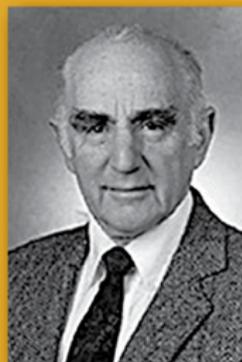


Photo of L. Grodzins courtesy of Purdue University

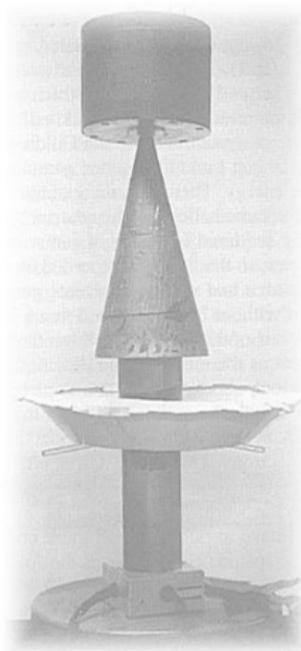


M. Goldhaber, L. Grodzins, A. W. Sunyar

## Schlüsselexperimente der Teilchenphysik Die Helizität des Neutrinos

# Das Goldhabereperiment

- ▶ Einleitung
- ▶ Prinzip
- ▶ Experiment
- ▶ Ergebnisse
- ▶ Diskussion
- ▶ Referenzen



**Abb.:** Originalfoto des Goldhaberexperiments

## Status quo 1958

Ergebnis des Wu-Experiments:

- ▶ Schwache Wechselwirkung verletzt Paritätserhaltung

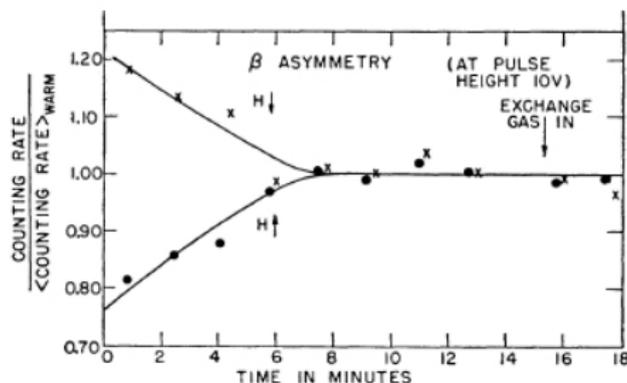


Abb.: Ergebnis Wu-Experiment. Bethge: Kernphysik, Springer 2008.

Daraufhin aufkommende Hypothese:

- ▶ Neutrino hat negative Helizität  $H(\nu) = -1$

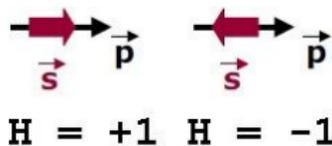
# Helizität

Definition der Helizität:

$$H := \frac{\vec{s} \cdot \vec{p}}{|\vec{s}| \cdot |\vec{p}|}$$

$\vec{s} \hat{=}$  Spin-Vektor,  $\vec{p} \hat{=}$  Impuls-Vektor

- ▶ beschreibt die Einstellung des Spins  $\vec{s}$  relativ zum Impuls  $\vec{p}$
- ▶ für masselose Teilchen eindeutig bestimmt



## Herangehensweise

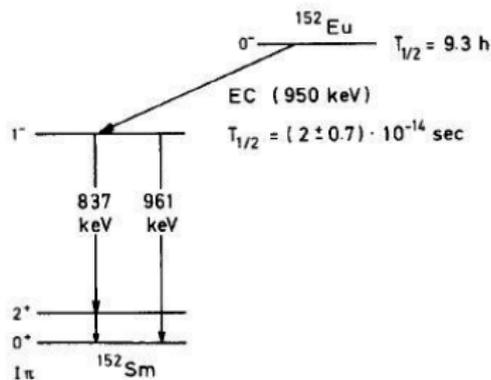
Ziel:

- ▶ Bestimmung der Helizität des Neutrinos aus



Problemstellung:

- ▶ Neutrionachweis
- ▶ Bestimmung von  $\vec{s}_{\nu_e}$  und  $\vec{p}_{\nu_e}$  aus

