

Versuch 25: Messung ionisierender Strahlung

Die Abstandsabhängigkeit und der Wirkungsquerschnitt von α - und γ -Strahlung aus einem Americium-241-Präparat sollen untersucht werden. In einem zweiten Teil sollen sowohl der Wirkungsquerschnitt als auch die Winkelabhängigkeit von dem β -Strahler Sr-90 ermittelt werden.

Vorkenntnisse

Radioaktivität - α - β - γ - Strahlung - Kernzerfall, Teilchen und Antiteilchen - Neutrino - Nuklidkarte - Isotope - Kernaufbau - Kernmodelle (Tröpfchenmodell, Schalenmodell) - Zerfallsgesetz - Poisson-Verteilung - Halbwertszeit - Aktivität und Zerfallswahrscheinlichkeit - $\frac{1}{r^2}$ -Abstandsgesetz - Coulombwall - Tunneleffekt - Nachweisgeräte (Zählrohr, Ionisationskammer, Nebelkammer, Halbleiterdetektor, Elektroskop usw.)

Physikalische Grundlagen

Radioaktives Zerfallsgesetz

Radioaktive Substanzen zerfallen entweder unter der Aussendung von Heliumkernen mit zwei positiven Elementarladungen, den sogenannten α -Teilchen oder unter Emission von als β -Strahlung bezeichneten Elektronen. Bei der künstlichen Radioaktivität tritt im Gegensatz zur natürlichen zusätzlich die aus Positronen (Antiteilchen zum Elektron mit positiver Elementarladung e) bestehende β^+ -Strahlung auf. Ferner ist die Aussendung radioaktiver Stoffe im allgemeinen mit einer Emission von γ -Strahlung verbunden. Beim β -Zerfall erhöht sich die Kernladungszahl des Ausgangsisotops um eine Elementarladung bei gleich bleibender Nukleonenzahl, während sich bei der Emission von α -Teilchen die Kernladungszahl um zwei und die Nukleonenzahl um vier Einheiten gegenüber denen des Mutterelements verringert. Daraus folgt, dass es nur vier unterschiedliche Zerfallsreihen geben kann. Der radioaktive Zerfall von natürlichen Nukliden wurde zuerst im Jahre 1896 von Antoine-Henri Becquerel bei den drei Zerfallsreihen von ${}_{92}^{238}\text{U}$, ${}_{92}^{235}\text{U}$ und ${}_{90}^{232}\text{Th}$ festgestellt. Nur weil die Ausgangsnuklide sehr langlebig sind, kommen die kürzer lebenden Folgenuklide in der Natur vor, sie werden durch den Zerfall der Urnuklide laufend nachgeliefert. Die drei natürlichen Zerfallsreihen (auch Zerfallsfamilien genannt) enden allesamt bei stabilen Blei-Isotopen. Zusätzlich existiert die Neptunium-Zerfallsreihe von ${}_{93}^{237}\text{Np}$, die nicht natürlich vorkommt da die Ausgangsisotope in der Natur nicht existieren. Diese Reihe endet beim stabilen Thallium-Isotop ${}_{81}^{205}\text{Tl}$.

Als Beispiel sei in Abbildung 1 die auch für den Versuch interessierende Zerfallsreihe des ${}_{92}^{238}\text{U}$ mit den zugehörigen Halbwertszeiten angegeben.

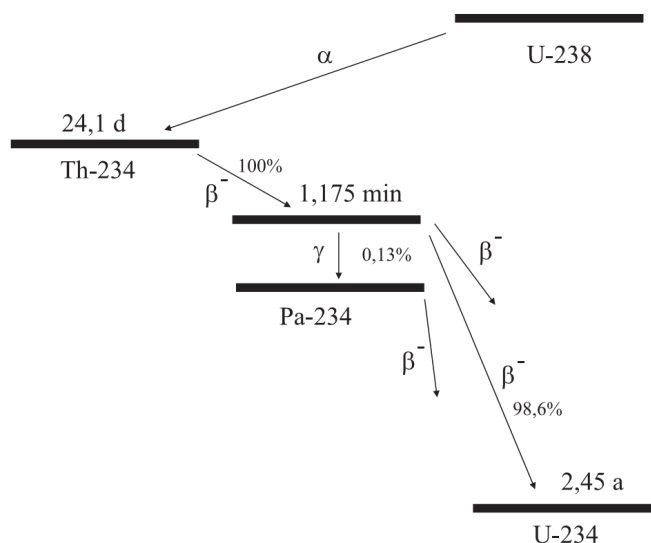


Abb. 1: Zerfallsreihe des $^{238}_{92}\text{U}$ mit zugehörigen Halbwertszeiten. (Die Abkürzungen bedeuten: a=Jahr, d=Tag, min=Minute.)

