

Schlüsselexperimente der Teilchenphysik

Goldhaber Experiment

Marc Schuh

Betreuerin: Prof. Dr. J. Stachel
Universität Heidelberg

23.04.2010

Vorwissen

Experimentatoren

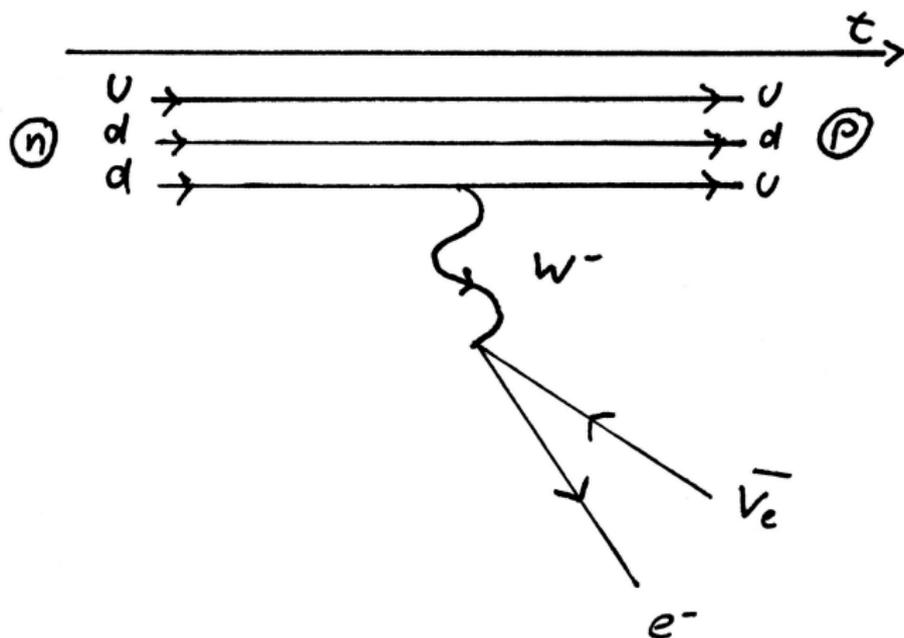
- Maurice Goldhaber (*1911)
- Andrew William Sunyar (*1920, † 1986)
- Lee Grodzins (*1926)

Wann und wo?

- 1957
- Brookhaven National Laboratory (USA)

Ziel

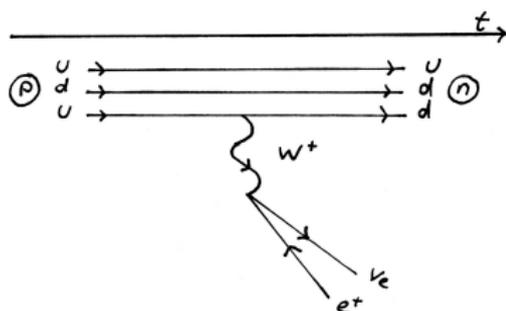
- SWW verletzt Parität
- Paritätsverletzung durch Helizität des Neutrino

β^- -Zerfall

Zerfallsgleichung: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

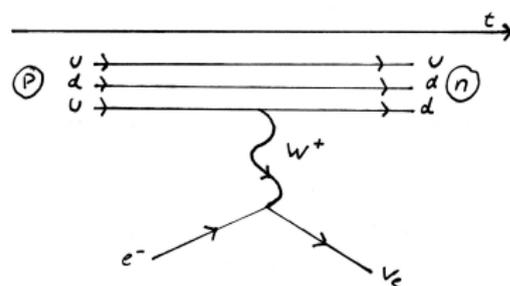
β^+ -Zerfall und Elektroneneinfang

β^+ -Zerfall



Zerfallsgleichung:
 $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

Elektroneneinfang



Zerfallsgleichung:
 $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

Parität

Mathematische Definition des Paritätsoperators P

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \xrightarrow{P} \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix}$$