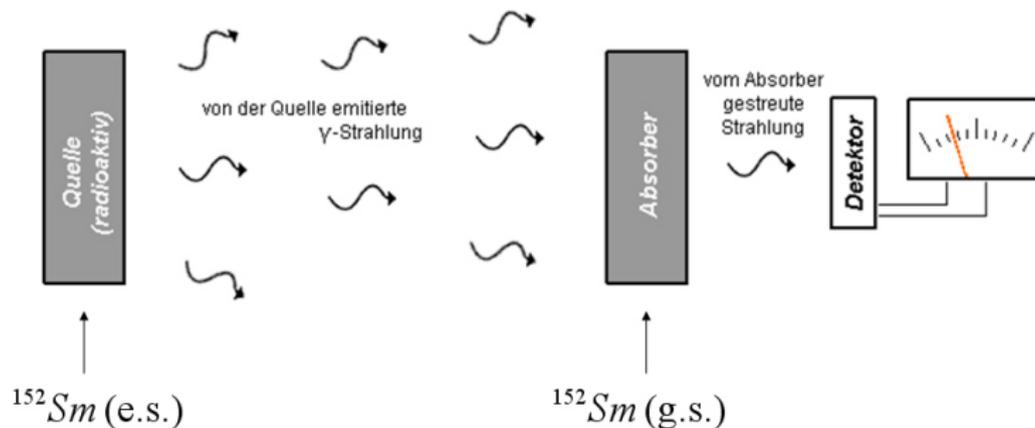


Ausschnitt aus dem Zerfallsschema von  ${}^{152}\text{Eu}$ .

## Bestimmung von $\vec{p}_{\nu_e}$

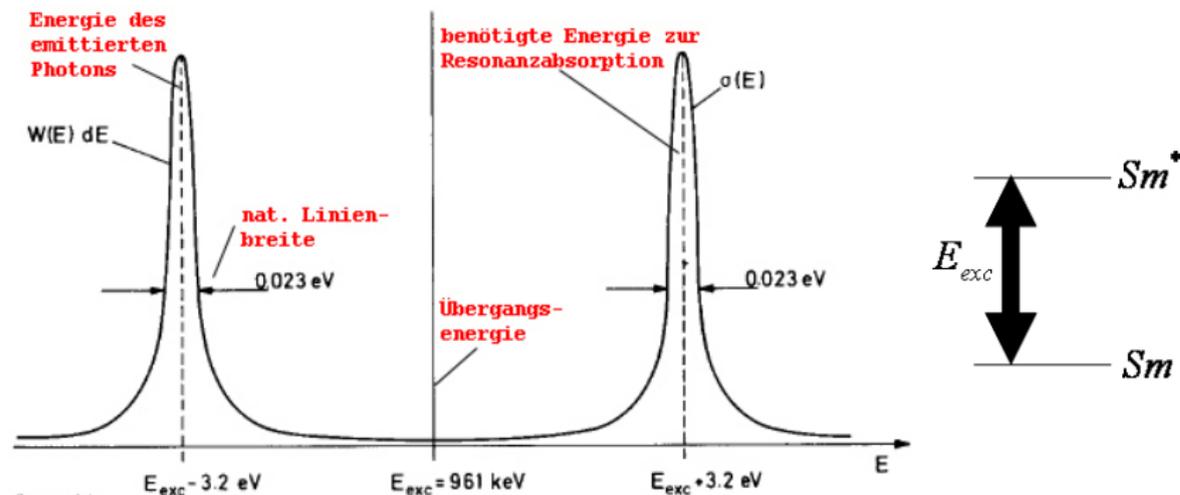
Methode: Resonanzfluoreszenz

- ▶ Quelle und Absorber bestehen aus dem gleichen Isotop von  $^{152}\text{Sm}$
- ▶ Kern -  $\gamma$  - Strahlung wird in einem Streuer unter Anregung absorbiert



- ▶ nur dann möglich, wenn sich Strahlungsquelle auf Streuer zu bewegt (Dopplereffekt)

## Problem: Energieerhaltung verletzt

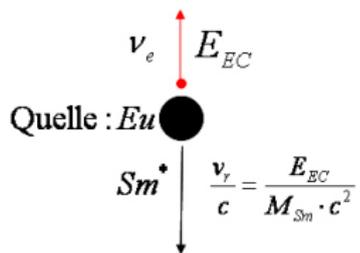
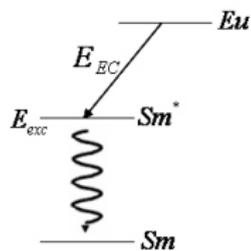


