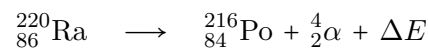


## Lösungen

1. Wofür stehen die drei A in der im Strahlenschutz wichtigen AAA-Regel?

Abstand maximieren      Abschirmung optimieren      Aufenthaltszeit minimieren

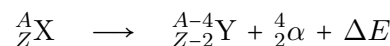
2. (a) Radon  $^{220}_{86}\text{Ra}$  ist ein Alphastrahler mit einer Halbwertszeit von 55.6 Sekunden. Es zerfällt zu Polonium (Po). Notiere die Reaktionsgleichung mit Angabe der jeweiligen Massen- und Ordnungszahl.



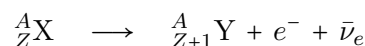
- (b) Das radioaktive Nuklid Uran  $^{238}_{92}\text{U}$  ist der Ausgangskern der sogenannten Uran-Radium-Zerfallsreihe. Dieses Radionuklid hat Massenzahl 238 und Ordnungszahl 92. Durch eine Folge von Alpha- und Betazerfällen entsteht am Ende der Zerfallsreihe das stabile Blei  $^{206}_{82}\text{Pb}$ . Wie viele Alpha- und wie viele Betazerfälle müssen hierfür stattfinden? Begründe deine Antwort.

In der Uran-Radium-Zerfallsreihe finden gemäss der Aufgabenstellung folgende beiden Zerfälle statt, wobei X jeweils ein Mutternuklid und Y ein Tochternuklid darstellt, A für die Massenzahl und Z für die Ordnungszahl steht:

- Für einen Alphazerfall gilt die Reaktionsgleichung



- Für einen  $\beta^-$ -Zerfall gilt



Das Ausgangsnuklid  $^{238}_{92}\text{U}$  hat Massenzahl 238. Das stabile Blei  $^{206}_{82}\text{Pb}$  hat die Massenzahl 206. Da bei einem  $\beta^-$ -Zerfall sich die Massenzahl nicht ändert, kann diese Änderung der Massenzahl um  $238 - 206 = 32$  nur durch Alphazerfälle entstehen. Bei einem Alphazerfall nimmt die Masse um 4 ab, daher finden  $32/4 = 8$  Alphazerfälle statt.

In 8 Alphazerfällen nimmt die Ordnungszahl Z um 16 ab.  $^{238}_{92}\text{U}$  hat Ordnungszahl 92, so dass nach 8 Alphazerfällen eine Ordnungszahl von  $92 - 16 = 76$  resultieren würde. Das stabile Blei  $^{206}_{82}\text{Pb}$  hat eine Ordnungszahl von 82. Durch einen  $\beta^-$ -Zerfall steigt die Ordnungszahl um 1. Daher sind  $82 - 76 = 6$   $\beta^-$ -Zerfälle zu erwarten.

**Kurzlösung:** 8 Alphazerfälle und 6 Betazerfälle

- (c) Warum entsteht bei einem Gammazerfall kein neues Element?

Elemente sind über die Ordnungszahl definiert: Zwei Atomkerne mit der selben Ordnungszahl gehören zum selben Element. Die Ordnungszahl Z entspricht der Anzahl der Protonen. Bei einem Gammazerfall wird ein  $\gamma$ -Quant abgegeben. Die Anzahl der Protonen ändert sich nicht - daher entsteht bei einem Gammazerfall kein neues Element.

3. Die Strahlung eines unbekannten radioaktiven Präparats gelangt in ein rund 2cm entferntes Geiger-Müller Zählrohr. Man stellt eine hohe Zählrate  $S_0$  fest.

- (i.) Bei Abschirmung mit einer Bleiplatte geht die Zählrate deutlich zurück und beträgt nur noch  $S_1$ . Dies ist aber noch immer signifikant über der Untergrundzählrate - also der Zählrate ohne radioaktive Quelle in der Nähe.
- (ii.) Platziert man zwischen der radioaktiven Quelle und dem Zählrohr ein Stück Karton, so liest man eine Zählrate deutlich grösser als  $S_1$ , aber kleiner als  $S_0$  ab.
- (iii.) Erzeugt man zwischen dem Zählrohr und der radioaktiven Quelle ein homogenes, nicht allzu starkes Magnetfeld, dessen Feldrichtung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Strahlung steht, so bleibt die Zählrate in etwa unverändert.