$$\Psi(\vec{r}) \xrightarrow{P} \Psi(-\vec{r})$$

$$\Psi(\vec{r}) \xrightarrow{P^2} \Psi(\vec{r})$$

Erklärung

Verhalten gegenüber Spiegelung an Raumebenen

Eigenwerte

Es gibt zwei mögliche Eigenwerte zur Parität: ± 1

Eigenwert $+1$, falls

$$P [\Psi (\vec{r})] \equiv \Psi (-\vec{r}) = \Psi (\vec{r})$$

- $\Psi (\vec{r})$ ist invariant unter P
- Parität gerade

Eigenwert -1 , falls

$$P [\Psi (\vec{r})] \equiv \Psi (-\vec{r}) = -\Psi (\vec{r})$$

- $\Psi (\vec{r})$ ändert sich unter P
- Parität ungerade

Vektoren

Polare Vektoren: Vorzeichenwechsel unter P

- Ort \vec{r}
- Geschwindigkeit \vec{v}
- Impuls \vec{p}

Axiale Vektoren: Invariant unter P

- Drehimpuls $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$
- Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$

Pseudo-Skalare: Skalarprodukt: *polar* · *axial*

Vorzeichenwechsel unter P

Erwartungswerte

Experiment:

- Messung von Geschwindigkeit \vec{v} (*polar*) und Spin \vec{S} (*axial*)
- Pseudoskalar: $\mu = \vec{v} \cdot \vec{S}$

Paritätserhaltung gilt, wenn

- $\langle \mu \rangle = 0$
- 50% der Spins sind links- und 50% sind rechts-händig

Paritätsverletzung gilt, wenn

- $\langle \mu \rangle \neq 0$
⇒ Spin hat eine Vorzugsrichtung

Helizität

Helizität

- Mathematische Definition:

$$h = \frac{\vec{s}\vec{p}}{|\vec{s}||\vec{p}|}$$

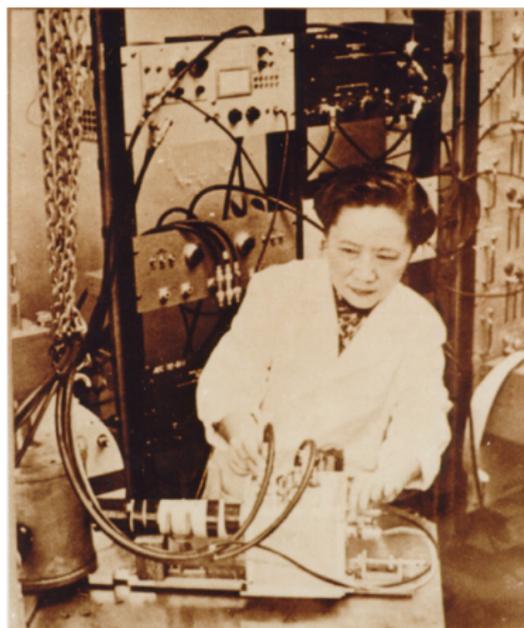
Wobei \vec{s} der Spin und \vec{p} der Impuls ist

- Helizität beschreibt das Verhalten unter Rauminversion
- Helizität vorhanden, wenn Spiegelbild durch Drehung nicht gleich dem Original
- links- und rechtshändig
- Nachweis der Paritätsverletzung
- $\langle h \rangle \neq 0$

Historisches

Wu-Experiment

- 1956 am Nat. Bureau of Standards (Gaithersburg)
- Paritätsverletzung der SWW
- ${}_{27}^{60}\text{Co} \longrightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + e^{-} + \bar{\nu}_e$
- Messung Elektronen in z-Richtung
- Kernspin durch äußeres Magnetfeld beeinflusst
Elektronspin an Kernspin gekoppelt
- Temperatur 10 *mK*



Aufbau und Idee des Experiments

Idee:

- Indirekter Nachweis der Neutrinohelizität
- Nachweis über Photonhelizität
- Ausnutzen der Resonanzfluoreszenz

Aufbau:

- ^{152m}Eu -Quelle in magnetisiertem Eisen
- Kein direkter Einfall in Szintillator
- Sm_2O_3 - Resonator
- Gesamthöhe: ca. 60cm



Zerfälle

Kern- und Folgereaktion:

- $^{152m}\text{Eu} + e^- \rightarrow ^{152}\text{Sm}^* + \nu_e$
- $(3 \pm 1) \cdot 10^{-14}$ s später:
 $^{152}\text{Sm}^* \rightarrow ^{152}\text{Sm} + \gamma$