Figur 134:

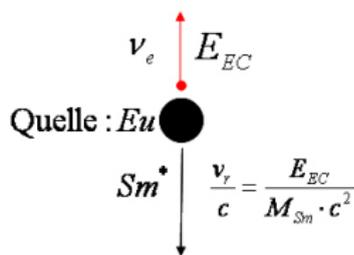
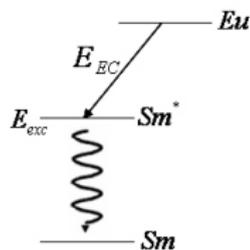
Schematische Darstellung des Emissionsspektrums und der Absorptionslinie des 961 keV Übergangs im  $^{152}\text{Sm}$ .

- ▶ Energie des emittierten Photons:  $E_{\gamma}^{emit} = E_{exc} - \frac{p_{\gamma}^2}{2M_{Sm}}$
- ▶ benötigte Energie zur Absorption:  $E_{\gamma}^{abs} = E_{exc} + \frac{p_{\gamma}^2}{2M_{Sm}} \approx E_{exc} + 3.2 \text{ eV}$

## Lösung: Dopplershift



## Lösung: Dopplershift

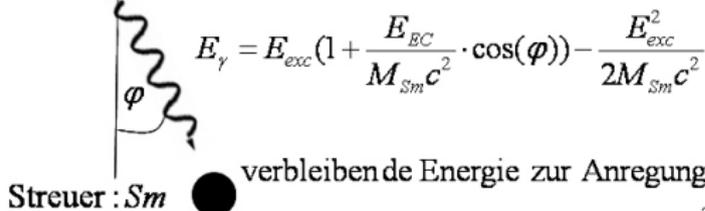
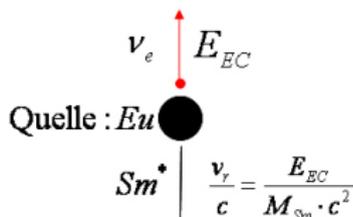
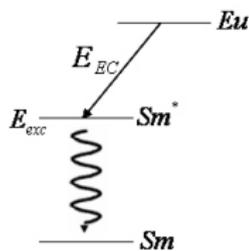


$$E_\gamma = E_{exc} \left( 1 + \frac{E_{EC}}{M_{Sm} c^2} \cdot \cos(\varphi) \right) - \frac{E_{exc}^2}{2M_{Sm} c^2}$$

Streuer:  $Sm$  ● verbleibende Energie zur Anregung :

$$E_\gamma^* = E_{exc} \left( 1 + \frac{E_{EC}}{M_{Sm} c^2} \cdot \cos(\varphi) \right) - \frac{E_{exc}^2}{M_{Sm} c^2}$$

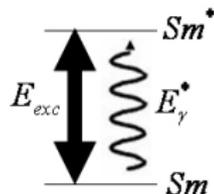
## Lösung: Dopplershift



$$E_\gamma = E_{exc} \left( 1 + \frac{E_{EC}}{M_{Sm} c^2} \cdot \cos(\varphi) \right) - \frac{E_{exc}^2}{2M_{Sm} c^2}$$

verbleibende Energie zur Anregung :

$$E_\gamma^* = E_{exc} \left( 1 + \frac{E_{EC}}{M_{Sm} c^2} \cdot \cos(\varphi) \right) - \frac{E_{exc}^2}{M_{Sm} c^2}$$



Resonanzbedingung :

