

Radioaktivität

Der radioaktive Zerfall instabiler Nuklide äußert sich u.a. durch die dabei entstehende Strahlung, die anhand ihrer ionisierenden Wirkung mit Hilfe verschiedener Detektoren nachgewiesen werden kann. Kosmische Strahlung sowie natürlich vorkommende und durch menschliches Wirken freigesetzte, radioaktive Substanzen verursachen einen konstanten Strahlungsuntergrund. Der radioaktive Zerfall eines bestimmten Atoms ist nicht vorhersagbar sondern erfolgt rein zufällig. Die Häufigkeitsverteilung der Zerfallsrate einer ausreichend großen Menge radioaktiven Materials wird durch eine Poisson-Verteilung beschrieben. Die mittlere Zerfallsrate einer radioaktiven Probe nimmt exponentiell mit der Zeit ab. Es gibt unterschiedliche Arten, α - (He-Kerne), β - (Elektronen), und γ -Strahlung (Photonen), die sich in der Wechselwirkung mit Materie deutlich unterscheiden. Weitere Details finden Sie am Ende dieser Anleitung.

In zwei Experimenten wird die Reichweite von α -Teilchen in Luft und die Absorption von β -Strahlung in Aluminium gemessen und anhand der dazugehörigen physikalischen Gesetze ausgewertet. Anschließend wird mittels der Neutronenaktivierung ^{104}Rh präpariert und dessen Halbwertszeit bestimmt und zuletzt mit einem Szintillationszähler das Energiespektrum von ^{60}Co gemessen.

1 Lernziele

- Radioaktiver Zerfall und Arten radioaktiver Strahlung,
- Statistik des Zerfallsprozesses,
- Wechselwirkung radioaktiver Strahlung mit Materie,
- Funktionsweise des Geiger-Müller-Zählrohrs und des Gamma-Spektrometers,
- physikalische Einheiten zur Beschreibung ionisierender Strahlung.

2 Experimenteller Aufbau

- Profilschiene mit Präparateblock (im Bild links) und Detektorblock (Bildmitte),
- Geiger-Müller-Zählrohr (im Detektorblock montiert),
- Sensor-CASSY mit GM-Box zum Anschluss des GM-Zählrohrs für die Datenerfassung mit dem Computer,
- Gamma-Spektrometer mit Szintillationsdetektor,
- Radioaktive Präparate: ^{241}Am , ^{60}Co , ^{103}Rh und ^{90}Sr als Strahlerstifte
- Schieblehre zur Abstandsmessung,
- Mikrometerschraube zur Dickenmessung,
- Papier,
- ein Satz von Aluminiumabsorbern.



3 | Messung - | Durchführung - | Auswertung

3.1 Bestimmung der Untergrundzählrate R_0

Kosmische Strahlung und die Zerfallsprodukte natürlich vorkommender radioaktiver Isotope werden ebenfalls von Detektoren erfasst und verursachen ein zeitlich konstantes und praktisch richtungsunabhängiges Untergrundsignal. Bei der quantitativen Auswertung geringer Zählraten eines radioaktiven Präparates muss dieser Untergrund subtrahiert werden. Zur Bestimmung der Untergrundzählrate wird zu **Beginn des Praktikums** eine Langzeitmessung ohne radioaktives Präparat durchgeführt.

- 1) Schließen Sie den Stecker des Netzteils an das CASSY-Modul an, starten Sie das Programm „CASSY Lab 2“ und wählen Sie im Konfigurationsfenster die „GM-Box“ durch Anklicken des Symbols auf dem verwendeten Modulsteckplatz (>Close).
- 2) CASSY Lab 2 Settings: Sensor-Cassy(A/B) > Input (GM Box) > Events N_{A1} : Meas. Time (15 min), Interval (5 s).
- 3) Messung mit F9 starten.

- Übertragen Sie die Tabellenwerte in QtiPlot und erstellen Sie eine Grafik (>Symbol>Scatter) der Daten $N_{A1}(t)$.
- Lesen Sie den Endwert der Zählereignisse nach $\Delta t = 900\text{ s}$ ab und berechnen Sie die mittlere Untergrundzählrate $R_0 = N_{A1}(900\text{ s}) / \Delta t$.
- Da die Zählereignisse einer Poisson-Verteilung folgen (siehe unten), ist die statistische Unsicherheit $\sigma_N = \sqrt{N_{A1}}$. Berechnen Sie die Unsicherheit der Zählrate $u_R = \sigma_N / \Delta t$ und geben Sie dann die Untergrundzählrate inklusive ihrer Unsicherheit an ^a

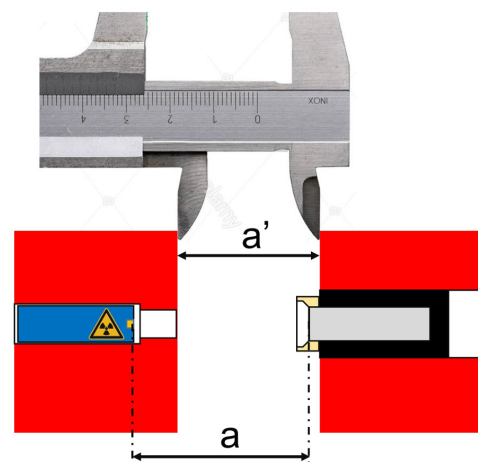
^aHinweise zur Wahl der Dezimalstellen: Die Unsicherheit wird auf der höchsten signifikanten Dezimalstelle gerundet und der Messwert wird auf derselben Dezimalstelle gerundet. Beispiel: $\langle M \rangle = 1.3542$, $u_M = 0.0253 \rightarrow M = 1.35 \pm 0.03$.
Siehe auch: W. Schenk, F. Kremer, „Physikalisches Grundpraktikum“, S. 18ff.