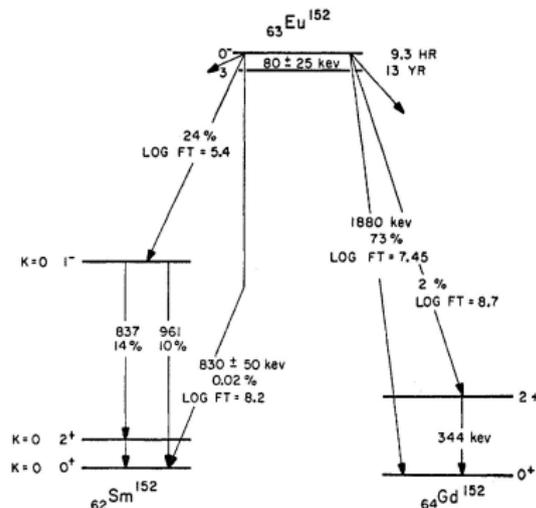
Notation

J^π = Drehimpuls^{Parität}

γ -Zerfälle

- $1^- \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$
- $1^- \rightarrow 0^+$
- $E_\gamma = 961$ keV

Absorption dieser Energie nicht möglich



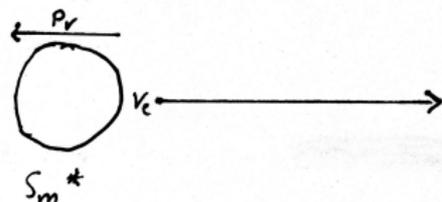
Energie und Impulse

Vor γ -Emission

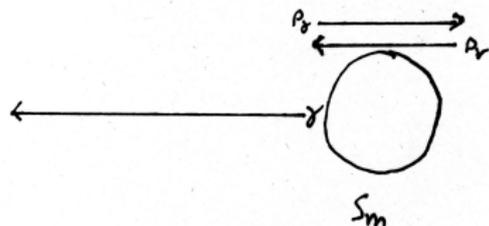
- Neutrino: $E_\nu = 950 \text{ keV}$
- Rückstoß auf Kern: 3.12 eV

Nach γ -Emission

- Photon: $E_\gamma = 961 \text{ keV}$
- Rückstoß auf Kern:
 $3.2 \text{ eV} \pm 0.023 \text{ eV}$
- Verbleibende Rückstoß-
energie: $4 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$
Wenn γ -Quant in Flugrichtung
von S_m emittiert



$3 \cdot 10^{-14} \text{ s}$ später:

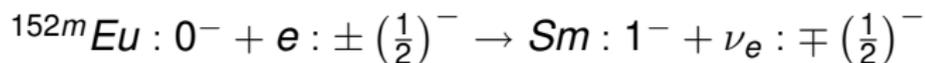


Bilanz

- $E'_\gamma = E_\gamma + 3.12 \text{ eV}$; Resonanzfluoreszenz möglich

Spins

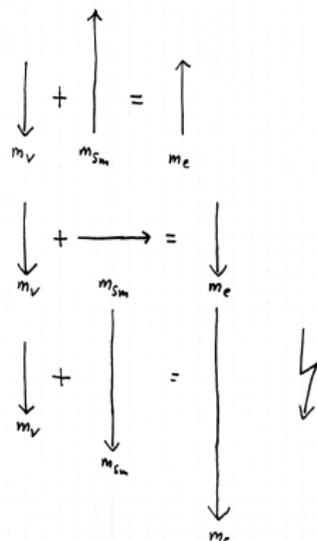
Reaktion



Notation: m -Komponente
relativ zum Neutrinoimpuls

m -Komponente

- Erhaltungssatz: $m_e = m_{Sm} + m_\nu$
- Sei: $m_\nu = \pm \frac{1}{2} \Rightarrow m_{Sm} = \mp 1, m_e = \mp \frac{1}{2}$
 $m_{Sm} = 0, m_e = \pm \frac{1}{2}$
- Verboten: $m_{Sm} = \pm 1, m_\nu = \pm \frac{1}{2}$
- γ -Quant: $m_\gamma = m_{Sm} = m_e - m_\nu = \pm 1$
 $\Rightarrow m_\nu = +\frac{1}{2}, m_\gamma = -1$
 $m_\nu = -\frac{1}{2}, m_\gamma = +1$
- Helizität Neutrino = Helizität Photon



