

Aufgabe: Neutronenaktivierungsanalyse

Kriminologisch lässt sich eine Arsenvergiftung durch eine Neutronenaktivierungsanalyse an einer Haarprobe nachweisen. Von Napoleon existieren noch mehrere Haarproben. Mit Hilfe dieser Proben wurde versucht die Todesursache von Napoleon zu klären.

Aufgabe

- 1) a) Beschreibe die im Kern stattfindenden Prozesse beim Beta-Minus- und beim Gammazerfall.
b) Nenne für beide Strahlungsarten zwei weitere Eigenschaften.
- 2) a) Diskutiere, warum langsame Neutronen von Atomkernen leicht eingefangen werden.
b) Gib die Kernreaktionsgleichung für die Neutronenaktivierung von Arsen-75 an.
b) Wie lautet die Kernreaktionsgleichung des Beta-Minus-Zerfalls von Arsen-75.
- 3) Zeige mithilfe geeigneter Rechnungen, dass mit den Methoden 1 und 2 die Existenz von Arsen-75 in einer zweihundert Jahre alten der Haarprobe nachgewiesen werden kann.
- 4) a) Berechne die Anzahl der Arsen-76-Kerne, die im untersuchten Haar unmittelbar nach der Aktivierung vorliegen. [Vergleichsergebnis: $N_0 \approx 8,5 \cdot 10^{15}$]
b) Berechne daraus die Arsen-75-Konzentration im Haar vor der Aktivierung in *mg pro kg*.
- 5) a) Nenne zwei Gründe dafür, dass die Neutronenaktivierungsanalyse eine beliebte Methode zur Analyse der Element- und Isotopenzusammensetzung von historischen Proben ist.
b) Diskutiere, ob sich aus deinen Berechnungen zu einer Haarprobe aus dem Jahre 1814 und aus den gemessenen Arsenkonzentrationen in weiteren Haarproben (Material 3) schlussfolgern lässt, dass Napoleons Todesursache im Jahre 1814 eine Arsenvergiftung war.

Material 1: Prinzip der Neutronenaktivierungsanalyse

Für die Neutronenaktivierungsanalyse benötigt man nur geringste Mengen des zu untersuchenden Materials, nachfolgend als Probe bezeichnet. Die Probe kann unbeschädigt bleiben.

- Zunächst wird die Probe aktiviert. Dazu werden die stabilen Atomkerne der Probe durch Beschuss mit langsamen Neutronen in Isotope mit einer um eins vergrößerten Massezahl umgewandelt. Dieses Isotop ist doppelt strahlungsaktiv, also *doppelt* radioaktiv
- Als erstes zeigt der neu entstandene Kern eine γ -Aktivität, weil er energetisch angeregt ist. Das Elementzeichen wird daher nach dem Beschuss mit einem * versehen. Die Halbwertszeit für diesen ersten γ -Zerfall beträgt nur wenige Mikrosekunden. Deshalb sagt man „sofort ausgelöstes γ -Teilchen“. Bei diesem γ -Zerfall wird ein γ -Quant der Frequenz f_1 abgestrahlt. Der neue Kern geht in seinen energetischen Grundzustand über und das * wird gelöscht.
- Nach dem schnellen γ -Übergang bleibt der neu entstandene Kern jedoch immer noch β -aktiv. Nach Material 3 beträgt die Halbwertszeit für diesen Zerfall $t_H = 26,3 h$. Der β -Zerfall wird von einem weiteren γ -Zerfall begleitet. Weil für diesen Zerfall die große Halbwertszeit des β -Zerfalls gilt, werden diese weiteren γ -Teilchen, welche die Frequenz f_2 besitzen „verzögert ausgelöstes γ -Teilchen“ genannt.

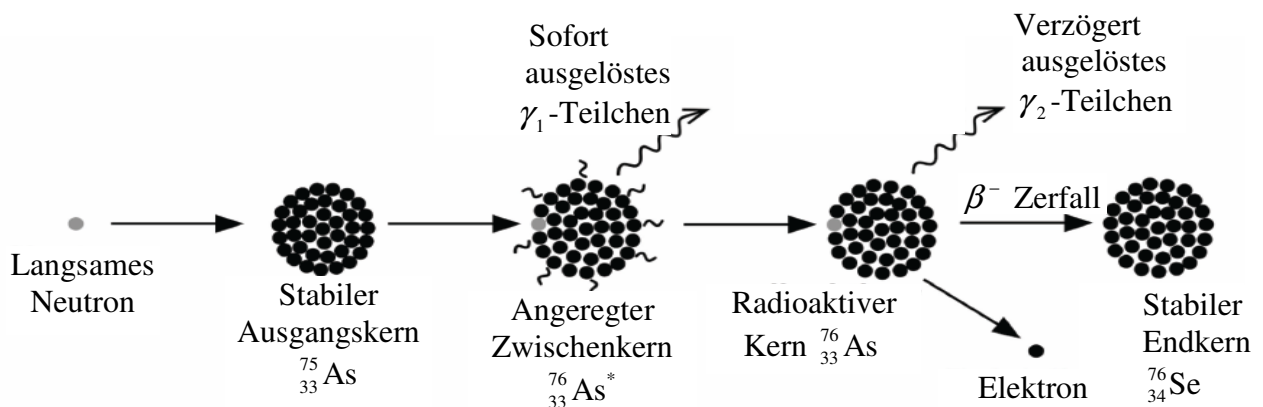


Abb. Kernumwandlung bei einer Neutronenaktivierungsanalyse.