3.2 Reichweite von α -Strahlung in Luft

Das im Versuch verwendete Isotop ${}_{95}^{241}\text{Am}$ (Americium) zerfällt unter Emission eines α -Teilchens in das Isotop ${}_{93}^{237}\text{Np}$ (Neptunium). Die Reichweite der α -Teilchen in Luft wird im Experiment durch Messen der Zählrate in Abhängigkeit vom Quelle-Detektor-Abstand ermittelt. Dazu muss die Zählrate bezüglich der Änderung des vom Zählrohr erfassten Raumwinkels korrigiert werden.

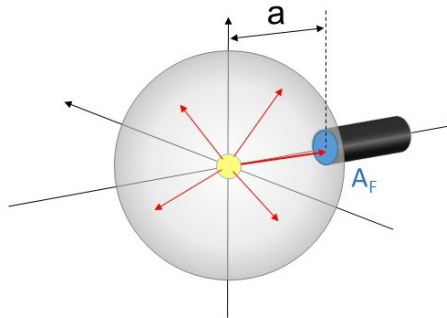
- Präparat ${}_{95}^{241}\text{Am}$ einbauen (Versuchsbetreuer).
- Abstand a zwischen Detektor und Quelle auf 24 mm einstellen. ^a
- CASSY Lab 2 Settings: Sensor-Cassy(A/B) > Input (GM Box) > Events N_{A1} : Meas. Time (60 s), Interval (100 ms).
- Erstellen Sie in Ihrem Laborbuch eine Tabelle mit drei Spalten für den Abstand a' , Meas. Time Δt (siehe unten) und die Anzahl der Zerfallsereignisse N_{A1} .
- Messung mit F9 starten.
- Verringern Sie den Abstand a in Schritten von 1 mm bis $a_{\min} = 10\text{ mm}$ und bestimmen Sie die Zahl der Zerfallsereignisse. Da die Unsicherheit der Ereignisanzahl durch $N^{1/2}$ gegeben ist, kann die Messdauer Δt bei großen N_{A1} (kurzen Abständen) ohne Verlust an Genauigkeit verringert werden (z.B. auf $\Delta t = 30\text{ s}$). In diesem Fall sollte aber das Intervall der Messwerterfassung ebenfalls im gleichen Verhältnis verringert werden.
- Messen Sie beim kürzesten Abstand $a = 10\text{ mm}$ zusätzlich die Zerfallsereignisse $N_{A1,\text{Papier}}$ innerhalb einer Messdauer von 10 s und halten Sie dabei ein Stück Papier zwischen Quelle und Detektor.

Verwenden Sie eine Schieblehre. Mit den Innenmessschenkel kann der Abstand a' zwischen Präparat- und Detektorblock eingestellt werden. Wegen der unterschiedlichen Einbaupositionen von Präparat und Zählrohr in den jeweiligen Blöcken ist eine Korrektur notwendig, $a = a' + \Delta a_{\text{korr}}$. Den Korrekturwert Δa_{korr} erhalten Sie von dem Betreuer.

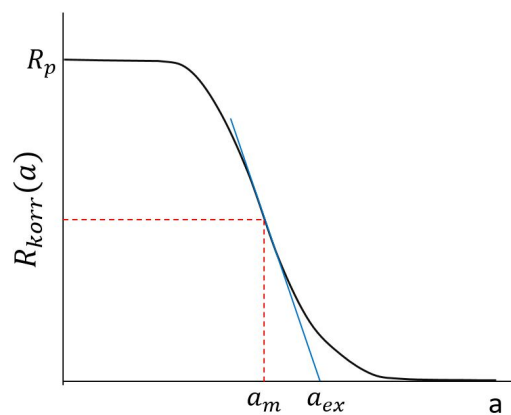


- Erstellen Sie in QtiPlot eine Tabelle mit den Spalten a [mm], N_{A1} und Δt [s].
- Erzeugen Sie eine neue Spalte und berechnen Sie die Zählrate $R = N_{A1} / \Delta t$.
- Erzeugen Sie eine weitere Spalte und subtrahieren Sie die Untergrundzählrate aus Experiment 1.

- d) Korrigieren Sie nun die Zählrate auf die Änderung des vom Detektor erfassten Raumwinkels bei Variation des Abstandes zur Quelle. Unter der Annahme, dass die Strahlung aus der Quelle keine Vorzugsrichtung hat (Isotropie), entspricht der vom Detektor erfasste Anteil aller Zerfallsereignisse gerade dem Verhältnis der Fläche A_F des Detektorfensters (Durchmesser $D_F = 11 \text{ mm}$) zur Gesamtfläche A_K einer Kugel um die Quelle mit Radius a . Berechnen Sie das Verhältnis $F(a) = A_K(a)/A_F$ und daraus die korrigierte Zählrate $R_{\text{korrr}}(a) = R(a) \cdot F(a)$.