*Handelt es sich beim unbekannten Präparat aufgrund dieser Beobachtungen um einen Alpha-, Beta- oder Gammastrahler? Begründe deine Antwort.*

Eine Bleiplatte schirmt Alpha- und Betastrahlung ab. Aus Aussage (i.) folgt, dass auch nach Abschirmung von Alpha- und Betateilchen nach wie vor ionisierende Strahlung detektiert wird. Das bedeutet, die Quelle gibt Gammastrahlung ab.

Aus (ii.) folgt, dass die Quelle Alphastrahlung abgibt. Dies muss so sein, weil  $S_1 < S_0$  durch die Abschirmung mit Karton.

Betastrahlung ist geladen und lässt sich auf Grund der Lorentzkraft im Magnetfeld ablenken. Würde die Quelle Betastrahlung abgeben, dann müsste die Zählrate stark abnehmen, wenn man das Magnetfeld zwischen der Quelle und dem Detektor einschaltet. Aus der Aussage (iii.) folgt daher, dass die Quelle keine Betastrahlung abgibt.

Alphateilchen sind zwar auch geladen, haben aber eine verhältnismässig sehr grosse Masse und werden auf Grund der Trägheit in einem schwachen Magnetfeld kaum abgelenkt.

Mit der hier beschriebenen Methode kann auf simple Weise herausgefunden werden, welche Art(en) von ionisierender Strahlung eine unbekannte Quelle abgibt.

**Kurzlösung:** Alpha- und Gammastrahlung wird von der Quelle abgegeben

4. Eine Person befindet sich im Strahlenfeld einer radioaktiven Quelle und liest auf dem Dosimeter eine Ortsdosisleistung von  $0.14 \mu\text{Sv/h}$  ab.

(a) *Welche Dosis  $E$  wird diese Person innert 3 Stunden an diesem Ort akkumulieren?*

$$E = D \cdot t = 0.14 \mu\text{Sv/h} \cdot 3\text{h} = 0.42 \mu\text{Sv}$$

Dabei ist  $E$  die effektive Dosis,  $t$  die Expositionszeit und  $D$  die Ortsdosisleistung.

- (b) *Eine Messung ohne Quelle hat ergeben, dass der Untergrund in diesem Labor  $0.05 \mu\text{Sv/h}$  beträgt. Welche Ortsdosisleistung wäre erwartungsgemäss auf dem Dosimeter abzulesen, wenn die Person ihren Abstand von der Quelle verdreifacht?*

Die Ortsdosisleistung *ohne* den Untergrund beträgt im gegebenen Abstand

$$D_o = 0.14 \mu\text{Sv/h} - 0.05 \mu\text{Sv/h} = 0.09 \mu\text{Sv/h}$$

Mit zunehmendem Abstand sinkt die Ortsdosisleistung quadratisch. Wird der Abstand verdreifacht, dann liegt noch  $1/9$  der Ortsdosisleistung durch die Quelle vor, also hier  $0.01 \mu\text{Sv/h}$ . Auf dem Dosimeter wird zusätzlich zu den  $0.01 \mu\text{Sv/h}$  (Quelle) noch  $0.05 \mu\text{Sv/h}$  (Untergrund) gemessen - insgesamt also eine totale Ortsdosisleistung von

$$D = 0.01 \mu\text{Sv/h} + 0.05 \mu\text{Sv/h} = 0.06 \mu\text{Sv/h}$$

Fazit: Je mehr Abstand von der Quelle, desto besser!

**Kurzlösung:** Eine Ortsdosisleistung von  $0.06 \mu\text{Sv/h}$  wird vom Dosimeter angezeigt

5. *Warum ist es wichtig, vor dem frei messen des Arbeitsplatzes in einiger Entfernung zu diesem zuerst eine Untergrundmessung zu machen?*

Terrestrische Strahlung und kosmische Strahlung verursachen einen Untergrund. Um feststellen zu können, ob beispielsweise eine Kontamination vorliegt, muss von der gemessenen Ortsdosisleistung  $D$  der Untergrund abgezogen werden. Dieser Untergrund sollte in einiger Entfernung zum frei zu messenden Arbeitsplatz bestimmt werden. Wenn das Ergebnis der Untergrundmessung in etwa demjenigen der Messung am Arbeitsplatz entspricht, gilt dieser als nicht kontaminiert und sauber. Ohne die Untergrundmessung liesse sich nicht sagen, ob der am Arbeitsplatz gemessene Wert dem Untergrund zugeordnet werden kann, oder ob tatsächlich eine Kontamination vorliegt.