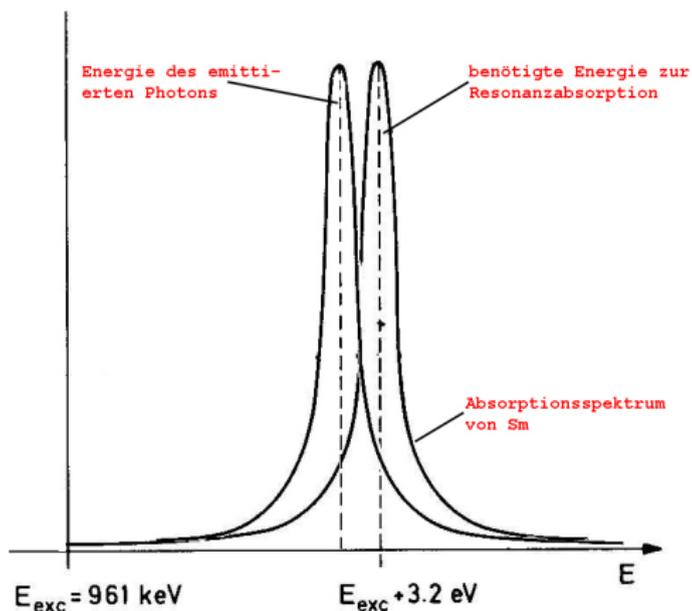
$$E_\gamma^* = E_{exc} \Rightarrow \cos(\varphi) = \frac{E_{exc}}{E_{EC}} \Rightarrow \varphi \approx 0^\circ$$

Damit ergibt sich insgesamt:

- ▶ Neutrino  $\nu_e$  und  $\gamma$ -Quant werden entgegengesetzt emittiert:

$$\vec{p}_{\nu_e} = -\vec{p}_{\gamma}, \text{ wegen } \varphi \approx 0^\circ$$

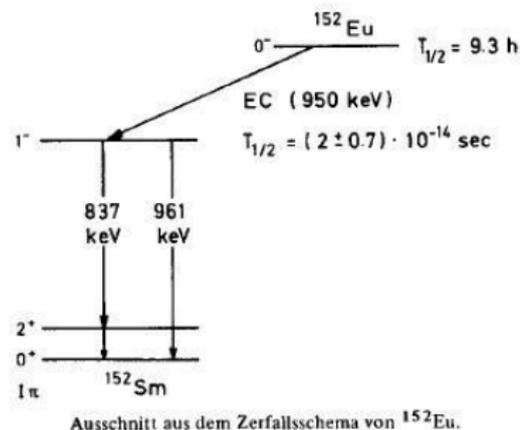
- ▶ Überlapp von Energiespektrum des emittierten  $\gamma$ -Quants mit Absorptionsspektrum von  ${}^{152}_{62}\text{Sm}$ , wegen Dopplershift



Bestimmung von  $\vec{s}_{\nu_e}$ 

Drehimpulserhaltung:

	$^{152m}\text{Eu} + e^- \rightarrow ^{152}\text{Sm}^* + \nu_e \rightarrow ^{152}\text{Sm} + \gamma + \nu_e$						
$m_z^1$ :	0	$\frac{1}{2}$	1	$-\frac{1}{2}$	0	1	$-\frac{1}{2}$
$m_z^2$ :	0	$-\frac{1}{2}$	-1	$\frac{1}{2}$	0	-1	$\frac{1}{2}$



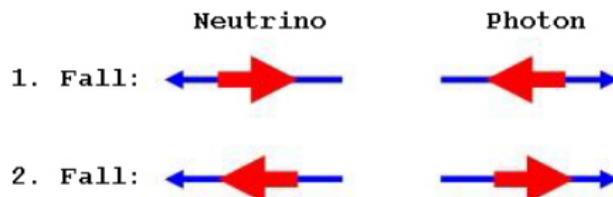
- ▶ in beiden Fällen gilt also:  $m_z(\nu) = -m_z(\gamma)$

Insgesamt gilt also:

$$\vec{p}_{\nu_e} = -\vec{p}_\gamma$$

$$m_z(\nu) = -m_z(\gamma)$$

► anschaulich heißt das:



## Helizität

Die Helizität des Neutrinos ist bereits durch die des  $\gamma$ -Quants festgelegt:

$$H_{\nu_e} = H_\gamma$$

## Polarisationsmessung

- ▶ Compton-Streuquerschnitt für Photonen an magnetisiertem Eisen:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(P_c(\gamma)) = \frac{e^4}{2 \cdot (4\pi)^2 \epsilon_0^2 m_e^2 c^4} \left(\frac{k'}{k}\right)^2 \cdot \left(\phi_0 + f \cdot \underbrace{P_c(\gamma)}_{!!} \cdot \phi_c\right)$$

(„Klein – Nishina – Formel“)