- e) Erstellen Sie eine Grafik der korrigierten Zählrate R_{korrr} in Abhängigkeit vom Abstand a .
 f) Bestimmen Sie den Plateau-Wert der Zählrate bei kurzen Abständen und die mittlere Reichweite a_m .
 g) Bestimmen Sie die aus dem Wendepunkt extrapolierte Reichweite a_{ex} .



- h) Berechnen Sie mit Hilfe der empirischen Formel von Geiger ([3], S. 302)

$$\frac{a_m}{\text{mm}} = 3,1 \left(\frac{Q}{\text{MeV}} \right)^{3/2} \quad (1)$$

und der Maximalenergie des Zerfalls $Q = 5.64 \text{ MeV}$ die erwartete Reichweite und vergleichen Sie das Resultat mit Ihrem Messergebnis. Können Sie den Befund erklären?

- i) Berechnen Sie aus $N_{A1, \text{Papier}}$ den Anteil der α -Strahlung, der durch das Papier absorbiert wurde.

3.3 Absorption von β -Strahlung in Aluminium

Das Isotop ^{90}Sr zeigt einen β^- -Zerfall mit einer Maximalenergie von 546 keV zu ^{90}Y und einer Halbwertszeit von $28,8$ Jahren. Es wird die Absorption der Strahlung in Aluminium gemessen und daraus die Absorptionskonstante von Aluminium berechnet.

- 1) Präparat ^{90}Sr einbauen (Betreuer).
- 2) Abstand Quelle - Detektor auf $a = 20 \text{ mm}$ einstellen. ^a
- 3) CASSY Lab 2 Settings: Sensor-Cassy(A/B) > Input (GM Box) > Events N_{A1} : Meas. Time (60 s), Interval (100 ms).

- 4) Starten Sie mit F9 eine Messung. Das Ergebnis dieser Messung ist der Zahl der β -Teilchen, die nach Absorption in Luft das Zählrohr erreichen.
- 5) Messen Sie nun bei gleichem Abstand von Quelle und Detektor die Zerfallsereignisse, wobei Sie in der Halterung des Präparateblocks jeweils einen/mehrere Aluminiumabsorber unterschiedlicher Dicke (ca 7 verschiedene Dicken von 0,08-2 mm) montieren.
- 6) Messen Sie zusätzlich die Zerfallsereignisse $N_{A2,Papier}$ innerhalb einer Messdauer von 10s und halten Sie dabei ein Stück Papier zwischen Quelle und Detektor.

^aVerwenden Sie eine Schieblehre. Mit den Innenmessschenkel kann der Abstand a' zwischen Präparat- und Detektorblock eingestellt werden. Wegen der unterschiedlichen Einbaupositionen von Präparat und Detektor in den jeweiligen Blöcken ist eine Korrektur notwendig, $a = a' + \Delta a_{korrr}$ (siehe auch Fußnote in Aufgabenteil 3.2).

- a) Erstellen Sie in QtiPlot eine Tabelle und tragen Sie die Dicke der Aluminiumabsorber d [mm] und die Anzahl der Zerfallsereignisse N_{a1} ein.
- b) Erzeugen Sie eine neue Spalte und berechnen Sie darin die Standardabweichung $\sigma_N = (N_{A1})^{1/2}$. Setzen Sie diese Spalte als y-Error und erstellen Sie eine Grafik (>Symbol>Scatter) der Messdaten $N_A(d)$.
- c) Führen Sie eine nichtlineare Anpassung mit einer exponentiellen Abfallsfunktion

$$N_A = N_0 \exp(-\mu d) \quad (2)$$

durch und bestimmen Sie den Absorptionskoeffizienten μ und die mittlere Eindringtiefe $\delta = 1/\mu$.

- d) Berechnen Sie aus $N_{A2,Papier}$ den Anteil der β -Strahlung, der durch das Papier absorbiert wurde.

3.4 Neutronenaktivierung

In diesem Versuch wird stabiles ^{103}Rh durch den Einfang thermischer Neutronen aktiviert. Durch den Neutroneneinfang wird ^{104}Rh erzeugt, das anschließend durch β^- -Zerfall zu ^{104}Pd zerfällt. Aus der Zeitabhängigkeit der Zerfallsrate wird die Halbwertszeit von ^{104}Rh bestimmt.

Für diese Messungen wird statt des für die vorhergehenden Versuche benutzten Zählrohrs mit Fenster auf der Vorderseite ein zylinderförmiges Zählrohr mit dünner Glaswand benutzt, über das der aktivierte röhrenförmigen Metallzylinder geschoben wird.

