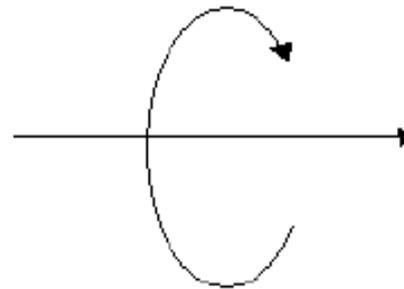
$$\text{Fall } \vec{B} = +B\vec{e}_z \quad : \quad h(e^-) > 0$$

$$\text{Fall } \vec{B} = -B\vec{e}_z \quad : \quad h(e^-) < 0$$

- Man spricht von links- (neg. Helizität) und rechtshändigen (pos. Helizität) Teilchen



rechtshändig:  $h=+1$

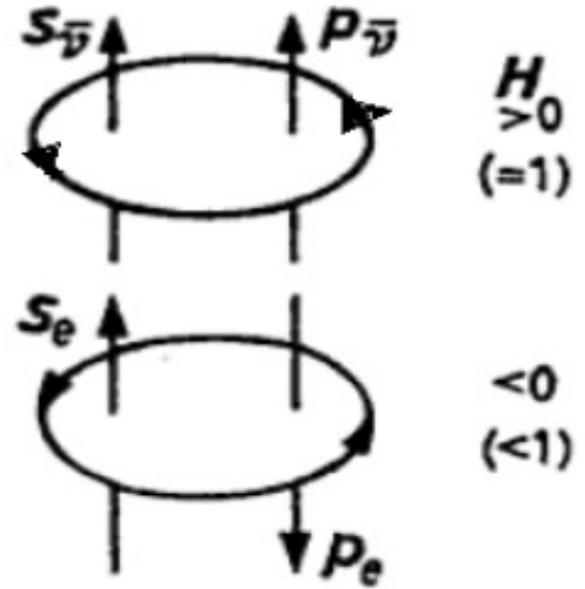


linkshändig:  $h=-1$

- Hier linkshändige  $e^-$  [  $h(e^-) < 0$  ] stark bevorzugt.

# Interpretation: Helizität

- Drehimpulserhaltung:  $e^-$  und  $\bar{\nu}_e$   $S_z = +1/2$   
→ rechtshändiges  $\bar{\nu}_e$  in Richtung des Kernspin
- 1957 Goldhaber Experiment:  $h(\nu_e) < 0$



## Interpretation: verbleibende Symmetrien?

- 1957 Paritätsverletzung für  $\beta^+$  Zerfall von  $^{58}\text{Co}$ :



→ schwache WW **nicht invariant** unter Ladungskonjugation **C**

- **CP** neue Erhaltungsgröße  
→ 1964 durch Zerfall von  $K^0$  widerlegt
- Motivation: Verhältnis Materie / Antimaterie (Urknall)
- **CPT** letzte Symmetrie
  - bisher nicht widerlegt
  - Verletzung wird z.B. bei Vergleich Wasserstoff und Anti-Wasserstoff gesucht

Ende



# Quellen

- Alle Graphen wurde mit Dia (dia-normal 0.97.2) erstellt, mit Ausnahme:
  - Wu-Bild: [thefinchandpea.files.wordpress.com](http://thefinchandpea.files.wordpress.com)
  - Feynman  $e^-e^+$ : [wikimedia.org](http://wikimedia.org)
  - Messergebnisse: CS Wu et al, Experimental test of parity conservation in beta decay (1957)
- Sonstige Quellen:
  - Wikipedia.com
  - Mark Thomson, Modern Particle Physics (2014)
  - E. Lohrmann, Einführung in die Elementarteilchenphysik (1983)
  - TD Lee & CN Yang, Question on parity conservation in weak interaction
  - E. Gleiss, Das Wu-Experiment (2011)
  - [static.newworldencyclopedia.org](http://static.newworldencyclopedia.org)
  - [semibyte.de](http://semibyte.de)