

Aufgabenstellung

1. Aufnahme und Diskussion des Gamma-Untergrundes der Zerfälle von ^{137}Cs und ^{85}Kr
2. Aufnahme und Diskussion der Beta-Spektren von ^{137}Cs und ^{85}Kr
3. Energiekalibrierung und Bestimmung des Auflösungsvermögens des Spektrometers mit Hilfe der Konversionselektronen aus dem Zerfall von $^{137\text{m}}\text{Ba}$
4. Bestimmung der Grenzenergien der Beta-Zerfälle von ^{137}Cs und ^{85}Kr mit Hilfe eines Fermi-Plots
5. Untersuchung der Wechselwirkung von Beta-Strahlung mit Materie

Grundlagen

1. Zerfall von ^{137}Cs und ^{85}Kr

Cäsium-137 besitzt eine Halbwertszeit von ca. 30 Jahren und zerfällt über Beta-Minus-Zerfall. Zu 5,6% erfolgt der Zerfall unter Freisetzung einer maximalen Beta-Energie von 1,176 MeV ins Barium-137, welches stabil ist. Zu 94,4% zerfällt Cäsium-137 jedoch unter Freisetzung einer maximalen Beta-Energie von 513,97 keV in das metastabile Barium-137m. Diese besitzt eine Halbwertszeit von 2,55min und regt sich über Emission eines Gamma-Quants mit einer Energie von 661,66 keV in den Grundzustand Barium-137 ab.

Eine andere Möglichkeit der Abregung ist die Abregung über Konversionselektronen. Da der angeregte Bariumkern deformiert ist, überlappen sich die Wellenfunktionen der Hüllenelektronen teilweise mit dem Kernpotential, was zur Möglichkeit des Herausschlagens von Elektronen aus der K und der L-Schale führt. Dabei errechnet sich die Energie der Konversionselektronen aus der Differenz der Energie des angeregten Kerns und der Bindungsenergie der Elektronen in den Schalen.

Krypton-85 zerfällt größtenteils über Beta-Minus-Zerfall direkt in Rubidium-85. Zu 0,4% kann ein Zerfall in metastabiles Rubidium-85 erfolgen, welches sich über Aussendung eines Gamma-Quants ins stabile Rubidium-85 abregt.