- 1) Senken Sie die Rh-Probe mit Hilfe der Probenhalterung in eines der am nächsten Zur Mitte der Neutronenquelle gelegenen Löcher, Abbildung 5.4. Messen Sie die Aktivierungsdauer (ca. 5 min - Als Faustregel zur Aktivierungszeit empfiehlt es sich das 6-fache der Halbwertszeit des Isotops zu verwenden) mit einer Stoppuhr. Bereiten Sie während der Wartezeit die Messung vor:
 - 2) CASSY Lab 2 Settings: Sensor-Cassy(A/B) > Input (GM Box) > Rate R_{A1} : Range (40 1/s), Gate Time (14 s), Meas. Time (600 s), Interval (15 s).
 - 3) Nach der Aktivierung nehmen Sie die Probe heraus und stülpen sie möglichst schnell (vorsichtig und mit Schutzhandschuhen) über das Zählrohr und starten Sie die Messung.
- a) Übertragen Sie Ihre Messungen in das Auswertprogramm.
 - b) Passen Sie eine Exponentialfunktion mit konstantem offset für die Untergrundzählrate an Ihre Messwerte an und bestimmen Sie daraus die Halbwertszeit von ^{104}Rh .

3.5 Gamma-Spektroskopie

Zur Messung der Energiespektren von γ -Strahlung wird ein Szintillationsdetektor benutzt. Das Spektrometer selber hat keine Energieeichung, weil die Lage eines Signals von der Detektorelektronik und zahlreichen Variablen, z.B. von den frei einzustellenden Verstärkerempfindlichkeiten, abhängt. Daher wird im ersten Schritt das Spektrometer geeicht. Nach dieser Kalibrierung kann das Energiespektrum einer unbekannt Probe bestimmt werden. Die Eichung und die Bestimmung der γ -Energie der unbekannt Probe wird extern mit dem Grafikprogramm QtiPlot durchgeführt.

Eichung der Energie-Skala des Gamma-Spektrometers

Zunächst wird das Spektrometer anhand gut erkennbarer Linien von γ -Übergängen mit bekannter

Energie kalibriert.

- 1) Lassen Sie sich vom Betreuer zunächst das ^{22}Na Präparat vor den Szintillationskristall einbauen (Abstand ca. 2 cm).
- 2) Stellen Sie sicher, dass folgende Einstellungen der Geräte vorliegen:
 - Die Hochspannungsversorgung der Photomultiplier-Röhre ist auf -1900 V eingestellt.
 - Die Eingangskapazität des Vorverstärkers ist auf 0 pF eingestellt.
 - Der Hauptschalter ganz rechts für die Elektronik des Szintillationszählers in dem Einschubgehäuse ist eingeschaltet.
- 3) Starten Sie die Software MAESTRO for Windows auf dem Desktop. Mit dieser Software spricht man die Messgeräte für diesen Versuch an.
- 4) Nach dem Öffnen des Programmes sehen Sie gewöhnlich ein Messfenster, das mit „...MCB...“ betitelt ist. Wenn das nicht der Fall ist, wählen Sie diese Einstellung in der Kopfzeile des Messfensters aus. In der Kopfzeile des Messfensters befindet sich links ein Button mit grünem Kreis „Go“ mit der Sie eine Messung starten, rechts daneben einen Button zum Stoppen der Messung („Stop“; bei laufender Messung rotes Achteck) und nochmals rechts daneben einen Button zum Löschen des Inhalts. Zu Beginn des Versuchs sollte dieses Fenster leer sein. Ist dies nicht der Fall, so löschen den Inhalt.
- 5) Durch einen Klick auf die Schaltfläche „Start Acquisition“ (grüner Kreis mit Aufschrift „Go“) starten Sie dann die Messung.
- 6) Lassen Sie die Messung etwa 10 Minuten lang laufen, bis Sie ein sauberes Spektrum in dem Messfenster des Detektors sehen. Beenden Sie dann die Aufnahme von Daten durch Klick auf „Stop acquisition“ (rotes Achteck mit Aufschrift „Stop“) und speichern Sie die Messung im ASCII SPE-Format.
- 7) Bei der stärksten Linie („Peak“) in diesem Spektrum handelt es sich um die 511 keV-Linie verursacht durch die Paarvernichtung von Positronen, die das ^{22}Na -Präparat emittiert. Eine weitere γ -Emission ist bei $E_\gamma = 1275 \text{ keV}$ zu sehen, die nach dem β^+ -Zerfall aus einem angeregten Zustand des ^{22}Ne -Kerns erfolgt. Diese beiden Linien werden zur Eichung des Energiespektrums verwendet.

Messung des Energiespektrums von ^{60}Co

Mit der geeichten Apparatur kann man nun weitere Spektren anderer Nuklide aufnehmen. Da die γ -Spektrallinien spezifisch für ein bestimmtes Radionuklid sind, kann man anhand der Energie der Spektrallinien die Nuklide in einer Probe identifizieren. Die Verstärkungseinstellungen der Apparatur dürfen dabei aber nicht mehr verändert werden.