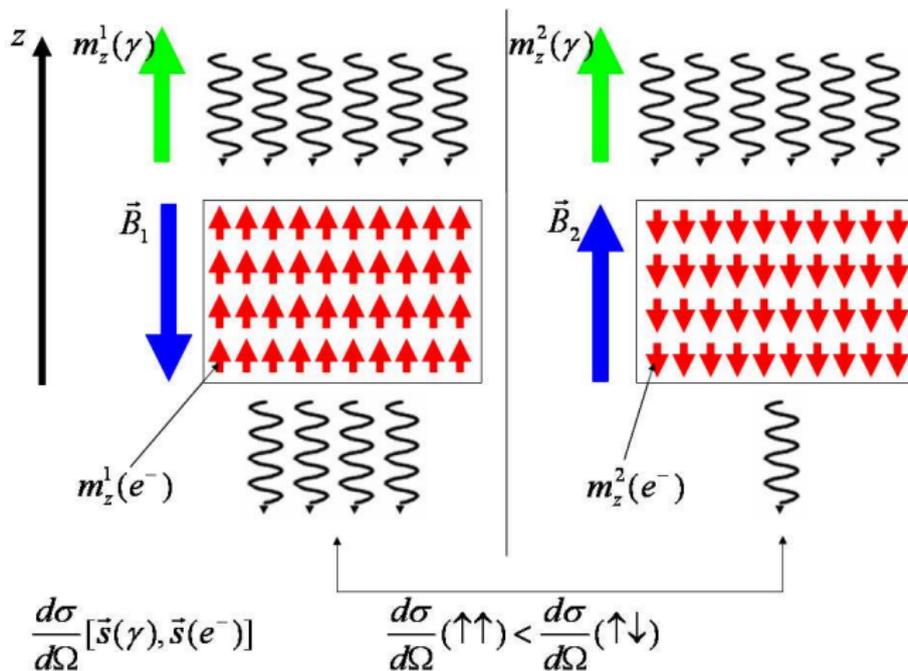
⇒  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  hängt explizit von  $P_c(\gamma)$  ab

### Polarisationsmessung

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\uparrow\downarrow) > \frac{d\sigma}{d\Omega}(\uparrow\uparrow)$$

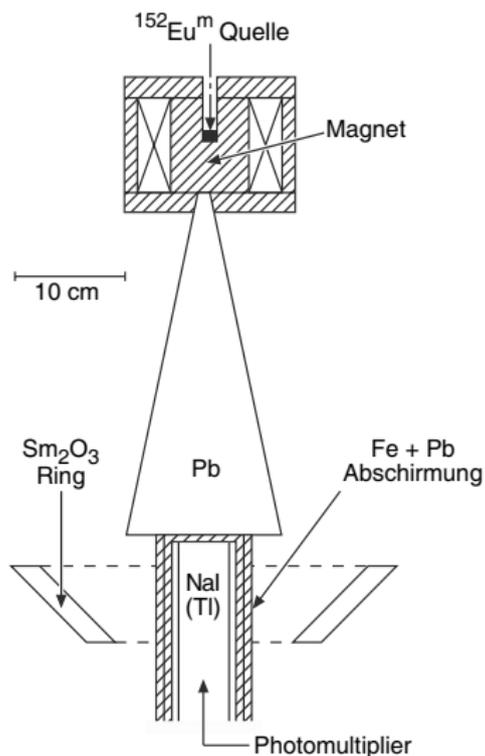
→ messbar durch Einstellung der  $\vec{B}$ -Feld Richtung

Rolle des  $\vec{B}$ -Feldes:



- ▶ man erhält in Abhängigkeit von  $\vec{B}$  verschiedene Countraten

# Aufbau



- ▶  $^{152m}\text{Eu}$  – Quelle
- ▶ Magnet
- ▶ Bleischild
- ▶  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  – Streuer
- ▶ NaI(Tl) – Szintillator
- ▶ Photomultiplier