Die den Zerfällen zugrundeliegenden Kernumwandlungen sind als statistische Prozesse aufzufassen. Wenn N Atome einer einheitlichen radioaktiven Substanz zur Zeit t vorliegen, gilt für die im Zeitintervall dt zerfallenden Atome dN :

$$-dN = \lambda N dt \tag{1}$$

Die Zerfallskonstante λ gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass sich in der nächsten Sekunde ein Atomkern umwandelt. Integration dieser Gleichung liefert:

$$-\int_{N(0)}^{N(t)} \frac{dN'}{N'} = \lambda \int_0^t dt' \Rightarrow -\ln N = \lambda t \tag{2}$$

und damit das Zerfallsgesetz als folgenden Ausdruck:

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \tag{3}$$

Hierbei gibt $N(t)$ die Anzahl der nach der Zeit t noch nicht zerfallenen Atome an. Die Zeit, nach der die Zahl der anfangs vorhandenen Atome durch Zerfall auf die Hälfte abgenommen hat, wird Halbwertszeit $T^{1/2}$ genannt. Sie ist gemäß der Gleichung (3) gegeben durch:

$$\frac{1}{2}N(0) = N(0)e^{-\lambda T^{1/2}} \Rightarrow T^{1/2} = \frac{1}{\lambda} \ln 2 \tag{4}$$

In der Zeit $\tau = \frac{1}{\lambda}$ (mittlere Lebensdauer) nimmt die Zahl der Atome auf $e^{-1} \approx 0.37$ ab. Die Größe t wird auch als Zeitkonstante bezeichnet. Gleichung (3) beschreibt den Zerfall nur einer radioaktiven Substanz. Im Gebiet der natürlichen Radioaktivität ist die Substanz aber oft Glied einer Zerfallsreihe, bei der eine Anzahl von Substanzen durch α - und β -Zerfall aufeinanderfolgen. Wir betrachten als Beispiel eine Ausgangssubstanz mit der Zerfallskonstante λ_1 bzw. der Halbwertszeit $T_1^{1/2}$, von der N_1 Atome zur Zeit $t = 0$ vorhanden seien. Die Bildung der Tochtersubstanz erfolgt dann zunächst entsprechend Gleichung, jedoch zerfällt die Tochtersubstanz gemäß ihrer Zerfallskonstanten weiter. Die zeitliche Änderung der Tochtersubstanzmenge wird durch die folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$dN_2 = \lambda_1 N_1 dt - \lambda_2 N_2 dt \tag{5}$$

Die Lösung dieser Gleichung lautet:

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_1(0)}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right) \quad (6)$$

Ist das Ausgangselement sehr viel langlebiger als das Tochterelement, gilt also $T_1^{1/2} \gg T_2^{1/2}$ bzw. $\lambda_1 \ll \lambda_2$, so geht Gleichung 6 über in:

$$N_2(t) = \frac{\lambda_1 N_1(0)}{\lambda_2} \left(1 - e^{-\lambda_2 t} \right) \quad (7)$$

Für $t \Rightarrow \infty$ ergibt sich daraus dann das Verhältnis von N_1 zu N_2 :

$$\frac{N_2(t \Rightarrow \infty)}{N_1(0)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{T_2^{1/2}}{T_1^{1/2}} \quad (8)$$

Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit Materie

In vielen wissenschaftlichen und technischen Bereichen wird mit Substanzen oder Apparaturen gearbeitet, die ionisierende Strahlung emittieren. Die Grundlage des Strahlenschutzes ist die Wechselwirkung der verschiedenen Strahlenarten unterschiedlichster Energie und Flußdichte mit der Materie. Man unterscheidet direkt- und indirekt ionisierende Strahlen. Zur letzteren Gruppe gehören γ - und Röntgenstrahlung. Die Schwächung dieser Strahlung (Strahlungsfluß Φ) wird durch ein exponentielles Gesetz beschrieben:

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\mu x} \quad (9)$$

mit dem linearen Schwächungskoeffizient μ und der Schichtdicke des Absorbers x . Die Wechselwirkungsprozesse der γ -Strahlung sind der Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildungseffekt. Im Gegensatz zu den γ -Quanten können Neutronen nur mit dem Atomkern wechselwirken.

