

Ausarbeitung Versuch 252 Thermische Neutronen

Lucas Eekhof

Einleitung

Motivation

Eine wesentliche Methode kurzlebige Isotope zu synthetisieren ist der Beschuss von weniger oder nicht radioaktiven Proben mit gebremsten Neutronen auf thermischen Geschwindigkeiten. Dabei werden die Proben „aktiviert“, es entstehen in ihnen also kleine Mengen an aktiveren Elementen und Isotopen. Unter Beobachtung des Verlaufes der Aktivität der Probe vor, während, und nach der Aktivierung lassen sich die Halbwertszeiten der so entstandenen Reaktionsprodukte feststellen.

Physikalischer Hintergrund

Werden Neutronen zu stabilen Atomkernen hinzugefügt, so können die Reaktionsprodukte radioaktiv sein. Am besten gelingt diese Neutronenzuführung bei niedrigen Neutronengeschwindigkeiten im thermischen Bereich, da so die effektiven Wirkungsquerschnitte der Targets gegenüber den Neutronen sehr groß werden.

Die Neutronenquelle in diesem Versuch ist ein Präparat aus Berylliumspänen und Americium-241. Die Alphastrahlung des Americiums reagiert mit dem Beryllium zu Kohlenstoff-12 und einem freien Neutron, üblicherweise mit einer kinetischen Energie von 1 MeV bis 10 MeV.

Als Moderator zur Verlangsamung der Neutronen dient in unserem Falle Paraffin: Die vielen Wasserstoffkerne der Kohlenstoffketten führen aufgrund ihrer fast gleichen Masse elastische Stöße gegen die Neutronen aus, wobei die Neutronen durchschnittlich die Hälfte ihrer Energie abgeben. Dadurch werden die Neutronen recht effizient gebremst.

Es wird im Versuch Indium-115 zu ^{116}In und einem seiner Isomere, dem angeregten ^{116m}In umgesetzt. Dabei gehen beide durch β^- -Zerfall in Zinn-116 über, ^{116}In allerdings mit einer Halbwertszeit von 14 s, und ^{116m}In mit einer Halbwertszeit von 54 min.

Die Aktivierungsrate der Probe ist konstant, jedoch gehorcht die Zerfallsrate der aktivierten Anteile dem üblichen exponentiellen Zerfallsgesetz. Damit erhält man für die Aktivität $A(t)$ der Probe in Abhängigkeit der Aktivierungsdauer t mit der Zerfallskonstanten λ die Gleichung

$$A(t) = A_\infty(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

Welche gilt bis das Fließgleichgewicht von Aktivierungen zu Zerfällen erreicht ist. Wird nun die Bestrahlung der Probe abgebrochen, gilt wieder das einfache Zerfallsgesetz:

$$A(t) = A_\infty(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

Wobei für die Halbwertszeit $T_{\frac{1}{2}}$ gilt:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (3)$$

Es wird außerdem noch die Aktivierung von Silber betrachtet. Natürliches Silber ist ein Isotopengemisch aus 51 % ^{107}Ag und 49 % ^{109}Ag . Bei der Aktivierung werden daher die beiden Radioaktiven Isotope ^{108}Ag und ^{110}Ag erzeugt. Durch β^- -Zerfall gehen sie in ^{108}Cd und ^{110}Cd über. Die Halbwertszeiten dieser Strahler sind um den Faktor sechs verschieden, daher erlauben unterschiedliche Aktivierungsdauern nach (1) eine Variation des Isotopenverhältnisses in der Probe: Bei kürzerer Aktivierung im Bereich von 20 s dominiert ^{110}Ag , welches bei längerer Aktivierung das Zerfallsgleichgewicht erreicht, wodurch dann der Anteil an ^{108}Ag weiter steigt:

¹Wagner, Jens: „Physikalisches Praktikum PAP 2.2 für Studierende der Physik“, 2019

