

Energieverteilung der Elektronen eines Beta-Strahlers

SOWAS-Projektgruppe L

Gerrit Dirk Frohne, Chaiyasit Nembangkaeo, Leonard Vinko Tokic, Thilo Romba
 Projektleiter: Jonathan Schwinger

Motivation

Aus klassischer Betrachtung folgt, dass ein aus einem β^- -Zerfall entstehendes Elektron mit dem Potenzial seines Ausgangsatoms wechselwirken muss. Das Ziel unseres SOWAS-Projektes ist die experimentelle Ermittlung der Verschiebung des Energiespektrums, die durch die genannte Wechselwirkung entsteht. Zur theoretischen Abschätzung dieser Verschiebung nähern wir uns klassisch über drei Schritte, um die Gültigkeit der klassischen Annahmen in diesem Kontext zu überprüfen.

Physikalische Grundlagen

- Beim β^- -Zerfall zerfällt infolge von Neutronenüberschuss ein instabiler Kern unter der Umwandlung eines Neutrons in ein Elektron, ein Elektron-Antineutrino, sowie ein Proton.
- Die freiwerdende Energie verteilt sich auf die drei Zerfallsprodukte, wodurch sich aufgrund der geltenden Energie- und Impulserhaltung ein kontinuierliches Energiespektrum ergibt.
- Unmittelbar nach dem Zerfall befinden sich das entstandene Elektron und das Elektron-Antineutrino klassisch betrachtet in der Nähe des zerfallenen Kerns. Um das Kernpotential sowie die Potentiale der gebundenen Elektronen verlassen zu können, muss das entstandene Elektron wegen seiner elektrischen Ladung seine Energie ändern.
- Durch diese aufgebrachte Energie entsteht eine Diskrepanz zwischen dem Energiespektrum der Elektronen gleich nach dem Zerfall in Nähe des Ursprungsatoms und dem am Detektor gemessenen Spektrum.
- Da es sich bei β^- -Strahlung um Elektronen handelt, lässt sich diese wegen ihrer hohen Wechselwirkung mit Materie vollständig abschirmen. Hierbei entsteht Bremsstrahlung.

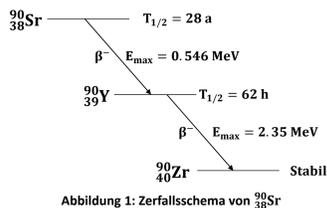
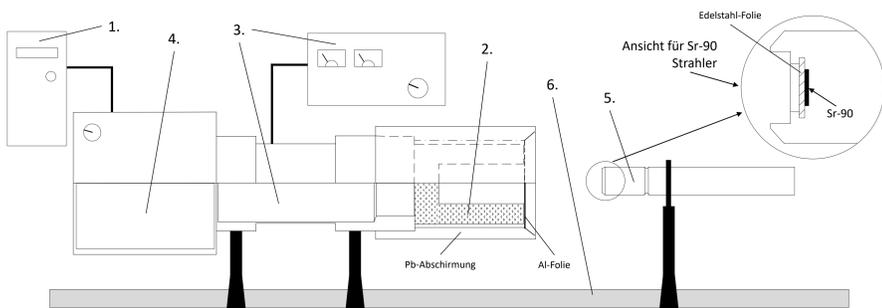


Abbildung 1: Zerfallsschema von ^{90}Sr

Versuchsaufbau



1. Computer zur Datenaufnahme
2. NaI(Tl) Szintillationskristall
3. Photomultiplier mit angeschlossener Hochspannung
4. Multikanalanalysator mit 8192 Kanälen
5. Strahler Cs-137; Co-60; Sr-90
6. Optische Bank und Halterungen

Abbildung 2: Versuchsaufbau und detaillierte Darstellung

- Die Szintillationsdetektoreinheit wird auf der optischen Bank montiert und sowohl an den Hochspannungsverstärker als auch an den Computer angeschlossen.
- Mit Hilfe eines Oszilloskops wird die Vorverstärkung am Multikanalanalysator wie folgt eingestellt: Die am Oszilloskop gemessene Amplitude darf nicht abgeschnitten sein und die Vorverstärkung wurde zu 0,04 gewählt.
- Die am Photomultiplier angelegte Spannung beeinflusst den Messbereich und somit auch den Energiebereich. Um eine lineare Energie-Kalibrierung zu gewährleisten, ergab sich die am Photomultiplier angelegte Spannung zu 540 V.
- Die Haltevorrichtung ist in einem solchen Abstand aufzubauen, dass der komplette Raumwinkel, in den der Strahler emittiert, vom Szintillationskristall abgedeckt wird.