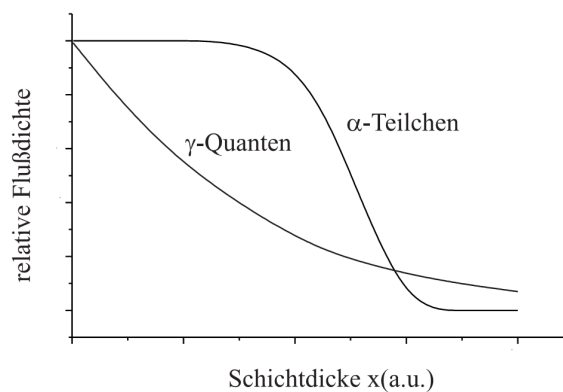


Abb. 2: Reichweite von Strahlung in Materie

Schnelle Neutronen verlieren durch Streuprozesse ihre Energie (Bei welcher Masse der Atomkerne ist der Energieverlust maximal?). Bereits während des Bremsvorganges können die Neutronen von Kernen eingefangen werden. Mit kleiner werdender Neutronenenergie nimmt die Wahrscheinlichkeit des Neutroneneinfangs zu. Beim Neutroneneinfang werden ein oder mehrere γ -Quanten frei, außerdem ist das durch das zusätzliche Nukleon entstandene Nuklid häufig radioaktiv. Zur Gruppe der direkt ionisierenden Strahlen gehören alle geladenen Teilchen (α , β^+

bzw. β^- -Strahlung, Protonen, Deuteronen etc.) Der Hauptabsorptionsprozeß ist die Anregung und Ionisation der Absorberatome bzw. Moleküle. Der Wirkungsquerschnitt nimmt - im Gegensatz zu γ -Quanten - mit abnehmender Energie zu, so dass die relative Flußdichte durch Materie innerhalb eines bestimmten Bereiches abrupt abnimmt (Anwendung z.B. in der medizinischen Strahlentherapie, siehe Abb. 2).

Versuchsaufgaben

Alle Versuchsteile werden mit dem in Abb. 3 gezeigten Versuchsaufbau durchgeführt. Radioaktiver Zerfall ist ein statistischer Prozess. Achten Sie deshalb auf geeignete (hinreichend große) Messzeiten sowie gegebenenfalls auf mehrfache Messungen. Wenn, wie in diesem Versuch, statistische Ereignisse gezählt werden, die zufällig aber mit einer mittleren Rate auftreten, so können die Ergebnisse durch die Poisson-Verteilung beschrieben werden. Eine Besonderheit dieser Verteilung ist, dass bei einer Zählrate von N die Standardabweichung durch $\Delta N = \sqrt{N}$ gegeben ist. Der relative Fehler $\Delta N/N = 1/\sqrt{N}$ wird also bei großen Zählraten kleiner, das Ergebnis damit genauer.