**Abb.:** Aufbau des Goldhaberexperiments.  
 Povh: Teilchen und Kerne, Springer 2006.

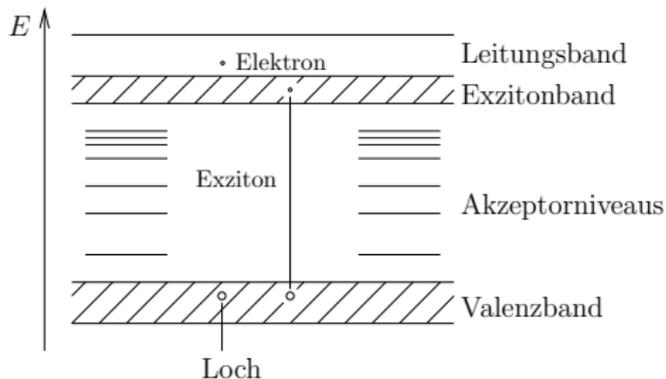
## Europium-Quelle und Magnet



- ▶  ${}_{63}^{152m}\text{Eu}$  kontinuierlich durch Beschuss im „Brookhaven reactor“ erzeugt aus  $\text{Eu}_2\text{O}_3$
- ▶ Nur metastabiles Europium geeignet ( $t_{1/2} = 9.3 \text{ h}$ , sonst  $13.5 \text{ a}$ )
- ▶ Feste und flüssige Quelle
- ▶ Zwei verschiedene Magnetdicken
- ▶ Magnetfeldumpolung alle 3 Minuten

**Abb.:** L. Grodzins beim Aufbau des Experiments.  
Quelle unbekannt.

# Szintillator

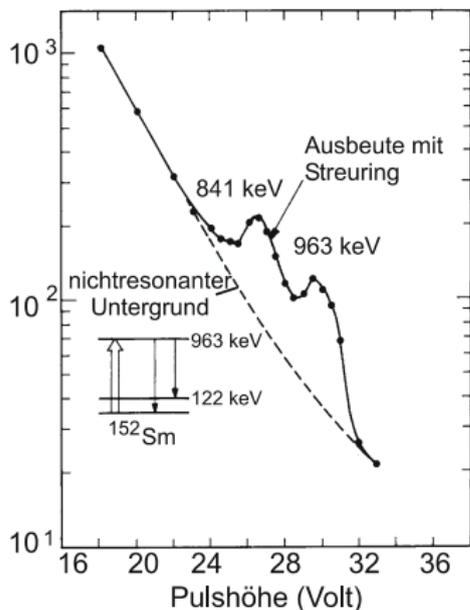


- ▶ NaI-Kristall mit Tl-Dotierung
- ▶ Bandlücke 5-10 eV
- ▶ Fremdatome bilden Aktivatorzentren
- ▶ Emittiert 410 nm Licht
- ▶ 30 % Quantenausbeute

**Abb.:** Prinzip eines Szintillators. Stachel: Script Physik V.

- ▶ Strahlung oder ionisierende Partikel heben (mehrere) Elektronen in Leitungs- oder Exitonband.
- ▶ Rekombination entweder direkt oder über Aktivatorzentrum  
→ sichtbares Licht, einige eV

# Untergrund



- ▶ Ohne Magnetfeld
- ▶ Untergrund durch anderen (nichtresonanten) Streuer gleicher Geometrie bestimmt
- ▶ Sm – Streuer zeigt deutliche Struktur bei 840 keV und 960 keV
- ▶ Strecke im Magneten etwa  $3\lambda$  d. h. nur Bruchteil ( $\sim e^{-3}$ ) der Photonen durchdringt den Magnet

**Abb.:** Messergebnis Counts. Bethge: Kernphysik, Springer 2008.

## Messung mit Magnetfeld

- ▶ Insgesamt 9 Durchläufe mit je 3-9 h
- ▶ WQ:  $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\uparrow\downarrow) > \frac{d\sigma}{d\Omega}(\uparrow\uparrow)$
- ▶ Je nach Magnetfeld-Richtung unterschiedliche Zählrate
- ▶ Effekt Klein-Nishina  $\sim 1\%$
- ▶ Problem: Untergrundgenauigkeit- und stabilität
- ▶ Hohe Messgenauigkeit nötig

## Messung mit Magnetfeld

- ▶ Insgesamt 9 Durchläufe mit je 3-9 h
- ▶ WQ:  $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\uparrow\downarrow) > \frac{d\sigma}{d\Omega}(\uparrow\uparrow)$
- ▶ Je nach Magnetfeld-Richtung unterschiedliche Zählrate
- ▶ Effekt Klein-Nishina  $\sim 1\%$
- ▶ Problem: Untergrundgenauigkeit- und stabilität
- ▶ Hohe Messgenauigkeit nötig

