

V702 - Aktivierung mit Neutronen

David Gutnikov
david.gutnikov@udo.edu

Lasse Sternemann
lasse.sternemann@udo.edu

Bearbeitet am 29.05.2020

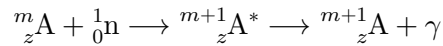
Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	3
1.1	Erzeugung instabiler Kerne mit Neutronen	3
1.2	Aufnahme von Neutronen	3
1.3	Erzeugung niederenergetischer Neutronen	4
1.4	Zerfallsgesetz	5
1.5	Besonderheiten des Experiments	5
2	Durchführung	7
2.1	Versuchsaufbau	7
2.2	Untergrundbestimmung	7
2.3	Halbwertszeitbestimmung von Vanadium	7
2.4	Halbwertszeitbestimmung von Rhodium	8

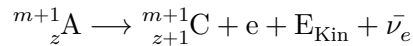
1 Theoretische Grundlagen

1.1 Erzeugung instabiler Kerne mit Neutronen

Um Zefallsprozesse hervorzurufen, werden Atome mit Neutronen beschossen. Dabei dringt das Neutron, ohne die Coulomb-Barriere überwinden zu müssen, in den Kern des beschossenen Atoms ein. Der um ein Neutron erweiterter Kern A^* heißt Zwischenkern und ist um die kinetische- sowie Ruheenergie des Neutrons energiereicher im Vergleich zu seinem Vorgänger. Der nun angeregte Kern gibt die übrige Energie über ein Photon ab und befindet sich nun wieder im Grundzustand A .



Der so neu entstandene Kern ist aufgrund der höheren Neutronenzahl häufig instabil und wird daher zerfallen. Dies geschieht durch den β^- -Zerfall, bei dem der instabile Kern in einen stabilen Kern übergeht und dabei ein Elektron e , ein Antielektronenneutrino $\bar{\nu}_e$ sowie deren kinetische Energie freigesetzt wird. Die kinetische Energie entspringt der Massendifferenz (Massendefekt) beim β^- -Zerfall mit $\Delta E = \Delta mc^2$.



1.2 Aufnahme von Neutronen

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutron in einen Kern eindringt wird durch den Wirkungsquerschnitt quantifiziert, dessen Einheit dem barn entspricht ($1\text{barn} \equiv 10^{-24}\text{cm}^2$) und der bei einer 1 cm^2 großen Folie über folgende Formel berechnet wird

$$\sigma = \frac{u}{nKd}$$

Dabei steht u für die Anzahl an Neutroneneinfängen, n für die Anzahl an einfallenden Neutronen, d für die Dicke des Schirmmaterials und K für die Anzahl der Atome pro Volumen in cm^{-3} . Da der Wirkungsquerschnitt für das Eindringen eines Neutrons geschwindigkeitsabhängig ist, wird bei der Berechnung zwischen schnellen und langsamen Neutronen unterschieden. Diese Unterscheidung erfolgt über die ebenfalls geschwindigkeitsabhängige De-Broglie-Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{h}{m_{\text{Neutron}} \cdot v_{\text{Neutron}}}$$

Schnelle Neutronen

Es handelt sich um schnelle Elektronen, wenn deren Geschwindigkeit so groß ist, dass deren De-Broglie-Wellenlänge gegenüber dem Kernradius ($\approx 10^{-12}\text{cm}$) klein wird. Dabei lässt sich das System analog zur Streuung von Licht an einem makroskopischen Objekt betrachten.

Langsame Neutronen

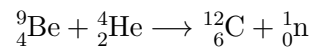
Interessanter ist der Fall langsamer Neutronen, bei denen die De-Broglie-Wellenlänge groß gegen den Kernradius ist. Hierbei kann der Wirkungsquerschnitt in Abhängigkeit von der Energie des Neutrons und den Energieniveaus des Zwischenkerns berechnen. \tilde{c} und σ_0 sind dabei Konstanten der zugehörigen Kernreaktion.

$$\sigma(E) = \sigma_0 \cdot \sqrt{\frac{E_{r_i}}{E}} \cdot \frac{\tilde{c}}{(E - E_{r_i})^2 + \tilde{c}}$$
$$E = \frac{1}{2} \cdot m_{\text{Neutron}} \cdot v_{\text{Neutron}}^2$$

Wenn nun die Energie des einfallenden Teilchens viel kleiner ist als die des jeweiligen Energieniveaus des Kerns ist der Wirkungsquerschnitt proportional zum Kehrwert der Wurzel der Neutronenenergie und somit zum Kehrwert der Geschwindigkeit des Neutrons. Da zur Aktivierung der Kerne ein möglichst hoher Wirkungsquerschnitt gewünscht ist, werden langsame und niederenergetische Neutronen bevorzugt.

1.3 Erzeugung niederenergetischer Neutronen

Neutronen sind ungebunden instabil und kommen daher nicht natürlich im freiem Zustand vor. Die für den Neutroneneinfang vorgesehenen Neutronen werden daher durch den Beschuss von Beryllium mit Alpha-Teilchen erzeugt.