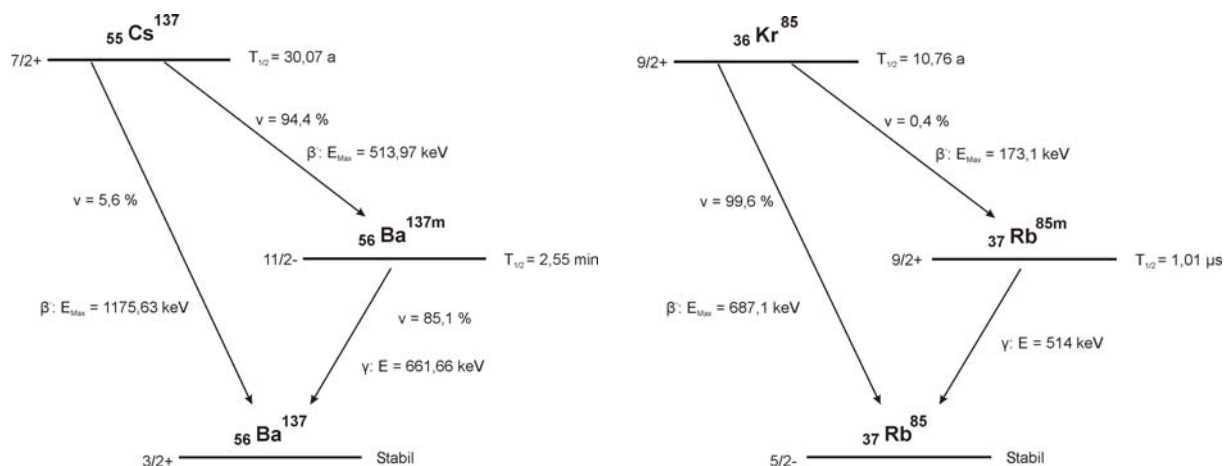


Abbildung 1: vereinfachte Zerfallsschemata von ^{137}Cs und ^{85}Kr

2. Beta-Zerfall

Je nach Spineinstellung von emittierten Neutrino und Elektron unterteilt man den Betazerfall in Fermi- (Spins antiparallel) und Gamow-Teller-Übergänge (Spins parallel). Tabelle 1 zeigt die weitere Klassifizierung in Abhängigkeit der Änderung von Kernspin I und Parität. Damit ergibt sich für die Kernspins des Ausgangskernes I_I und des Kernes nach Zerfall I_F .

$$I_F = I_I + L \quad \text{Fermi-Typ}$$

$$I_F = I_I + L + 1 \quad \text{Gamow-Teller-Typ}$$

Der Zusammenhang zwischen Parität und Drehmoment erfordert noch $\pi_I = \pi_F(-1)^L$.

Tabelle 1: Auswahlregeln für verschiedene Betaübergänge
(Angaben in Klammern beziehen sich auf Übergänge, die nicht möglich sind, wenn entweder der Ausgangs- oder Endspin gleich Null sind)

Übergangstyp	L	Fermi ΔI	Fermi $\Delta \pi$	Gamow-Teller ΔI	$\Delta \pi$
Erlaubt	0	0	Nein	(0),1	Nein
Verboten Typ 1	1	(0),1	Ja	0,1,2	Ja
Verboten Typ 2	2	(1),2	Nein	2,3	Nein
Verboten Typ 3	3	(2),3	Ja	3,4	Ja
Verboten Typ 4	4	(3),4	Nein	4,5	Nein

3. Fermi-Plot

In Abb. 2 ist ein typisches Betaspektrum dargestellt. Aufgrund der Form am energiereichen Ende des Spektrums ist es schwierig, die maximale Energie der Betateilchen zu bestimmen. Man benötigt sie aber z.B. um eine obere Grenze der Neutrinomasse abzuschätzen. Um diese Situation zu entschärfen, versucht man deshalb, ein linearisierte Form des Spektrums zu gewinnen, aus der man durch Extrapolation den Maximalwert der Betaenergie ablesen kann. Hier ist eine kurze Darstellung der Vorgehensweise. Sie soll aber nicht das Nachlesen ersetzen!

Das aufgenommene Spektrum enthält zunächst pro Kanal, der ja der Energie entspricht, eine bestimmte Anzahl an gezählten Impulsen. Wir nehmen nun an, dass die Detektoreffizienz nicht wesentlich energieabhängig ist. Damit entspricht das registrierte Spektrum in der Form dem der emittierten Elektronen. Für eine der kontinuierlichen Komponenten finden Sie bei [1] die folgende Formel für die Besetzung der Energieintervalle:

$$N(E) = \text{const.} \times (E_0 - E)^2 \times p \times W \times F(Z, E) \times C_n(Z, E) \times C(Z, E)_{SCR} \times (1 \pm b/W)$$

die aber erfreulicherweise geschrumpft werden kann:

$$N(E) = \text{const.} \times (E_0 - E)^2 \times p \times W \times F(Z, E)$$

Diese umgestellt ergibt

$$\sqrt{\frac{N(E)}{pWF(Z, E)}} = \text{const.} \times (E_0 - E)$$

mit $W = E + m$, $p = (E^2 + 2mE)^{1/2}$, $m = 511 \text{ keV}$ und der Fermifunktion $F(Z, E)$.

Durch Auftragen der linken Seite über die Energie lässt sich E_0 bestimmen. Für einen verbotenen Zerfall kann mit diesem E_0 ein weiterer Korrekturfaktor S_1 bestimmt werden. Über ein erneutes Auftragen der linken Seite obiger Gleichung, wobei zur Fermifunktion zusätzlich der Faktor S_1 multipliziert wird, erhält man ein korrigiertes E_0 . Detailliertere Angaben in [1].

$$S_1 = (E+511\text{keV})^2 - 511\text{keV} + (E_0-E)^2$$

Unser Detektor im Versuch misst direkt die Energie im Gegensatz zu anderen Verfahren in denen der Impuls des Elektrons durch Wechselwirkung mit einem Magnetfeld erhalten wird. Wir müssen deshalb nur den Kanälen Energien zuordnen. Um zu der Fermifunktion zu gelangen, können Sie z.B. Tab. 5-1 in [1] benutzen. Beachten Sie, dass Sie nicht unbedingt alle dort angegebenen Energien benötigen, und interpolieren Sie sich die Funktion zum passenden Z .