Ausschnitt aus der Isotopentabelle

		Anzahl der Protonen Z							
		β^+							
35									
34		$^{73}_{34}\text{Se}$	$^{74}_{34}\text{Se}$	$^{75}_{34}\text{Se}$	$^{76}_{34}\text{Se}$	$^{77}_{34}\text{Se}$	$^{78}_{34}\text{Se}$	$^{79}_{34}\text{Se}$	
33		$^{72}_{33}\text{As}$	$^{73}_{33}\text{As}$	$^{74}_{33}\text{As}$	$^{75}_{33}\text{As}$	$^{76}_{33}\text{As}$	$^{77}_{33}\text{As}$		
32		$^{71}_{32}\text{Ge}$	$^{72}_{32}\text{Ge}$	$^{73}_{32}\text{Ge}$	$^{74}_{32}\text{Ge}$	$^{75}_{32}\text{Ge}$	$^{76}_{32}\text{Ge}$		
31									
30									
								β^-	
Z/N		38	39	40	41	42	43	44	45

Material 2: Untersuchungsmethoden.

Um festzustellen, welche Elemente in der Probe enthalten sind, kommen verschiedene Methoden in Frage: Methode 1 ermöglicht die gleichzeitige Untersuchung auf mehrere, verschiedene Elemente.

Methode 1: Die Energie des sofort ausgelösten Gammaquants γ_1 wird gemessen.

Diese Energie wird verglichen mit derjenigen Energie, die bei dem Übergang des angeregten Zwischenkerns in den radioaktiven Kern frei wird.

Methode 2: Aus den Strahlungsaktivitäten der erzeugten radioaktiven Kerne zu verschiedenen Zeitpunkten wird die Halbwertszeit t_H des radioaktiven Zerfalls bestimmt.

Diese Halbwertszeit wird verglichen mit der Halbwertszeit des radioaktiven Isotops des Elementes, das nachgewiesen werden soll. .

Material 3: Nachweis von Arsen-75 in einer Haarprobe Napoleons aus dem Jahre 1807

Im Jahre 2003 wurde ein Haar von Napoleon untersucht, das ihm im Jahre 1807 abgeschnitten wurde. Mittels Neutronenaktivierungsanalyse ermittelte man für ein Haar der Locke den Gehalt an Arsen-75.

Masse des Haares	$m_{\text{Haar}} = 318 \text{ mg}$
Energie des sofort ausgelösten γ_1 -Teilchens	$W(\gamma_1) = 7,3 \text{ MeV}$
Aktivität unmittelbar nach der Aktivierung	$A(0) = 6,2 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$
Aktivität 12 Stunden nach der Aktivierung	$A(12h) = 4,52 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$
Im Anschluss an den Nachweis wurde ermittelt, dass 10% des vorhandenen As-75 aktiviert wurde.	

Kern	Masse / Energie
Arsen-75	74,90349378 u
Arsen-76	75,90429089 u
Halbwertszeit von Arsen-76 $t_H = 26,3 \text{ h}$	
Neutron $m(n)$	1,0086649 u
Atomare Masseinheit	1 u = $1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $u = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Energie der atomare Masseinheit	$W_u = 9,3149 \cdot 10^8 \text{ eV}$

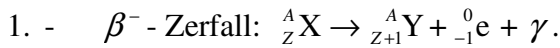
Material 4: Arsenkonzentration in weiteren Haarproben Napoleons

Art der Probe	Arsen-75-Konzentration
Weitere Haarprobe aus dem Jahr 1814	33,4 mg pro kg
Haarprobe 1, entnommen kurz nach Napoleons Tod	1,85 mg pro kg
Haarprobe 2, entnommen kurz nach Napoleons Tod	3,05 mg pro kg
Im Normalfall liegt die Arsen-75-Konzentration weit unter 1 mg pro kg.	

Material 5: Gleichungen

Zerfalls-gesetz	$N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{t \cdot \ln 2}{t_H}}$	$N(t)$ Anzahl der radioaktiven Kerne zur Zeit t . Ohne Maßeinh. N_0 Anzahl der radioaktiven Kerne zur Zeit null. t_H Halbwertszeit
Aktivitäts-gesetz	$A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{t \cdot \ln 2}{t_H}}$	$A(t)$ Anz. der Zerfälle und Strahlungen pro Sek. z.Z t . Maßeinh. Bq A_0 Anzahl der Zerfälle pro Sek. z.Z $t = 0$. Maßeinh Bq
Beziehung zwischen $N(t)$ und $A(t)$		$A(t) = \ln 2 \cdot N(t) / t_H$