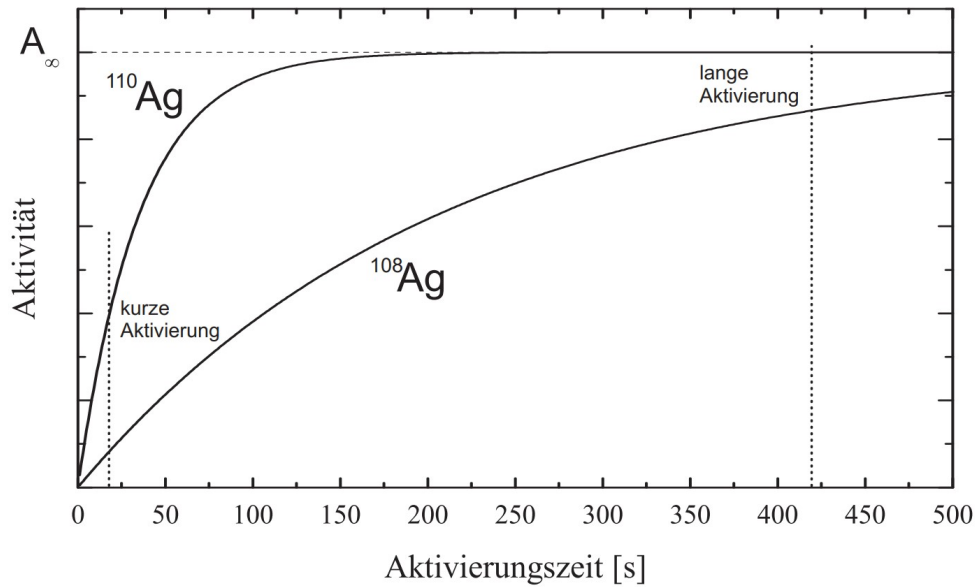


Abbildung 1: Aktivitätsverläufe durch die Silberisotope über Dauer der Aktivierung aufgetragen¹

Anordnung und Durchführung

Material

- Geiger-Müller-Zählrohr mit Betriebsgerät
- Externer Impulszähler
- Computer
- Neutronenquelle (^{241}Am in Paraffinmoderator)
- Präparatehalterung
- Indiumblech (^{115}In)
- Silberblech (Natürliches Isotopenverhältnis)

Durchführung

Alle Messungen erfolgen bei einer Zählrohrspannung von circa 500 V.

Zunächst werden alle Strahlungsquellen aus dem Raum entfernt, um eine Hintergrundmessung bei 10 s Torzeit durchzuführen. Die Messung erfolgt 8 min lang und wird auf dem Rechner gesichert.

Nun sollen die Messungen am Silberblech vorgenommen werden. Dieses wird mindestens sieben Minuten lang in die Neutronenquelle eingelegt, und dann rasch mit der Silberseite vor dem Zählrohr platziert. Die Zählung wird wieder bei einer Torzeit von 10 s durchgeführt, es wird über 400 s gemessen und mit dem Computer aufgezeichnet. Die Messung wird insgesamt viermal durchgeführt.

Für die Zählung am Indiumpräparat wird die Messzeit auf 120 s eingestellt und 50 min lang analog wie zuvor präpariert und gemessen.

Messprotokoll

Das genaue Messprotokoll und die verwendeten Messdaten für diesen Versuch wurden der Seite unter https://www.physi.uni-heidelberg.de/Einrichtungen/AP/info/PAP2_2020/252_Aktivierung.zip am 19.03.2021 entnommen.

Auswertung

Alle für die Auswertung der Ergebnisse genutzten Skripte sind der Ausarbeitung beigelegt. Es wurde sich bei den Skripten zur Auswertung stark am Praktikumsript² orientiert.