Durchführung

- Die Energie-Kalibrierung erfolgt mit Hilfe der Photopeaks zweier bekannter γ -Nuklide.
- Benutzt wird Cs-137 mit dem Photopeak bei 662 keV (2 Stunden), sowie Co-60 mit dem Photopeak bei 1173 keV (4 Stunden).
- Die Messung des β^- -Spektrums erfolgt mit Sr-90 (4 Stunden).
- Zur Eliminierung von Hintergrundeffekte wird eine gleichlange Messung ohne Strahler durchgeführt.
- Zur Bereinigung des β^- -Spektrums um auftretende γ -Strahlung wird eine Messung mit Sr-90 durch 39,80 mm dicke PE-Platten durchgeführt (4 Stunden).

Referenzen

- [1] Fermi, E.: „Versuch einer Theorie der β -Strahlen“. In: *Zeitschrift für Physik*. 88. 1934, S. 161-177
- [2] Fermi, E.: „Quantum Theory of Radiation“. In: *Review of Modern Physics*. 4. 1932, S. 88-132
- [3] URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ComTab/polyethylene.html> [Stand: 23.06.2017]

Danksagung

- Unser besonderer Dank geht an:
- Dr. M. Steinke
 - Dr. D. Meyer
 - Tomasz Domanski
 - Dr. H.-W. Becker
 - Klaus Ulrich
 - Herrn Scheibe der Firma Eckert & Ziegler

Durchgeführte theoretische Arbeit

- Auf Basis von Fermis Arbeiten (s. [1], [2]) und der Vernachlässigung der Coloumb-Kraft findet man für die Verteilung der Elektronen:

$$N(\eta) \sim \eta^2 \cdot (\sqrt{1 + \eta_{max}^2} - \sqrt{1 + \eta^2})^2 \quad \text{bzw.} \quad N(\mathcal{E}) \sim (\mathcal{E} - \mathcal{E}_{max})^2 \cdot (\mathcal{E}^2 \cdot 2\mathcal{E})$$

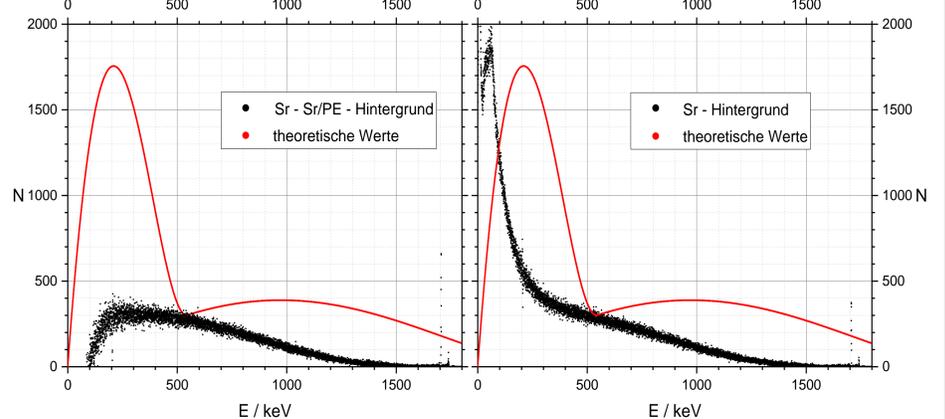
Normierter Impuls $\eta = \frac{p_e}{m_e \cdot c}$ Normierte kinetische Energie $\mathcal{E} = \frac{E_{kin}}{E_0}$