6. Die Variation der Ortsdosisleistung  $D$  mit der Höhe  $h$  in der Atmosphäre kann für mittlere geographische Breiten parametrisiert werden durch

$$D(h) = D_0 \cdot e^{\alpha \cdot h}$$

Dabei sei  $h$  die Höhe in Metern,  $D_0 = 0.03 \mu\text{Sv/h}$  und  $\alpha = 4.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ . Welche jährliche Dosis akkumuliert ein Pilot mit 500 Flugstunden bei einer Reise Flughöhe von 11 km?

Zuerst ist die Ortsdosisleistung  $D(11 \text{ km})$  in einer Höhe von 11 km zu bestimmen:

$$D(h) = D_0 \cdot e^{\alpha \cdot h} = 0.03 \mu\text{Sv/h} \cdot e^{4.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1} \cdot 11'000 \text{ m}} = 3.79 \mu\text{Sv/h}$$

Für die effektive Dosis während 500 Flugstunden in der gegebenen Reise Flughöhe gilt

$$E = D \cdot t = 3.79 \mu\text{Sv/h} \cdot 500 \text{ h} \approx 1.9 \text{ mSv}$$

Der Dosisgrenzwert für die Bevölkerung beträgt nach Art. 37 StSV maximal 1 mSv. Flugpersonal kann gemäss obiger Abschätzung - abhängig von den Routen und der Anzahl Flugstunden - etwa den zweifachen Dosisgrenzwert aufnehmen.

**Kurzlösung:** Die effektive Dosis ist etwa 1.9 mSv

7. Die spezifische Aktivität  $A_S$  ist die Aktivität  $A$  pro Masse  $m$ . Es gilt  $A_S = A/m$ . Überlege dir dazu:
- (a) Die spezifische Aktivität von Uran  $^{235}\text{U}$  ist ungefähr  $80 \cdot 10^6 \text{ Bq/kg}$ . Wie gross ist die Aktivität von 250 g des Radionuklids  $^{235}\text{U}$ ?

Es gilt für die Aktivität  $A$  gemäss der gegebenen Formel

$$A = A_S \cdot m = 80 \cdot 10^6 \text{ Bq/kg} \cdot 0.25 \text{ kg} = 20 \cdot 10^6 \text{ Bq}$$

- (b) Ein 70 kg schwerer Mensch hat eine natürliche Aktivität von rund 9 kBq. Diese stammt zu einem wesentlichen Teil aus Kalium  $^{40}\text{K}$  Zerfällen. Wie gross ist die spezifische Aktivität?

$$A_S = \frac{A}{m} = \frac{9'000 \text{ Bq}}{70 \text{ kg}} \approx 129 \text{ Bq/kg}$$

8. Das künstliche Radionuklid Cäsium  $^{137}\text{Cs}$  entsteht ausschliesslich als Spaltprodukt bei der Kernspaltung in Kernkraftwerken und bei nuklearen Explosionen. Die Halbwertszeit von  $^{137}\text{Cs}$  beträgt rund 30 Jahre. Am 26. April 1986 kam es zur Explosion des Reaktors im Kernkraftwerk von Tschernobyl. Wie viel Prozent der damals frei gewordenen Menge an  $^{137}\text{Cs}$  existiert heute noch?

Im Februar 2021 war es 34.8 Jahre her, dass es in Tschernobyl zur Explosion des Reaktors kam. Setzt man den Grundwert  $N_0 = 100\%$ . Dann existiert heute noch

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = N_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot t} = 100\% \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{30.1 \text{ Jahre}} \cdot 34.8 \text{ Jahre}} = 44.9\%$$

Dabei ist  $\lambda$  die Zerfallskonstante, welche sich gemäss der Formelsammlung mit Hilfe der Halbwertszeit  $T_{1/2}$  berechnen lässt und  $t$  ist die Zeit, welche seither vergangen ist. Demnach existieren heute noch 44.9% vom damals frei gewordenen  $^{137}\text{Cs}$ .