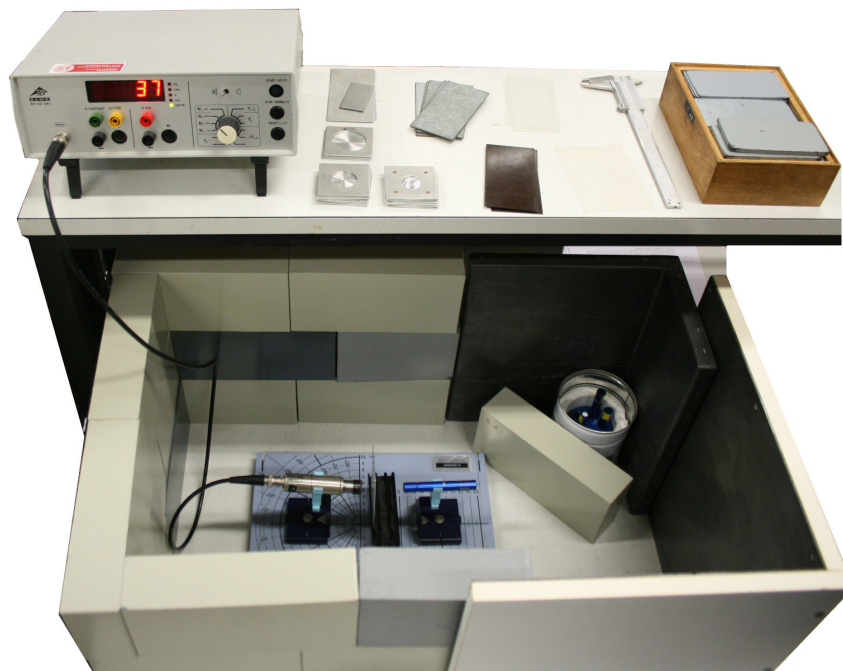


Abb. 3: Versuchsaufbau zur Messung ionisierender Strahlung. Die wesentlichen Teile sind (i) elektronischer Zähler (oben links), (ii) Zählrohr, Halterung für Abschirmmaterialien und radioaktives Präparat auf der Messplatte innerhalb einer Bleiabschirmung (unten Mitte) und (iii) verschiedene Materialien zur Abschirmung und Messschieber zur Dickenbestimmung.

1. Ionisationskammer, Geiger-Müller-Zählrohr und Halbleiterdetektor

Erklären Sie den Aufbau und die Arbeitsweise einer Ionisationskammer, eines Geiger-Müller-Zählrohres (Wirkungsweise innerhalb und außerhalb des Proportionalbereichs) und eines Halbleiterdetektors.

2. Abstandsabhängigkeit und Abschwächung von α - und γ - Strahlung in Materie

Für die Untersuchungen zur Reichweite von radioaktiver Strahlung steht ein Am-241-Präparat zur Verfügung. Dieses eignet sich als nahezu punktförmige Quelle von α - und γ -Strahlung mit Energien von $E_\alpha \leq 4,8 \text{ MeV}$ und $E_\gamma = 59,5 \text{ keV}$. Die Halbwertszeit von Am-241 beträgt 458 a. Gemessen wird die Strahlung mit Hilfe eines Ionisationszählrohrs mit angeschlossenem Zähler. Außerdem steht ein Sr-90 Präparat zur Verfügung, womit nur der erste der beiden Teilversuche durchgeführt werden soll.

- 2.1.** Das Zählrohr wird direkt vor das Präparat gestellt. Zwischen Präparat und Zählrohr werden verschiedene Materialien, die am Versuchsplatz ausliegen (z.B. Aluminium, Kunststoff, Blei, Papier) geschoben. Beschreiben Sie die Ergebnisse qualitativ.
- 2.2.** Die Abstandsabhängigkeit (Punktquelle!) und Reichweite von α - bzw. γ -Strahlung in Luft wird ermittelt, indem Sie die Entfernung zwischen Quelle und Zählrohr in 1 cm Abständen verändern. Führen Sie die Messung sowohl mit als auch ohne eine Kunststoffolie im Strahlungsweg (Abschirmung der α -Strahlung) durch. Diskutieren Sie das Ergebnis quantitativ, indem Sie vereinfachend annehmen, das
- (a) die Absorption von γ -Strahlung in Luft vernachlässigbar ist ($\rightarrow r^{-2}$ - Gesetz) und
 - (b) die Zählraten von α - bzw. γ - Strahlung additiv sind.
- Tragen Sie hierfür die Zählraten der Messung mit Folie und der Differenz der Messungen mit und ohne Folie über dem Abstand auf doppelt logarithmisches Papier auf und diskutieren Sie das r^{-2} -Abstandsgesetz.

3. Winkelabhängigkeit von β -Strahlung

In diesem Versuchsteil soll überprüft werden, in wie weit das Sr-90 Präparat als Punktquelle betrachtet werden kann. Stellen Sie das Sr-90 Präparat an die 0 cm Markierung und setzen Sie das Zählrohr auf eine geeignete Äquipotential-Linie. Scannen Sie, indem Sie das Zählrohr verschieben, einen Bereich von $\pm 60^\circ$ in 5° -Schritten ab. Die Ergebnisse sollen auf Polarkoordinaten-Papier dargestellt werden. Diskutieren Sie Ihr Ergebnis!