Zerfallsverlauf Silber

Zunächst werden die Silberdatensätze ausgewertet. Dazu wird die Untergrundmessung vervierfacht und zur Korrektur von der Summe aller Teilmessungen der Messreihe abgezogen. Es wird nun die Zerfallsfunktion (2) auf die Daten gefittet:

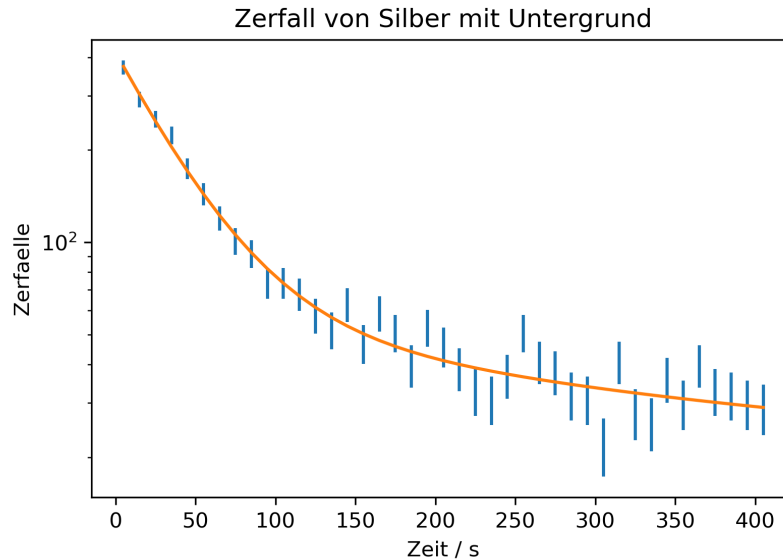


Abbildung 2: Die addierten und untergrundkorrigierten Messwerte für Silber mit Zerfallsfitkurve

Hierbei müssen aufgrund der zwei entstandenen Isotope zwei Zerfallsfunktionen überlagert werden, jeweils mit eigener Amplitude. Die Fitfunktion ergibt sich so zu:

$$k_{(t)} = A_1 e^{-t\lambda_1} + A_2 e^{-t\lambda_2} + k_0 \quad (4)$$

Man erhält nach dem Fit die folgenden Parameter mit Standardfehler: $A_1 = 356,275 \pm 17,031$, $A_2 = 40,686 \pm 13,686$, $\lambda_1 = (0,0248 \pm 0,0023) \frac{1}{s}$, $\lambda_2 = (0,00337 \pm 0,00117) \frac{1}{s}$. Um die Güte des Fits zu beurteilen betrachten wir den Wert von $\chi^2 = 32,243$, insbesondere $\chi_{red}^2 = 0,871$, sowie eine Fitwahrscheinlichkeit von 69%.

Nun wird das Prozedere analog wiederholt, dabei wird jedoch nun zunächst jeweils der Fehler der Untergrundmesswerte, also ihre Wurzel, von den Untergrundmesswerten abgezogen, um die so neu gefitteten Werte für die Zerfallskonstantenparameter zu erhalten. Es ergibt sich: $\lambda_1 = (0,0244 \pm 0,0020) \frac{1}{s}$, $\lambda_2 = (0,00214 \pm 0,00076) \frac{1}{s}$.

Abschließend wird noch der Untergrundmesswertfehler den Messwerten addiert, um die so neuen Zerfallskonstantenparameter aus dem Fit zu erhalten. Es ergibt sich: $\lambda_1 = (0,0263 \pm 0,0038) \frac{1}{s}$, $\lambda_2 = (0,00720 \pm 0,00256) \frac{1}{s}$.

Aus den so erhaltenen Werten werden nun die Beträge Differenzen zum Wert ohne Untergrundfehlersubtraktion, beziehungsweise -addition errechnet, so erhält man für die Werte der Subtraktion $0,0004 \frac{1}{s}$ bei λ_1 und $0,00123 \frac{1}{s}$ bei λ_2 , sowie $0,0015 \frac{1}{s}$ bei λ_1 und $0,00383 \frac{1}{s}$ bei λ_2 für die Addition.