- Die Maximalwerte ergeben sich aus dem Massendefekt der Zerfälle.
- Zur theoretischen Vorhersage der Verschiebung treffen wir mehrere Annahmen:
 - Auf das Elektron wirken nur die Potentiale seines Ursprungsatoms.
 - Die gebundenen Elektronen bewegen sich auf Bohr'schen Bahnen.
 - Der Kern wird als homogen geladenen Kugel angesehen.
 - Nach dem Zerfall befindet sich das Elektron an der Oberfläche des Ursprungskerns.
- Der Versuch einer theoretischen Vorhersage der Verschiebung erfolgt wie folgt:
 - Im ersten Schritt wird angenommen, dass das Gesamtpotential des Ursprungsatoms mit einer effektiven Kernladungszahl nach Slater genähert werden kann.
 - Im zweiten Schritt wird zugrunde gelegt, dass das Elektron beim Durchgang zwischen zwei Schalen eine ähnliche Energie aufnimmt, wie es bei einem Schalenübergang eines der gebundenen Elektronen der Fall wäre. Die Übergangsenergien werden mit Hilfe des Moseley'schen-Gesetzes berechnet. Zwischen dem Kern und der ersten Elektronenschale wird das ungestörte Kernpotential angesetzt.
 - Im dritten Approximationsschritt wird die Überlagerung des Kernpotentials mit den Potentialen der gebundenen Elektronen betrachtet. Jedem Elektron wird ein Punktpotential zugeordnet. Als Abstand der Elektronen wird ihr Schalenradius angesetzt.

Auswertung

- Die gezeichneten theoretischen Spektren basieren auf der Annahme, dass das Yttrium dieselbe Aktivität aufweist wie das Strontium.
- Beim Durchgang der Elektronen durch das verbaute Aluminium verlieren diese Energie. Da dieser Effekt bei unter einem 1% liegt, wird dieser nicht berücksichtigt.
- Zur Bereinigung der Messwerte um auftretende γ -Strahlung wird die Messung durch PE zunächst um die Hintergrundmessung bereinigt. Zur Korrektur der Zählraten müssen die Messwerte um einen energieabhängigen Streckfaktor korrigiert werden [3]. Aufgetragen wird die Sr-Messung um obige Korrektur sowie die Hintergrund-Messung bereinigt (s. Graph 1).
- Aus der Auftragung der um die γ -Strahlung bereinigten Zählraten lässt sich keine Verschiebung des Spektrums ablesen, da im für das Spektrum relevante Energiebereich unter 100 keV die Ereigniszahl Null ist.
- Bereinigt man die Sr-Messung um die Hintergrund-Messung ergibt sich Graph 2.
- Verschiebt man das theoretisch errechnete Spektrum in Graph 2, sodass sich dessen Strontiumanteil mit der gemessenen Flanke deckt, so ergibt sich die Energieverschiebung zu:

$$E_V = 270 \text{ keV} \pm 50 \text{ keV}$$
- Aufgrund des statistischen Charakters der Messungen ist ein Fehler von \sqrt{N} der Messwerte anzunehmen. Übersichtlichkeitshalber wird dieser in den Graphen nicht aufgeführt.



Graph 1: Sr-Sr/PE-Hintergrund und theo. Werte gegen Energie

Graph 2: Sr-Hintergrund und theo. Werte gegen Energie

- Als theoretisch berechnete Verschiebung des Spektrums ergeben sich die folgenden Werte:

Tabelle 1: Errechnete Verschiebungen des Spektrums und deren Fehler

Ansatz	E_V / MeV	$\Delta E_V / \text{MeV}$
Konstante Kernladungszahl	8,30	5,09
Schalenübergang des Elektrons	13,2	0,7
Coulomb-Superposition	13,18	0,07

Fazit

Aus Graph 1 lässt sich keine Verschiebung des Spektrums ablesen, da für Energien bis 100 keV keine Ereigniszahl aufweisen. Dies ist durch Bremsstrahlung zu erklären, welche von den im PE gebremsten Elektronen emittiert wird und in diesem Bereich liegt. Aus Graph 2 lässt sich am Abknickpunkt die erwartete Verschiebung ablesen. Da die durch den K_{α} -Peak bei 74 keV des Bleis hervorgerufenen Ereignisse die Flanke verfälschen, ist der obige Fehler gewählt. Der Vergleich unserer theoretisch hergeleiteten Werte mit den experimentellen macht deutlich, dass deren Berechnung aufgrund von unzutreffenden Annahmen stattfand. Da das Potential des Elektrons gegenüber dem Kern in den Berechnungen dominiert, ist es naheliegend, dass die Annahme des Ursprungspunktes des Elektrons inkorrekt ist. Die klassische Beschreibung der Vorgänge unmittelbar nach dem β^- -Zerfall wurde somit falsifiziert, was als Bestätigung der Quantenmechanik verstanden werden kann. Dies wird durch die Beobachtung untermauert, dass der aus den experimentell gewonnenen Daten zurückgerechnete Abstand von Kern und Elektron mit dem Erwartungswert eines Elektrons der ersten Schale des Yttriums zusammenfällt.