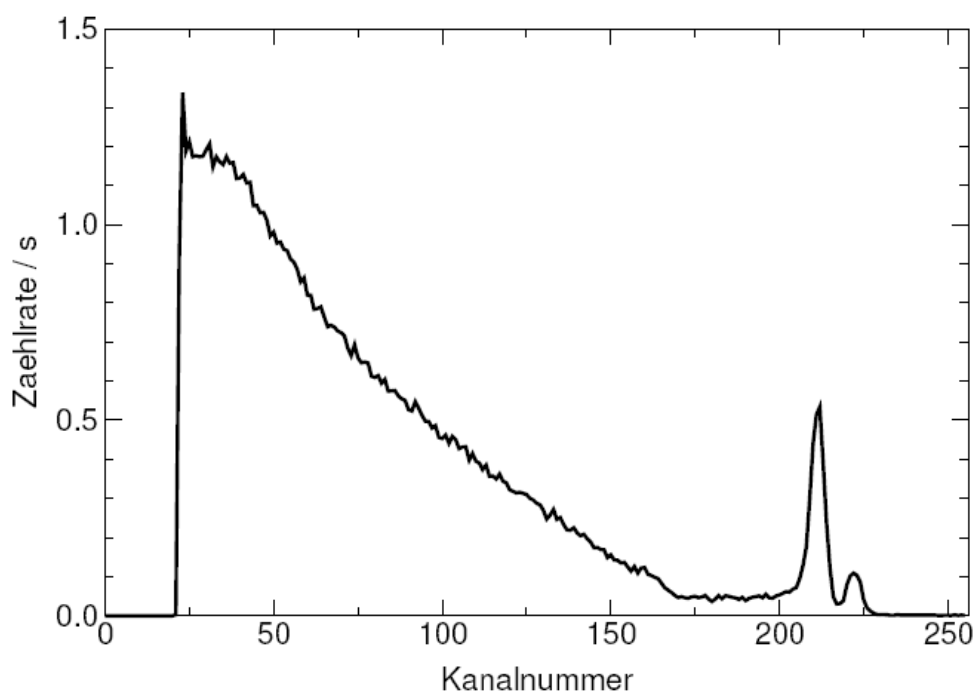


Abbildung 2: Typisches Beta-Spektrum für ^{137}Cs

4. Energieverlust beim Durchdringen von Materie

Wenn Betateilchen Material durchdringen, wechselwirken sie mit den Kernen der Atome/Ionen und den Elektronenhüllen. Da sie aber erheblich leichter sind, wird ihre Flugrichtung fortwährend umgelenkt und der wahre Weg, den sie im Material zurücklegen, ist erheblich länger als die jeweilige Schichtdicke, sehen Sie z.B. in Ref. [3] nach.

Dieser Abschnitt soll nur die Vorgehensweise umreißen. Eine Diskussion ist in [2] zu finden. Vergleichen Sie die experimentellen Werte mit berechneten. Verwenden Sie die für relativistische Elektronen modifizierte Bethe-Bloch-Gleichung

$$-\frac{dE}{dx} = 0.153\rho\frac{Z}{A}\beta^{-2}\left[\ln\frac{E(E+mc^2)^2}{2I^2mc^2} + (1-\beta^2) - (2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2)\ln 2 + \frac{1}{8}(1-\sqrt{1-\beta^2})^2 - \Delta_{pol}\right]$$

[MeV/cm]

Weil Z/A etwa konstant ist, hängt dE/dx praktisch nur von der Dichte der durchstrahlten Materie ab. Eine leichte Abhängigkeit von Z entsteht lediglich durch die Anregungsenergie I , die im Logarithmus erscheint. Für Aluminium findet man in [2] einen Wert von $I=150$ eV. Das Δ_{pol} in der Formel sollte erst ab MeV-Betas bedeutend werden.