- 1) Löschen Sie den Inhalt des Detektor-Messfensters durch anklicken des Lösch-Buttons.
- 2) Positionieren Sie das ^{60}Co -Präparat ca. 2 cm vor den Detektor und starten Sie die Messung. Warten Sie ca. 10 Minuten, bis Sie ein sauberes Spektrum vorliegen haben.
- 3) Beenden Sie dann die Messung. Speichern Sie das Spektrum analog zur Eichung ebenfalls im ASCII SPE-Format ab.
 - a Benutzen Sie QtiPlot und die ^{22}Na -Messung um das Energiespektrum zu eichen. Ziehen Sie die Datei in den Arbeitsbereich von QtiPlot. Dabei werden die Daten automatisch in eine Tabelle eingetragen. Erzeugen Sie eine neue Spalte und füllen Sie diese mit den Zeilennummern. Verschieben Sie diese Spalte nach links und setzen Sie diese Spalte als X und die Datenspalte als Y. Erstellen Sie ein Punktediagramm und wählen Sie als Symbolgröße 0. Passen Sie an beide Linien eine Gauß-Kurve an. Lesen Sie mit Hilfe des Data>Data Reader die linke und rechte Grenze des Peaks ab. Führen Sie nun einen nichtlinearen Fit (>Analyse>Fitting>Fit Wizard...>built-in>Gauss Amp) durch. Wählen Sie sinnvolle Startwerte, eine markante Linienfarbe und grenzen Sie den Fitbereich ein (Data Set > From... To...). Die im Ergebnisfenster x_c genannte Größe ist dann die Position des Peaks.
 - b Erstellen Sie aus den beiden Peak-Positionen und den zugehörigen Energiewerten eine Geradengleichung (alternativ können Sie auch aus den beiden Eichpunkten ein neues Diagramm erstellen und einen linearen Fit durchführen).

- c Importieren Sie jetzt die Daten der ^{60}Co -Messung. Erzeugen Sie mit Hilfe der Energiekalibrierung eine geeichte x-Achse. Passen Sie an die beiden Peaks jeweils eine Gauß-Kurve an und ermitteln sie so die jeweiligen Energien. Drucken Sie diese Grafik mit den eingetragenen Energiewerten aus.

4 Vorbereitung, Fragen und Berechnungen vor Versuchsantritt

4.1 Vorbereitung

Informieren Sie sich zur Vorbereitung auf das Praktikum über die Themen, die oben als Lernziele genannt sind. Lesen Sie sorgfältig Kapitel 5. Wir empfehlen außerdem folgende Literatur:

- Themenkreis 47 und 48 in „Das neue Physikalische Grundpraktikum“ von H.J. Eichler, H.D. Kronfeldt, und J. Sahn.
- Kapitel O-5.3 bis O-5.5 in „Physikalisches Praktikum“ von W. Schenk und F. Kremer.

Diese Bücher sind im internen Netz der UdS kostenlos zugänglich.

Die physikalischen Grundlagen dieses Versuches werden außerdem in einschlägigen Lehrbüchern unter der Thematik „Radioaktivität“ oder „Ionisierende Strahlung“ behandelt. Sie finden im Internet auch zahlreiche Videos zur Funktionsweise von Detektoren, zur Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materie und ihrer biologischen Wirkung.

4.2 Fragen und Berechnungen

Beantworten Sie vor dem Versuchstermin folgende Fragen schriftlich in Ihrem Laborbuch:

- 1) Was ist ein Isotop? Was bedeutet die Angabe $^{226}_{88}\text{Ra}$? Was versteht man unter einer radioaktiven Zerfallsfamilie? Geben Sie dafür jeweils ein Beispiel an.
- 2) Geben Sie Masse (SI-Einheiten und atomare Masseneinheiten), Ladung (SI), von Elektron, Neutron, Positron, Proton, Neutrino an.
- 3) Zur Strahlungsmessung (Dosimetrie) werden die Größen Aktivität, Energiedosis und Äquivalentdosis benutzt. Wie sind diese Größen definiert und in welchen Einheiten werden sie gemessen?
- 4) Wie ändert sich die Aktivität eines radioaktiven Präparats mit der Zeit? Was versteht man unter radioaktivem Gleichgewicht?
- 5) Was versteht man unter elektronischer Anregung eines Atoms, Ionisation und Rekombination?
- 6) Mit welcher Geschwindigkeit verlässt ein α -Teilchen einen ^{226}Ra -Kern, wenn ihm dabei infolge der Änderung der Bindungsenergie im Kern eine kinetische Energie von 4,7 MeV mitgegeben wird?
- 7) Wieso erfolgt die Schwächung monoenergetischer α -Strahlung nicht nach einem exponentiellen Absorptionsgesetz?
- 8) Auf welche Weise wird biologisches Gewebe durch radioaktive Strahlung geschädigt? Wie hoch ist die natürlich auftretende Strahlenbelastung eines Menschen in Deutschland? Wodurch ist diese bedingt?
- 9) Beschreiben Sie den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählers und eines Szintillationszählers.
- 10) Wieso sind mit dem Szintillationszähler energieaufgelöste Messungen möglich, nicht jedoch mit dem Geiger-Müller-Zählrohr?

- [1] Hans Joachim Eichler, Heinz-Detlef Kronfeldt, Jürgen Sahn, *Das neue Physikalische Grundpraktikum*, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [2] Christoph Kommer, Tim Jugendhat, Niklas Wahl, *Tutorium Physik fürs Nebenfach*, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, 2015.
- [3] Wolfgang Schenk, Friedrich Kremer, *Physikalisches Grundpraktikum*, Springer Spektrum Wiesbaden, 2014.