Die dabei freigesetzten Neutronen haben jedoch eine kontinuierliche Energieverteilung mit bis zu 13,7 MeV und sind damit nicht niederenergetisch. Daher wird die Quelle von einer Materieschicht umhüllt. Wenn die Neutronen in diese eintreten kommt es solange zu elastischen Stößen bis die kinetische Energie der der umgebenden Moleküle entspricht. Dann beträgt die Neutronenenergie, der nun als thermische Neutronen bezeichneten Neutronen, etwa 0,025 eV, was einer Temperatur der Teilchenmenge von 290 Kelvin entspricht. Dieser Prozess läuft umso schneller ab, desto ähnlicher sich die Massen der Stoßpartner sind. Dies lässt sich aus Gleichung 1 lesen. Diese gibt die pro Stoß übergebende Energie in Abhängigkeit von der Anfangsenergie E_0 und den Massen der verschiedenen Stoßpartner M und m an. Die kleinste Masse wäre bei Wasserstoff gegeben, sodass als Stoßpartner die Neutronen von Paraffin, das hauptsächlich aus Wasserstoff besteht, genutzt werden.

$$E_{\ddot{u}} = E_0 \cdot \frac{4Mm}{(M + m)^2} \quad (1)$$

1.4 Zerfallsgesetz

Gemäß dem Zerfallsgesetz radioaktiver Isotope ist die Anzahl der nach einer gewissen Zeit t von der Ausgangszahl N_0 an vorhandenen Teilchen noch übrige Teilchenzahl N über folgende Formel berechenbar. Dabei steht λ für die Zerfallskonstante.

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Die Halbwertszeit beschreibt die Dauer in der von der anfänglichen Teilchenzahl nur noch die Hälfte übrig ist. Dies lässt sich wie folgt ausdrücken.

$$\frac{1}{2} \cdot N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}} \quad \longrightarrow \quad T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

So kann die spezifische Halbwertszeit für die Isotope bestimmt werden. Da die Anzahl der vorhandenen Kerne jedoch nur umständlich zu bestimmen ist, wird die Zerfallskonstante stattdessen über die Anzahl der zerfallenden Kerne pro Zeitintervall $N_{\Delta t}$ bestimmt, da diese Zerfälle einfacher detektiert werden können. Die Anzahl der zerfallenden Kerne ergibt sich durch Subtraktion der nach einem Intervall Δt vorhandenen Kernen von den vor diesem Intervall vorhandenen Kernen.

$$N_{\Delta t}(t) = N(t) - N(t + \Delta t)$$

Anwenden des Zerfallsgesetzes 2 und anschließendes anwenden des natürlichen Logarithmus liefert eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Halbwertszeit.

$$N_{\Delta t}(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} - N_0 \cdot e^{-\lambda(t+\Delta t)} = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t}) \cdot e^{-\lambda t}$$

$$\ln(N_{\Delta t}(t)) = \ln(N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda \Delta t})) - \lambda t \quad (3)$$

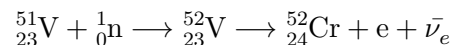
Auf der rechten Seite dieser Gleichung ist allein t variabel und auf der linken Seite $N_{\Delta t}$, sodass die Zerfallskonstante über eine lineare Regression bestimmbar ist und daraus wiederum die Halbwertszeit berechnet werden kann. Dabei muss Δt exakt gewählt sein, da zu kleine Werte zu große statistische Fehler mit sich bringen und zu große Zeiten, die gegen die Halbwertszeit laufen einen systematischen Fehler mit sich bringen.

1.5 Besonderheiten des Experiments

Die Bestimmung der Halbwertszeit soll für zwei Elemente durchgeführt werden.

Vanadium

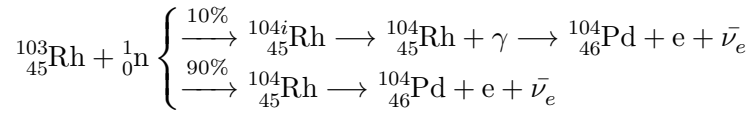
Das durch Neutroneneinfang aktivierte Vanadium zerfällt wie folgt:



Es entsteht nur ein instabiles Isotop und die Bestimmung über eine Ausgleichsgerade lässt sich problemlos durchführen.

Rhodium

Im Gegensatz zum Vanadium entstehen bei Rhodium durch Neutroneneinfang zwei instabile Isotope mit verschiedener Wahrscheinlichkeit.



Diese Isotope zerfallen auch beide in andere Elemente. Gemessen werden kann jedoch nur die Gesamtaktivität der beiden Zerfallsketten. Da die beiden Isotope unterschiedlich schnell zerfallen ist nach einer gewissen Zeit t^* nur noch das langlebige Isotop für die Aktivität verantwortlich. So kann für den Graphen der Messwerte eine lineare Regression für den Bereich $t > t^*$ angefertigt und damit die Zerfallskonstante des langlebigen Isotops bestimmt werden. Durch Abziehen diesen Untergrunds von dem Messwerten und anschließender linearen Regression über den Bereich $t < t^*$ kann dann die Zerfallskonstante des kurzlebigen Isotops bestimmt werden. Die beim Zerfall von ${}^{104i}_{45}\text{Rh}$ frei werdende Gamma-Strahlung muss nicht berücksichtigt werden, da sie nur geringfügig zur gesamten Zählung beiträgt.