Für den Energieverlust nach Landau gilt:

$$\Delta E_w = ax \left[\ln \frac{mv^2 ax}{I^2(1-\beta^2)} - \beta^2 + K - \Delta_{pol} \right]$$

Hier ist $K=1,12$; $a = (2\pi e^4 N Z / m v^2) = 0,153(\rho Z / A \beta^2)$. Der Energieverlust geplottet über der korrespondierenden Materialdicke in mg/cm^2 sollte ansteigende Geraden ergeben, wobei Behte-Bloch die mit dem steilsten Anstieg und Landau die mit dem kleinsten Anstieg ist. Die experimentellen Werte sollen dazwischen liegen.

5. Detektion von Beta-Strahlung

In diesem Versuch wird ein Silizium-Halbleiterdetektor (SiHLD) zur Aufnahme der Betaspektren verwendet. Die einfallenden Betateilchen geben ihre gesamte Energie an das Silizium des Detektors durch Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren im Halbleiter ab. Diese werden durch die angelegte Biasspannung von 60 V abgesaugt. Das Signal wird verstärkt und einem Pulshöhenanalysator (PHA) zugeführt. Die vom ^{137}Cs emittierte Gammastrahlung wird vom SiHLD ebenfalls detektiert und muss bei der Auswertung des Spektrums berücksichtigt werden.

Erläuterungen zur Aufgabenstellung

1. Aufnahme und Diskussion des Gamma-Untergrundes des Zerfalls von ^{137}Cs u. ^{85}Kr

Sie sollten zunächst den gamma-induzierten Untergrund messen. Der SiHLD registriert auch die vom ^{137}Cs und ^{85}Kr emittierte Gammastrahlung, sie müssen deshalb den Gammaanteil aus allen Spektren subtrahieren. Am Versuchsplatz finden Sie eine Aluminiumplatte. Schätzen Sie mit Hilfe der maximalen Reichweite von Beta-Teilchen die Mindestdicke einer Al-Platte ab, um die emittierten Elektronen abzuschirmen. Beim Abbremsen von Betateilchen wird auch Bremsstrahlung emittiert. Was schlussfolgern Sie für die Position des Absorbers bezüglich Quelle und Detektor? Aus dem Untergrundspektrum kann nach erfolgter Energiekalibrierung die Maximalenergie der Compton-Elektronen bestimmt werden.

2. Aufnahme und Diskussion des Beta-Spektrums von ^{137}Cs und ^{85}Kr

Anschließend sind die Beta-Spektren von ^{137}Cs sowie ^{85}Kr aufzunehmen und zu diskutieren. Dabei soll insbesondere auf die Konversionselektronen und das Beta-Zerfall-Spektrum eingegangen werden.

3. Energiekalibrierung und Bestimmung des Auflösungsvermögens des Spektrometers mit Hilfe der Konversionselektronen aus dem Zerfall von ^{137m}Ba

Mit Hilfe der Energien der Konversionselektronen erfolgt die Energiekalibrierung des Spektrometers. Zur Bestimmung des Energieauflösungsvermögens eines Messsystems zieht man die Halbwertsbreite (FHWM) einer gemessenen Linie heran. Das Auflösungsvermögen hängt gewöhnlich auch von der Energie ab. Es genügt also nicht, nur die Breite eines Kanals

anzugeben, da das Auflösungsvermögen hauptsächlich durch den Detektor begrenzt wird und nicht durch die Kanalzahl des Analog-Digital-Konverters.

Für diese Konversionselektronen lassen sich Konversionskoeffizienten α berechnen. Sie geben das Verhältnis der Intensität der Konversionspeaks zur Gamma-Intensität wieder.

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{N_{konv}}{N_{\gamma}} \\ &= \frac{N_{konv}}{N_{ges} - N_{konv}}\end{aligned}$$

Die ermittelten Werte sind mit Literaturangaben zu vergleichen.