Es werden nun die Mittelwerte dieser Abweichungen für die beiden Zerfallskonstanten berechnet. Man erhält $0,00095 \frac{1}{s}$ für λ_1 und $0,00253 \frac{1}{s}$ für λ_2 . Es lassen sich damit durch quadratische Addition mit den im ersten Fit erhaltenen Standardfehlern der Zerfallskonstanten die tatsächlichen Werte der Zerfallskonstantenfehler errechnen. Nach

dieser Methode ergibt sich als endgültiger Wert mit Fehler für die Zerfallskonstanten: $\lambda_1 = (0,0248 \pm 0,0025) \frac{1}{s}$

für das ^{110}Ag und $\lambda_2 = (0,00337 \pm 0,00279) \frac{1}{s}$ für das ^{108}Ag . Damit ergeben sich nach (3) und Fehler nach Gauß

²Wagner, Jens: „Physikalisches Praktikum PAP 2.2 für Studierende der Physik“, 2019

Halbwertszeiten von $T_1 = (27,9494 \pm 2,8175) \text{ s}$ für ^{110}Ag und $T_2 = (205,6817 \pm 170,2825) \text{ s}$ für ^{108}Ag , sowie Lebensdauern L nach $L = \frac{1}{\lambda}$ von $L_1 = (40,3226 \pm 4,0648) \text{ s}$ für ^{110}Ag und $L_2 = (296,7359 \pm 245,6657) \text{ s}$ für ^{108}Ag . Vergleicht man mit den Literaturwerten der Halbwertszeiten von 24,6 s für ^{110}Ag , und 144,6 s für ^{108}Ag , so stellt man fest, dass die Werte für ^{110}Ag sich im Fehlerbereich nicht schneiden, die relative Abweichung beträgt hier 13,62 %. Die Werte für ^{108}Ag sind hingegen kompatibel, die relative Abweichung beträgt hier 42,24 %. Die Fehlerbetrachtung für die Lebensdauern entfällt, da es sich hierbei nur um eine Umskalierung der Halbwertszeiten handelt, die die Qualitäten der Fehler unberührt lässt.

Zerfallsverlauf Indium

Die Auswertung des Indiumdatensatzes erfolgt fast vollständig analog. Um der größeren Torzeit von 2 min gerecht zu werden, wird aus der vorher bereits verwendeten Untergrundmessung ein Mittelwert von Untergrundcounts pro Sekunde gebildet, und anschließend mit der Torzeit von 120 s multipliziert. Hierbei wird der erste Messwert ausgelassen, der auffällig abweicht (Mit ist Fitwahrscheinlichkeit 36 %, ohne 64 %, weiteres siehe Diskussion). So erhält man:

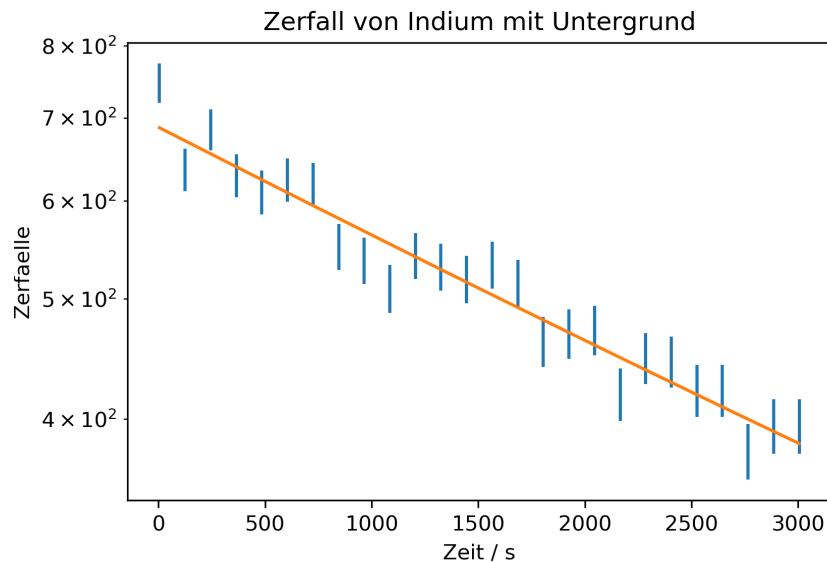


Abbildung 3: Die untergrundkorrigierten Messwerte für Indium mit Zerfallsfitkurve, der erste Messwert wurde ausgelassen, Linearität in logarithmischer Auftragung ist gut erkennbar