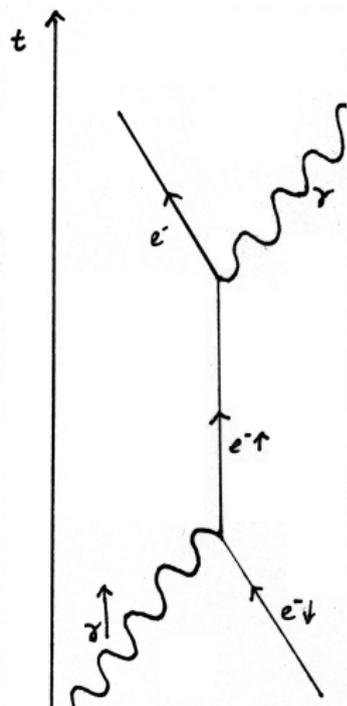
Comptoneffekt

- Klein-Nishina-Formel:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{e^4}{2 \cdot (4\pi)^2 \cdot \epsilon_0^2 m_e^2 c^4} \cdot \left(\frac{k'}{k}\right)^2 \cdot (\varphi_0 + f \cdot P_c(\gamma) \cdot \varphi_c)$$

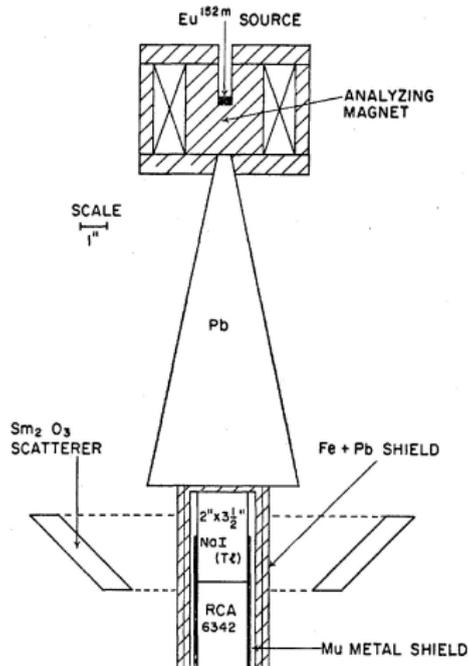
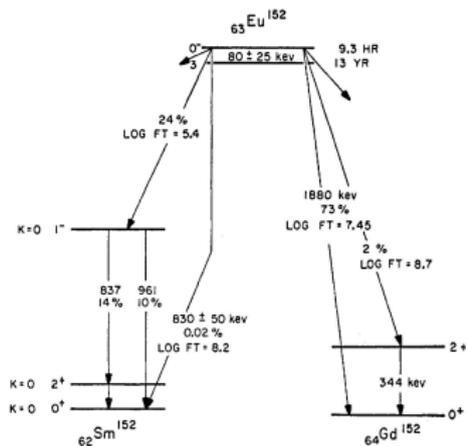
$P_c(\gamma)$ = Polarisation

- Magnet polarisiert Spin der Elektronen im Eisen
- Comptonstreuung abhängig von Polarisation der γ -Quanten und Elektronen
- Nur nicht gestreute γ -Quanten genügend Energiereich für Resonanzfluoreszenz



Resonanzfluoreszenz

- $E_\gamma = 961 \text{ keV} + 3.12 \text{ eV}$
- $\text{Sm}_2\text{O}_3 + \gamma \rightarrow (\text{Sm}_2\text{O}_3)^*$
- $(\text{Sm}_2\text{O}_3)^* \rightarrow \text{Sm}_2\text{O}_3 + \gamma$
- γ -Quant in alle Richtungen



Funktionsweise

Indirekter Nachweis (Neutrinohelizität)

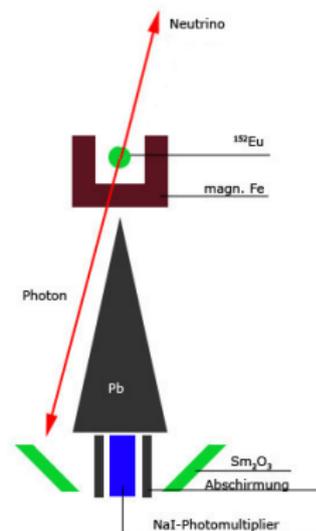
Nachweis erfolgt über Helizität des Photons

Geometrie

Geometrie verhindert direkten Einfall

Rückschluss auf das Neutrino

Abschirmung gibt Rückschluss auf Neutrinoflugbahn



Versuchsdurchführung

Eckdaten

- Halbwertszeit: ${}_{63}\text{Eu}^{152m}$: 9.3 h
- Menge: 10 mg
- Quellstärke: 50 – 100 mC \simeq 1850 – 3700 MBq