### Messung

$$\delta = \frac{N_- - N_+}{\frac{1}{2}(N_- + N_+)} = +0.017 \pm 0.003$$

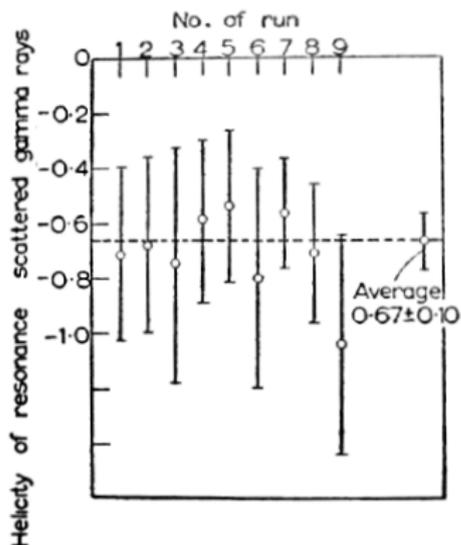
$N_{\pm}$ : Zählrate für nach oben/unten zeigendes Magnetfeld

## Polarisation

Theoretische Berechnung (über mittlere Wegstrecke im Magneten)

$$\delta = \pm 0.025 \pm 10\%$$

für 100 % links-/rechtszirkulare Polarisation der Strahlung  $H(\gamma_{ges}) = \mp 1$



### Ergebnis:

( $68 \pm 14$ ) % der Strahlung sind linkszirkular polarisiert  $H(\gamma) = -1$

Abb.: Messergebnis Helizität. Quelle unbekannt.

## Korrekturen & Helizität

- ▶ Neutrino Energie
- ▶ Natürliche Linienbreite
- ▶ Unsicherheit im Winkel zwischen  $\nu$  und  $\gamma$
- ▶ Thermische Bewegung

→ Beobachtbarer Effekt max. 75 %, wenn  $H(\gamma) = -1$  für alle Photonen

## Korrekturen & Helizität

- ▶ Neutrino Energie
- ▶ Natürliche Linienbreite
- ▶ Unsicherheit im Winkel zwischen  $\nu$  und  $\gamma$
- ▶ Thermische Bewegung

→ Beobachtbarer Effekt max. 75 %, wenn  $H(\gamma) = -1$  für alle Photonen

→ Verträglich mit  $(68 \pm 14) \%$  aus dem Messergebnis

### Helizität des Neutrinos

Neutrinos sind linkshändig, d. h.

$$H(\nu) = -1$$

## Zusammenfassung & Deutung

- ▶ Vorher:
    - ▶ Schwache WW verletzt möglicherweise Paritätserhaltung
    - ▶ Wu: experimentelle Bestätigung
    - ▶ Evidenz für negative Helizität des Neutrinos
  
  - ▶ Goldhaber:
    - ▶ findet Element, das den Anforderungen genügt:  ${}_{63}^{152m}\text{Eu}$
    - ▶ misst Helizität über Polarisation von Photonen:  $H(\nu) = H(\gamma)$
    - ▶ Messung stimmt nach Korrekturen mit neg. Helizität  $H(\nu) = -1$  überein
  
  - ▶ Nachher, Deutung:
    - ▶ Natur unterscheidet Händigkeit, Symmetriebruch
    - ▶ Austauschbosonen  $Z^0$ ,  $W^\pm$  der schwachen WW koppeln nur an linkshändige Neutrinos bzw. rechtshändige Antineutrinos
    - ▶ **Aber:** Neutrinos nicht masselos
      - rechtshändige Neutrinos
      - nur gravitative WW
- Kandidat für „Dunkle Materie“, aber nur 4% baryonische Masse

## Referenzen

- ▶ E. Bodenstedt, Experimente der Kernphysik und ihre Deutung, Teil 2; Wissenschaftsverlag, Mannheim 1979
- ▶ M. Goldhaber, L. Grodzins, A.W. Sunyar, Helicity of Neutrino; Physical Review 109 (1958) 1015
- ▶ Titelbilder: [http://www.bnl.gov/nh50/files/pdf/Helicity50Symposium\\_Poster.pdf](http://www.bnl.gov/nh50/files/pdf/Helicity50Symposium_Poster.pdf)  
(31.03.09)
- ▶ <http://www-linux.gsi.de/~wolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/VO-5-Szintillatoren.pdf>  
(31.03.09)