5 Zusatzmaterial

5.1 Radioaktiver Zerfall

Atomkerne bestehen aus Nukleonen, den positiv geladenen Protonen (p) und den ungeladenen Neutronen (n), die durch Kernkräfte zusammengehalten werden. Nicht jede Kombination einer Protonenzahl Z und Neutronenzahl N zu einem Kern mit der Massenzahl $A = N + Z$ ist in der Natur realisiert oder im Labor herstellbar. Nur ganz bestimmte Kombinationen führen zu stabilen Kernen, d.h. zu Kernen, die sich ohne äußere Einflüsse im Laufe der Zeit nicht verändern. Allerdings kommen auch instabile Kerne (Radionuklide) in der Natur vor (natürliche radioaktive Kerne) und lassen sich darüber hinaus in großer Zahl im Labor herstellen (künstliche radioaktive Kerne). Instabil sind sie bezüglich der Zahl Z und/oder der Zahl N im jeweiligen Kern. Diese ändern sich im Laufe der Zeit, indem spontan Teilchen und Energie aus dem Kern emittiert werden (Radioaktivität). Ist auch der durch den Zerfall entstandene Kern selbst instabil, zerfällt dieser seinerseits erneut. Es entsteht im allgemeinen eine ganze Zerfallskette, die letztlich bei einem stabilen Nuklid endet (Radioaktive Zerfallsreihen).

Der radioaktive Zerfall instabiler Nuklide äußert sich durch die dabei entstehende Strahlung, die anhand ihrer ionisierenden Wirkung mit einem Detektor, z.B. einem Geiger-Müller-Zählrohr, nachgewiesen werden kann. Kosmische Strahlung sowie natürlich vorkommende und durch menschliches Wirken freigesetzte radioaktive Substanzen verursachen einen konstanten Strahlungsuntergrund.

Der radioaktive Zerfall eines bestimmten Kerns ist nicht vorhersagbar sondern erfolgt rein zufällig. Die Häufigkeitsverteilung der Zerfallsrate einer ausreichend großen Menge radioaktiven Materials wird durch eine Poisson-Verteilung beschrieben. Die Menge einer radioaktiven Probe nimmt exponentiell mit der Zeit ab,

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \quad (3)$$

Hierbei ist N_0 die Anzahl radioaktiver Kerne zum Zeitpunkt t_0 und λ die Zerfallskonstante. Alternativ wird die zeitliche Stabilität durch die mittlere Lebensdauer τ oder die Halbwertszeit $T_{1/2}$, nach der die Hälfte der Kerne zerfallen ist, charakterisiert. Es gilt der Zusammenhang $T_{1/2} = \tau \ln 2 = \ln 2 / \lambda$.

Die „Stärke“ eines radioaktiven Präparats, d.h. die mittlere Zahl der Zerfälle pro Zeit, wird als Aktivität A bezeichnet und in der Einheit Becquerel (Bq) angegeben. 1 Bq entspricht einem Zerfall pro Sekunde. Es gibt unterschiedliche Arten emittierter Teilchen, α - (^4He -Kerne), β^- (Elektronen), β^+ (Positronen), und γ -Strahlung (Photonen), die sich in der Wechselwirkung mit Materie deutlich unterscheiden.

5.2 Reichweite von α -Strahlung in Luft

Beim α -Zerfall geht ein Mutterkern mit der Ordnungszahl Z und der Massenzahl A unter Emission eines ^4He -Kerns, des α -Teilchens ($Z = 2, A = 4$), in einen Kern mit der Ordnungszahl $Z - 2$ und der Massenzahl $A - 4$ über. Der Zerfall lässt sich symbolisch schreiben als



Auf beiden Seiten der Gleichung steht die gleiche Anzahl von Protonen Z und die gleiche Anzahl von Nukleonen A . Dies gilt für alle radioaktiven Zerfälle. Die Zahl der Nukleonen und die Gesamtladung müssen erhalten bleiben.

Der α -Zerfall ist nur möglich, wenn die Kernmasse m auf der linken Seite von Gl. (1) größer ist als die Summe auf der rechten. Zu den Kernmassen kommen im neutralen Atom noch Z Elektronenmassen m_0 hinzu und wir können statt der Kernmassen die Atommassen $M(Z, A) = m(Z, A) + Zm_0$ benutzen. Mit der Einsteinschen Masse-Energie-Äquivalenz ($E = mc^2$) ergibt sich für die Zerfallsenergie

$$Q = [M(Z, A) - M(Z - 2, A - 4) - M({}^4_2 \text{He})]c^2 \quad (5)$$

Nur für $Q > 0$ ist ein α -Zerfall möglich und dies ist, wie sich zeigt, nur bei den Kernen mit $A > 150$ der Fall.