Durchführung

- Anzahl der Messungen: 9
- Messdauer: 3 – 9 h
- Ereignisse insgesamt: $3 \cdot 10^6$ counts

Gegentests

- Cs^{137} - Kein Effekt durch Magnet
- Bremsstrahlung: $\text{Sr}^{90} + \text{Y}^{90}$ Parität negativ - gleicher Effekt messbar
- Kürzerer Magnet - keine Veränderung

Resultat

Originalergebnis

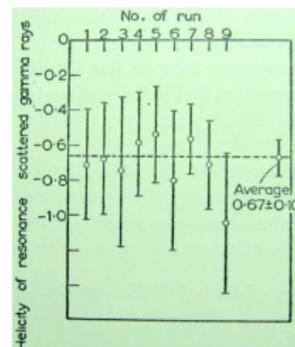
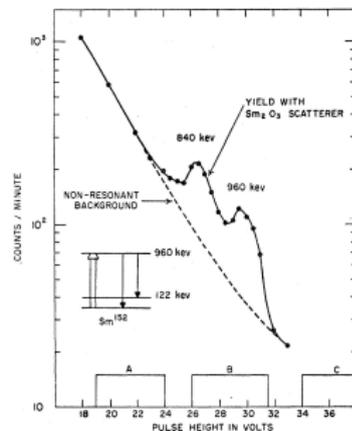
- $\delta = \frac{N_- - N_+}{\frac{1}{2}(N_- + N_+)}$
= 0.017 ± 0.003
- $N_+ : B : \uparrow$
- $N_- : B : \downarrow$

Erwartet

- $\delta = \pm 0.025$
- Wenn γ zu 100% polarisiert

Schlussfolgerung

$66 \pm 15\%$ polarisiert



Auswertung

Störungen

- Kernresonanz-Fluoreszenz nicht nur bei 180° möglich
Thermische Bewegung der Quelle
- Impulsveränderung von Sm^*
- Thermische Anregung im Resonator
- Polarisation ist winkelabhängig

Neuberechnung

- Berücksichtigung der Störeffekte
- γ -Quanten zu 75% polarisiert

Schlussfolgerung

„Thus our result seems compatible with spin 0– for Eu^{152m} , and 100% negative helicity of neutrinos emitted in orbital electron capture. “

Ergebnis

Resultat

- $66 \pm 15\%$ polarisiert mit 75% verträglich
- Nicht alle γ -Quanten müssen polarisiert sein
- $h_\gamma = -1.0 \pm 0.3$
- $\Rightarrow h_{\nu_e} = -1.0 \pm 0.3$

Unmittelbare Konsequenz

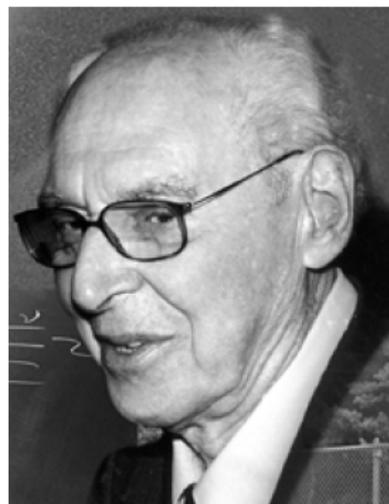
- Neutrinos sind zu 100% linkshändig
- Neutrinos haben eine Helizität

Weitere Konsequenz

- Allgemeine Definition von rechts und links (in einem Materie-Kosmos)

Maurice Goldhaber

- *18. April 1911 in Lemberg Österreich
- 1932 Arbeit am Cavendish Labor
- 1936 promovierte
- 1938 emigrierte in die USA
- Ab 1938 an der University of Illinois
- Ab 1940 Professor in Chicago
- 1950-1973 am Brookhaven Laboratory
- 1956 Goldhaber-Experiment
- 1961-1973 Direktor von Brookhaven
- Diverse Preise und Auszeichnungen



Quellen

Literatur



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

Helicity of Neutrinos

Phys. Rev. 109, 1015–1017



L. Grodzins

Lifetime of 1^- Level in $Sm^{152}\dagger$

Phys. Rev. 109. 1014



Wikipedia

Goldhaber Experiment

http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Goldhaber_experiment_aufbau.jpg