9. Im Januar 2006 ist in Florida die Raumsonde New Horizon zum Zwergplaneten Pluto gestartet, den sie Mitte des Jahres 2015 passiert hat. Zur Energieversorgung ist ein Generator an Bord, der die Wärme beim Alphazerfall von Plutonium  $^{238}\text{Pu}$  nutzt. Dieses Radionuklid hat eine Halbwertszeit von 87.7 Jahre. Beim Start betrug die Aktivität dieses Nuklearantriebs  $4.9 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$ . Wenn die Aktivität des Plutoniums auf 60% der Anfangsaktivität abgesunken ist, reicht die Wärme nicht mehr für die Funktionsfähigkeit der Raumsonde aus. Zeige durch Rechnung, dass im Juli 2015 noch ausreichend thermische Energie zur Verfügung stand.

Von Januar 2006 bis Juli 2015 vergingen rund  $t = 9.5$  Jahre. Bei einer gegebenen Anfangsaktivität  $A_0 = 4.9 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$  erhält man

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \cdot t} = 4.9 \cdot 10^{15} \text{ Bq} \cdot e^{-\frac{\ln(2)}{87.7 \text{ Jahre}} \cdot 9.5 \text{ Jahre}} = 4.5 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$$

Dies entspricht rund 92.8% der ursprünglichen Aktivität, was deutlich über den verlangten 60% Minimalaktivität liegt - es stand im Juli 2015 ausreichend thermische Energie zur Verfügung.

10. Wo gibt es Anwendungen von Radioaktivität in Technik, Medizin und Biologie? Nenne mindestens fünf Beispiele.

(i.) In der Medizin:

- Tumorbestrahlung
- Gammakamera, z.B. zur Schilddrüsenuntersuchung nach Inkorporation von Iod  $^{131}\text{I}$ , das bei Unfällen in Kernkraftwerken frei werden kann (zur Prävention: Iodtabletten sättigen Schilddrüse mit  $^{127}\text{I}$ , so dass kein radioaktives  $^{131}\text{I}$  aufgenommen wird)
- Tracer für bildgebende nuklearmedizinische Anwendungen: Skelettszintigrafie, Myokardszintigrafie, Nierenfunktionsszintigrafie und Lungenszintigrafie sowie die Positronen-Emissions-Tomografie (PET)
- usw.

(ii.) In der Technik:

- Berührungslose Dickenmessung von Blechen im Produktionsprozess. Je dicker das Blech, desto grösser die Abschirmung. Bei bekannter Quellstärke kann die Dicke auf Grund der gemessenen Zählrate bestimmt werden
- Elektrische Energie in Kernkraftwerken durch Kernspaltung gewinnen
- Lufteinschlüsse in Schweissnähten finden - diese reduzieren die Stabilität der Naht. Man findet sie, da Luft ionisierende Strahlung weniger absorbiert als das Material der Schweissnaht (z.B. in der Luftfahrt)
- Brandschutzanlagen:  $^{241}\text{Am}$  als Alphastrahler in Rauchmeldern
- Nuklearantriebe in Raumsonden, Schiffen und U-Booten
- usw.

(iii.) In der Biologie

- Überprüfung des Stoffwechselumsatzes
- Bei Neuzüchtungen können Mutationen beschleunigt ausgelöst werden
- Verbesserung der Lagerfähigkeit von Lebensmitteln durch Bestrahlung
- usw.

# Formelsammlung

Es bezeichne  $N$  die Anzahl Kerne,  $A$  die Aktivität und  $\lambda$  sei die Zerfallskonstante. Die Grössen  $N$  und  $A$  seien als Funktion der Zeit  $t$  gegeben mit

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad A(t) = \lambda \cdot N(t)$$

Die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  ist definiert als

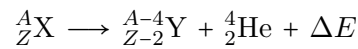
$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

Die effektive Dosis  $E$  berechnet sich aus der Ortsdosisleistung  $D$  und der Aufenthaltszeit  $t$  als

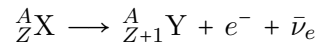
$$E = D \cdot t$$

Die Ortsdosisleistung  $D$  nimmt mit zunehmendem Abstand zur Quelle quadratisch ab.

Alphazerfall von Mutternuklid X in Tochternuklid Y, wobei  $A$  die ursprüngliche Massenzahl und  $Z$  die ursprüngliche Ordnungszahl sei



Betazerfall ( $\beta^-$ ) von Mutternuklid X in Tochternuklid Y



Dabei steht  $e^-$  für ein Elektron und  $\bar{\nu}_e$  für ein Antielektroneneutrino. Die Teilchen  $e^-$  und  $\bar{\nu}_e$  können im Vergleich zu Protonen und Neutronen als masselos betrachtet werden.