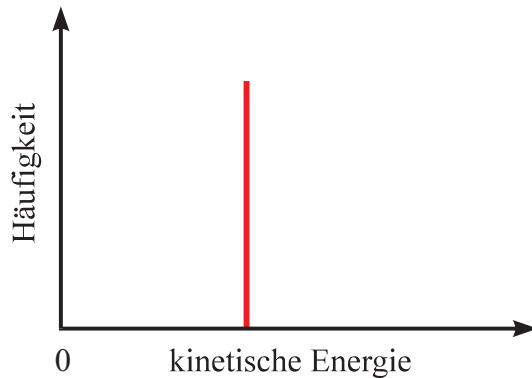
Da die Energie erhalten bleiben muss, verteilt sich Q als kinetische Energie auf die Zerfallsprodukte

$$E_{kin}(\alpha) + E_{kin}(Y) = Q \quad (6)$$

Mit dem Impulssatz ergibt sich dann

$$E_{kin}(\alpha) = Q \frac{m_Y}{m_Y + m_\alpha} \quad (7)$$

Das α -Teilchen erhält also beim Zerfall eine diskrete kinetische Energie, die durch den Q -Wert und die Masse des Mutterkerns bestimmt ist. Die α -Strahlung ist deshalb monochromatisch. Die minimale Breite der Energieverteilung wird durch die Heisenbergsche Unschärferelation bestimmt.



Das Energiespektrum von α -Teilchen ist monochromatisch.

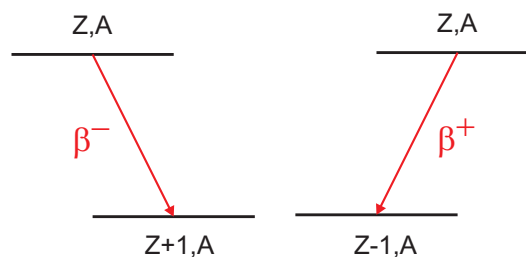
Wegen ihrer relativ großen Masse und Geschwindigkeit werden α -Teilchen bei der Wechselwirkung mit Materie nur selten wesentlich aus ihrer Bewegungsrichtung abgelenkt (Rutherford-Streuung). Entlang ihres Weges erfolgen so lange Energieübertragungsprozesse (Stöße, Ionisation) mit Atomen oder Molekülen, bis die Bewegungsenergie aufgebraucht ist. Die Länge dieses Weges nennt man die Reichweite R . Je höher die Anfangsgeschwindigkeit v_0 der Teilchen, desto größer ist R :

$$R = Av_0^3 \quad (\text{Geigersches Reichweitengesetz}) \quad (8)$$

Gleichung 8 ist eine empirische Formel mit A als einer materialabhängigen Konstanten. In Luft gilt $A \approx 10^{-27} \text{cm}^{-2} \text{s}^3$, in Blei ist A um den Faktor 1000 kleiner.

5.3 Absorption von β -Strahlung in Aluminium

Unter dem β -Zerfall versteht man die Zerfälle eines Kerns, bei denen die Anzahl der Nukleonen, d.h. die Massenzahl A , konstant bleibt, und die Kernladungszahl Z sich um eine Einheit ändert. Es gibt drei verschiedene Arten von β -Zerfällen.



Beim β^- -Zerfall emittiert der Kern bei der Umwandlung eines Neutrons in ein Proton ein Elektron und erhöht seine Kernladungszahl von Z auf $Z + 1$. Energetisch möglich ist dieser Prozess, wenn die Masse des Mutterkerns größer ist als die des Tochterkerns plus eine Elektronenmasse m_0 . Die Übergangsenergie Q ist die Differenz dieser Massen. Sie kann in Kernmassen m oder in Atommassen M ausgedrückt werden:

$$Q = [m(Z, A) - m(z + 1, A) - m_0]c^2 = [M(Z, A) - M(z + 1, A)]c^2 \quad (9)$$

Beim β^+ -Zerfall emittiert der Kern bei der Umwandlung eines Protons in ein Neutron ein Positron und erniedrigt seine Kernladungszahl von Z auf $Z - 1$. Das Positron ist ein „Antielektron“ mit allen Eigenschaften des Elektrons bis auf die positive Ladung. Für diesen Zerfall muss die Übergangsenergie

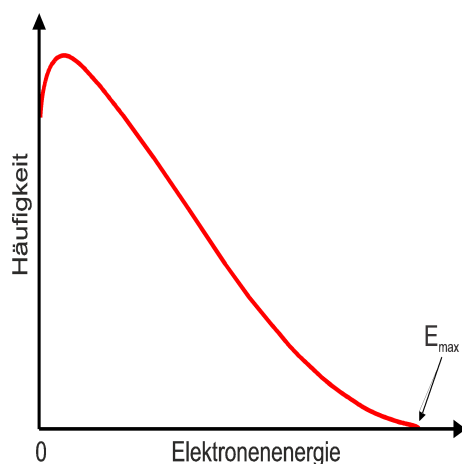
$$Q = [m(Z, A) - m(Z - 1, A) - m_0]c^2 = [M(Z, A) - M(Z - 1, A) - 2m_0]c^2 \quad (10)$$

positiv sein.