4. Bestimmung der Grenzenenergien der Beta-Teilchen von ^{137}Cs und ^{85}Kr mit Hilfe eines Fermi-Plots

Behandeln Sie das Problem zunächst als erlaubten β -Zerfall zur Gewinnung eines Startwertes E_0 für eine iterative Lösung. Verwenden Sie das erhaltene E_0 zur Berechnung des Formfaktors S_1 für den 1-fach-unique verbotenen Betazerfall. Berechnen Sie damit abschließend die Grenzenenergie E_0 .

5. Untersuchung der Wechselwirkung von Beta-Strahlung mit Materie

Für Papier mit einer Flächenmasse von 80 g/m^2 (1-4 Blätter übereinander) und Aluminium mit einer Flächenmasse von $2,7 \text{ mg/cm}^2$ (je 3,6,9 und 12 Blätter) sollen die Betaspektren für ^{137}Cs und ^{85}Kr aufgenommen werden und folgende Untersuchungen durchgeführt werden:

(a) *Untersuchung des Energieverlustes von Elektronen beim Durchgang durch Al-Proben*

Stellen Sie die mittlere Energie der K-Konversionselektronen in Abhängigkeit von der Flächenmasse grafisch dar. Vergleichen Sie die gemessenen Werte mit Rechnungen nach der relativistischen Bethe-Bloch-Theorie und nach der Landau-Theorie!

(b) *Untersuchung der Absorption von Beta-Strahlung*

Stellen Sie das Flächenintegral über den kontinuierlichen Anteil der Beta-Zerfälle in Abhängigkeit von der Flächenmasse graphisch dar, und bestimmen Sie daraus einen Schwächungskoeffizienten. (Es kann zur Näherung das exponentielle Schwächungsgesetz genutzt werden, obwohl dieses nur für Photonen gilt!). Vergleichen Sie die Ergebnisse von Papier und Aluminium. Welches Material ist besser für die Abschirmung der Beta-Teilchen geeignet?

Hinweise:

Versuchsbeginn:	8.00 Uhr	
Ort:	ASB 423	
Ansprechpartner:	DP Axel Jahn	jahn@asp.tu-dresden.de

Quellen:

- [1] J. Kantele Handbook of nuclear spectroscopy. Academic Press, Harcourt Brave & Company, London, 1995.
- [2] K. Siegbahn. Alpha, Beta and Gamma Ray Spectroscopy. North Holland publishing company, Amsterdam, 1965.
- [3] W. Stolz. Radioaktivität. Springer Verlag, Berlin, Gittingen, Amsterdam

Anhang

Tabelle 2: Datenzusammenstellung

Bezeichnung	Wert
Bindungsenergie K-Schale für ^{56}Ba	37,441 keV
Bindungsenergie L-Schale für ^{56}Ba	5,987 keV
Konversionskoeffizient für K-Elektron	9,8%
Konversionskoeffizient für L-Elektron	2,2%

Näherungsformeln für die maximale Reichweite von Beta-Strahlung

$$R_{Max} = \frac{E_{Max}}{2 \cdot \rho} \quad E_{Max} \text{ in MeV, } \rho \text{ in g/cm}^3, R_{Max} \text{ in cm}$$

$$R_{Max} \cdot \rho = -0,11 + \sqrt{0,0121 + \left(\frac{E_{Max}}{1,92}\right)^2} \quad E_{Max} \text{ in MeV, } \rho \text{ in g/cm}^3, R_{Max} \text{ in cm}$$

Näherungsformeln für die Abschwächung der kontinuierlichen Beta-Strahlung

$$\mu_m = 0,008 \cdot Z^{0,28} \cdot E_{Max}^{-(1,57-(Z/160))} \quad E_{Max} \text{ in MeV, } \mu_m \text{ in cm}^2/\text{mg}$$

$$\mu_m = \frac{17}{E_{Max}^{1,14}} \quad E_{Max} \text{ in MeV, } \mu_m \text{ in cm}^2/\text{g}$$