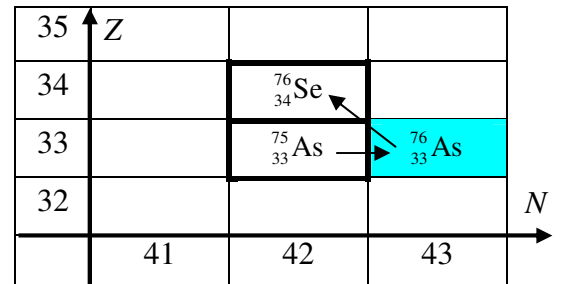
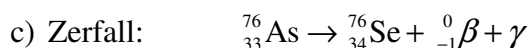
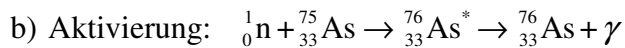
Lösung



Ein Neutron verwandelt sich unter Aussendung eines Elektrons in ein Proton.
Durch Blechplatten abschirmbar. Elektrisch und magnetisch ablenkbar.

- γ -Zerfall: Übergang von einem angeregten Zustand in den Grundzustand: ${}_Z^A X^* \rightarrow {}_Z^A X + \gamma$
Nur durch dicke Beton- oder Bleiplatten abschirmbar, nicht ablenkbar.

2. a) Neutronen werden relativ leicht in den beschossenen Kern aufgenommen, da sie im Gegensatz zu den Protonen keinen Coulombschen Potentialwall überwinden müssen.



n- Aktivierung und β^- -Zerfall

3. Methode 1 weißt das Vorhandensein des Arsens durch Nachweis des bei der Aktivierung entstehenden γ -Quants nach, denn dessen Energie ist ein „Fingerabdruck“.

Nach der Aktivierungsgleichung ${}_0^1 n + {}_{33}^{75} \text{As} \rightarrow {}_{33}^{76} \text{As} + \gamma$ müssen die Massen von ${}_0^1 n$ und ${}_{33}^{75} \text{As}$ zusammen gleich der Masse von ${}_{33}^{76} \text{As}$ und der Masse des γ -Quants sein.

Also gilt für die Masse des γ -Quants: $\Delta m_\gamma =$

$$= m({}_0^1 n) + m({}_{33}^{75} \text{As}) - m({}_{33}^{76} \text{As}) = (1,0086649 + 74,90349378 - 75,90429089) u = 7,86779 \cdot 10^{-3} u$$

Mit der Energie der atomaren Masseeinheit $W_u = 9,3149 \cdot 10^8 eV$ wird daraus $W_\gamma = 7,3288 \cdot 10^6 eV$.

Nach Material 3 wurde γ -Strahlung mit $7,3 MeV$ nachgewiesen.

Also war noch zum Zeitpunkt der Messung, 200 Jahre nach Napoleons Tod, Arsen vorhanden.

Methode 2 nutzt, dass der durch die Aktivierung anschließend erfolgende Zerfall



Findet man diese Halbwertszeit, so ist Arsen nachgewiesen.

Nach Material 3 gilt $A(0) = 6,2 \cdot 10^{10} Bq$ und $A(12 h) = 4,52 \cdot 10^{10} Bq$.

Einsetzen in z.B. $A(t) = A(0) \cdot 0,5^{t/t_H}$ ergibt $t_H = \frac{12h \cdot \ln 0,5}{\ln(A(12)/A(0))} = 26,319 h$.

Also ist die Halbwertszeit für den anschließenden β^- -Zerfall bestätigt.

4. a) Zwischen Aktivität und Anz. radioaktiver Kerne besteht die Beziehung $N(t) = A(t) \cdot t_H / \ln 2$.

Also: Anzahl der $\text{As}76$ Kerne = $N(0) = 6,2 \cdot 10^{10} Bq \cdot 26,3 \cdot 3600 s / \ln 2 = 8,475 \cdot 10^{15}$.

Dann wurden auch $8,475 \cdot 10^{15}$ $\text{As}75$ Kerne aktiviert. Das waren nur 10% der $\text{As}75$ Kerne der Probe. Also enthält sie $8,475 \cdot 10^{16}$ $\text{As}75$ Kerne. Also $N(0) \cdot \text{Masse}(\text{As}75) \cdot u = 1,054 \cdot 10^{-8} kg$.

- b) Die Probemasse der entnommenen Haare hatte $m_{pr} = 318 mg = 318 \cdot 10^{-6} kg$.

Damit ist die Konzentration $\frac{318 \cdot 10^{-6} kg}{1,054 \cdot 10^{-8} kg} = 33,148 \cdot 10^{-6}$,

D.h. In einem Kilogramm Haar sind $33,148 \cdot 10^{-3} kg = 33,148 mg$ $\text{As}75$ enthalten.

5. a) Geringe Probeentnahme, kaum Zerstörung, mehrere Elemente gleichzeitig überprüfbar.

- b) Die Probe aus dem Jahre 1814 enthält auffällig viel Arsen.

Nach Material 4 enthalten die Proben kurz nach Napoleons Tod aber nicht markant viel Arsen.
Also bleiben die Aussagen über die Vergiftung unsicher.