Beim Elektroneneinfang (EC, von „electron capture“) fängt sich der Kern ein Elektron aus der Atomhülle ein und erniedrigt dabei die Kernladungszahl um eine Einheit. Die Übergangsenergie ist durch den Überschuss der Masse des Mutterkerns zuzüglich einer Elektronenmasse über die Masse des Tochterkerns gegeben.

$$Q = [m(Z, A) - m(Z - 1, A) + m_0]c^2 = [m(Z, A) - M(Z - 1, A)]c^2 \quad (11)$$

Vergleicht man Gl. 11 und Gl. 10 ergibt sich, dass β^+ -Zerfall und EC gleichzeitig eintreten können, wenn das Mutteratom mindestens zwei Elektronenmassen schwerer ist als das Tochteratom.



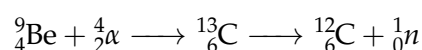
Das Energiespektrum von β -Teilchen ist kontinuierlich bis zu einem Maximalwert.

Misst man die Energie der beim β^- oder β^+ emittierten Teilchen, stellt man im Unterschied zum α -Zerfall fest, dass ihre Energien über einen weiten Bereich kontinuierlich verteilt sind, obwohl Mutter- und Tochteratom einen energetisch wohldefinierten Zustand darstellen. Nur wenige Teilchen besitzen eine kinetische Energie, die der Übergangsenergie Q entspricht. Die weit überwiegende Anzahl der Teilchen hat niedrigere Energien. Diese Beobachtung schien die Energieerhaltung zu verletzen. Deshalb hat Pauli in den 30er Jahren postuliert, dass bei den β -Zerfällen noch ein weiteres Teilchen emittiert wird, das ungeladen ist und entweder keine oder eine sehr kleine Masse besitzt. Er nannte dieses Teilchen Neutrino. Erst viele Jahre später ist es gelungen, die Existenz des Neutrinos nachzuweisen. Mit dem Neutrino besteht der Endzustand nach dem β -Zerfall aus drei Teilchen, auf die die Übergangsenergie beliebig verteilt werden kann. Damit können Elektronen oder Positronen mit Energien zwischen null bis zur Übergangsenergie emittiert werden. Die jeweils zur Übergangsenergie fehlende Energie wird vom Neutrino aufgenommen.

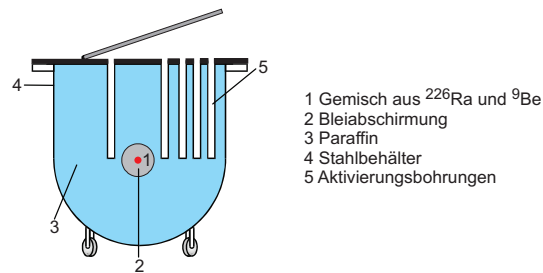
5.4 Neutronenaktivierung

Neben den spontanen Kernzerfällen durch α - oder β -Zerfall, gibt es auch Nuklide die sich durch spontane Neutronenemission umwandeln.

In unserem Versuchsaufbau verwenden wir einen Radium-Beryllium-Generator: ^{226}Ra zerfällt zu ^{222}Rn unter Emission hochenergetischer α -Teilchen. Ein kleiner Teil der emittierten α -Teilchen wird von den Beryllium Kernen eingefangen, wobei ein instabiles ^{13}C Isotop entsteht. Dieses wandelt sich unter Emission eines Neutrons in das stabile ^{12}C Isotop um:



Dabei entstehen schnelle Neutronen mit einer kinetischen Energie im Bereich von 5 MeV bis 13 MeV. Diese kinetische Energie ist allerdings viel zu hoch für den effektiven Einfang der Neutronen durch andere Kerne, so dass die Neutronen für die Erzeugung instabiler Nuklide abgebremst werden müssen, man spricht von Moderation. Dies geschieht durch Paraffin, das zum größten Teil aus Wasserstoff besteht. Da der Wasserstoffkern eine ähnliche Masse hat wie ein Neutron und der größte Energieübertrag und damit die größte Verlangsamung bei Stößen von Teilchen gleicher Masse erfolgt, ist Wasserstoff ein sehr guter Moderator für Neutronen. Die Neutronen erreichen schließlich thermische Energien von etwa 0,025 eV, dies entspricht einer Geschwindigkeit von etwa 2200 m/s



Die Abbildung zeigt den Aufbau einer Neutronenquelle. Ein Gemisch von ^{226}Ra und ^9Be befindet sich im Zentrum des Stahlbehälters innerhalb einer Bleiabschirmung. Das Blei dient zur Abschirmung der bei den Prozessen entstehenden α - und γ -Strahlung, so dass die γ -Dosisleistung außerhalb des Behälters unter die gesetzlich zulässige Grenze reduziert wird.

Der Rest des Stahlbehälters ist zur Moderation der Neutronen mit Paraffin gefüllt, in dem sich Bohrungen zur Aufnahme der zu aktivierenden Materialien befinden. Die Quelle liefert rund 100 000 langsame Neutronen pro s.

- Wenn Sie mehr über die Statistik des Zerfallsprozesses wissen wollen, schauen Sie in der Anleitung Poisson-Verteilung der TU Dresden.
- Eine kurze Anleitung zur nichtlinearen Anpassung von Messdaten in Origin bzw. SciDAVis finden Sie in den Praktikumsräumlichkeiten.