Die Werte werden nach dem exakt gleichen Schema verrechnet, zunächst erhält man als Fitparameter mit Standardfehlern: $A = 620,871 \pm 1,068$ und $\lambda = (0,000\,211 \pm 0,000\,011) \frac{1}{\text{s}}$. Bezüglich der Fitgüte den Wert von $\chi^2 = 20,114$ mit $\chi_{red}^2 = 0,875$, sowie eine Fitwahrscheinlichkeit von 64 %.

Wendet man nun das gleiche Verfahren zur Bestimmung der genauen Fehler der Zerfallskonstante an, erhält man den Wert $\lambda = (0,000\,211 \pm 0,000\,012) \frac{1}{\text{s}}$ für das ^{116m}In . Dies führt nach gleichen Rechnungen wie oben zu einer Halbwertszeit von $T = (3285,0577 \pm 186,8280) \text{ s}$, sowie einer Lebensdauer von $L = (4739,3365 \pm 269,5358) \text{ s}$. Die Halbwertszeit weicht um etwa 1,39 % von der Literaturerwartung von 3240 s ab, und ist in ihrem Fehlerbereich mit dieser kompatibel.

Diskussion

Zerfallsverlauf Silber

Der Zerfallverlauf der Silberisotope entspricht voll den Erwartungen. Im Plot ist gut erkennbar, dass nicht etwa ein Zerfallprozess eine Gerade zieht, sondern zwei Zerfallsprozesse eine Überlagerung schaffen. Die Ergebnisse für die Halbwertszeiten und Lebensdauern von Silber-110 jedoch decken sich nicht ganz mit den Erwartungen, allerdings

sind die Abweichungen nicht unplausibel groß. Hier könnten noch weitere Messungen angestellt werden, um eventuell ein besseres Ergebnis zu erhalten. Die Ergebnisse für Silber-108 sind zwar kompatibel, die Abweichung ist jedoch hier wesentlich größer. Der große Fehlerbereich der Werte für Silber-108 war aufgrund der gleich langen Messdauer bei längerer Halbwertszeit zu erwarten, ließe sich aber durch längere Messreihen weiter verkleinern.

Zerfallsverlauf Indium

Bei der Auswertung der Zerfallskurve des Indiums wurde der erste Messwert ausgelassen. Dies geschah, da innerhalb der ersten Torzeit von 120s bereits ungefähr 9 Halbwertszeiten des neben dem, in der Auswertung bedachten, ^{116m}In , ^{116}In vergangen waren, da sich in der Probe während der Aktivierung ein nukleares Racemat bildete, im Vergleich zum Silberracemat mit wesentlich unterschiedlicheren Halbwertszeiten. Theoretisch wäre eine ähnliche Überlagerung von Zerfallsprozessen wie beim Silber zu beobachten gewesen, jedoch findet der Gesamte relevante Zerfallsprozess des kurzlebigeren Isotops in der ersten Torzeit statt, wodurch er nicht mehr auflösbar ist. Die genutzte Fitkurve bedachte ohnehin nur einen einzelnen Zerfallsprozess. Durch das Auslassen des ersten Messpunktes wurde die Beobachtung also effektiv auf das ^{116m}In beschränkt.

Die Ergebnisse für die Halbwertszeit beim Indiumzerfall sind mit der Erwartung nach der Literatur kompatibel, die relative Abweichung ist vergleichsweise klein.

Zusammenfassung

Allgemein entsprechen fast alle Beobachtungen den Erwartungen, leichte Unstimmigkeiten sind eventuell noch auf statistische Fehler rückführbar. Durch längere Messreihen ließen sich die Ergebnisse noch etwas verbessern.