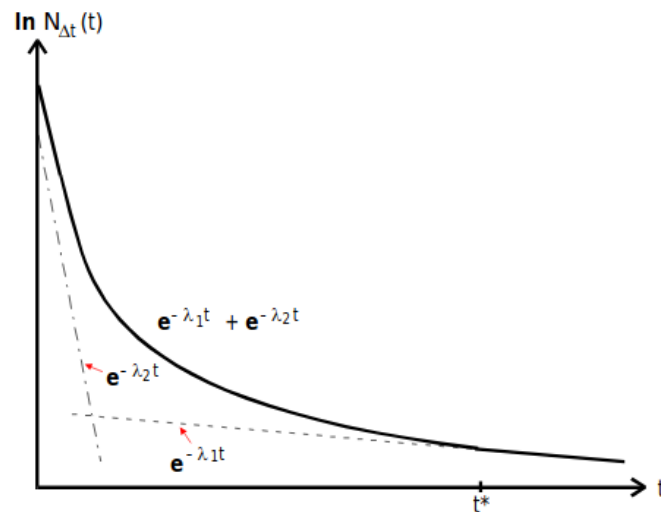


Abbildung 1: In der Abbildung ist eine schematische Darstellung der Zerfallskurve zweier Isotope, deren Halbwertszeiten stark verschieden sind. Die Anzahl der zerfallenden Kerne ist dabei logarithmisch gegen die Zeit aufgetragen. Die Zerfallskurve eines einzelnen Isotops würde linear verlaufen und das tun auch die linearen Regressionen der einzelnen Isotope (gestrichelt) [1]

2 Durchführung

2.1 Versuchsaufbau

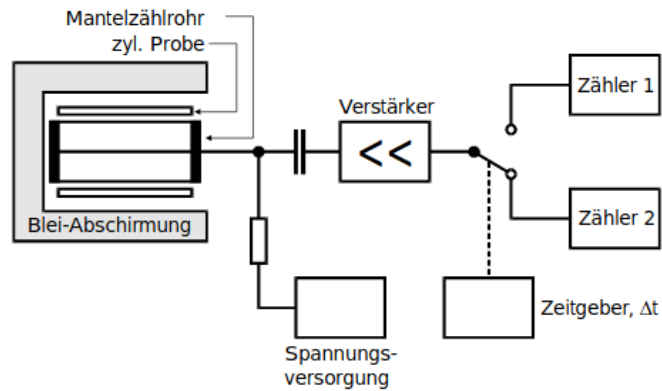


Abbildung 2: In der Abbildung ist eine schematische Darstellung der Zerfallskurve zweier Isotope, deren Halbwertszeiten stark verschieden sind. Die Anzahl der zerfallenden Kerne ist dabei logarithmisch gegen die Zeit aufgetragen. Die Zerfallskurve eines einzelnen Isotops würde linear verlaufen und das tun auch die linearen Regressionen der einzelnen Isotope (gestrichelt) [1]

Wie im schematischen Aufbau zu erkennen, ist die Probe in einen Bleimantel gehüllt, um den Einfluss äußerer Strahlung auf die Messung zu verringern. Bei jedem zerfallenden Kern wird ein β^- -Teilchen freigesetzt, das auf dem Geiger-Müller-Zählrohr einen elektrischen Impuls erzeugt, der verstärkt und dann gemessen wird. Ein Zeitschalter wechselt nach verstreichen des vorgewählten Zeitintervalls Δt auf einen anderen Zähler, sodass ohne Unterbrechung zur Notierung der Daten weitergemessen werden kann.

2.2 Untergrundbestimmung

Trotz der Bleiummantelung ist ein Anteil an äußerer Strahlung vorhanden. Um diesen Hintergrund später abzuziehen, wird dieser zunächst bestimmt. Dazu werden Messungen ohne Probe im Zählrohr mit einer Integrationszeit von 300 Sekunden durchgeführt.

2.3 Halbwertszeitbestimmung von Vanadium

Zur Halbwertszeitbestimmung von Vanadium wird eine Vanadiumprobe zunächst an einer Neutronenquelle platziert. Nachdem diese dort aktiviert wurde, wird sie in dem Zählrohr platziert und die Aktivität über ein Messintervall von 30 Sekunden gemessen. Alle 30 Sekunden wechselt der Zeitschalter auf den anderen der zwei Zähler und ermöglicht so ein Ablesen der Zählrate auf dem anderen Zähler.

2.4 Halbwertszeitbestimmung von Rhodium

Die Rhodiumprobe wird entsprechend der Vorbereitung der Vanadiumprobe auch neben der Neutronenquelle aktiviert. Die Messung der Aktivität verläuft analog zur Messung der Vanadiumprobe mit einer Messzeit von 15 Sekunden. Auch hier ermöglicht der Zeitschalter ein kontinuierliches Messen.