

12.1 Echografie en MRI

Opgave 1

- Echografie maakt gebruik van geluidsgolven.
De orde van grootte van de golfsnelheid is 10^3 m s^{-1} .
MRI maakt gebruik van elektromagnetische golven.
De golfsnelheid is gelijk aan de lichtsnelheid: $3,0 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$.
- De eigenfrequentie van waterstofkernen hangt af van het type weefsel waarin ze zich bevinden en van de sterkte van het magnetisch veld. Het MRI-apparaat moet dus meerdere frequenties gebruiken om alle waterstofkernen te kunnen detecteren.
- De gradiëntspoelen zorgen voor een lokale verandering van het reeds aanwezige magnetische veld. Hierdoor kunnen alleen kernen in dit magnetisch veld in een aangeslagen toestand komen en even later weer terugvallen naar de grondtoestand onder uitzending van radiostraling.

Opgave 2

- De geluidsgolf kan weerkaatsen bij de overgang van één medium naar het andere. Hoe groter het verschil in geluidssnelheid tussen beide media, hoe sterker de reflectie is.
Zonder gel moet de geluidsgolf door een klein laagje lucht heen. De geluidssnelheid in lucht is veel kleiner dan in weefsel. Zonder gel treedt dus veel reflectie op.
- De onregelmatigheden in de huid beïnvloeden de beeldvorming dan niet.
En de gel zorgt ervoor dat de transducer gemakkelijk over de huid heen kan bewegen.
- De golflengte volgt uit de formule voor de golfsnelheid.

$$v = f \cdot \lambda$$

De frequentie ligt vast tijdens een onderzoek met echografie.

De geluidssnelheid is in elk type weefsel anders.

Dus is de golflengte ook anders in elk type weefsel.

- In de longen zit lucht en in de buik niet. Dus in de longen treedt reflectie op, namelijk op de rand tussen weefsel en lucht. Je ziet dus geen details.

Opgave 3

- De frequentie bereken je met de formule voor de golfsnelheid.
De golflengte volgt uit de diameter van de ader.

$$v = f \cdot \lambda$$

$$v = 1,58 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1} \quad (\text{Zie BINAS tabel 15A})$$

$$\lambda = 1,0 \text{ mm} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$1,58 \cdot 10^3 = 1,0 \cdot 10^{-3} \times f$$

$$f = 1,58 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

$$\text{Afgerond: } f = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Hz.}$$

- De golflengte volgt uit de formule voor de golfsnelheid.

$$v = f \cdot \lambda$$

Als de golflengte kleiner is dan de diameter van de ader, dan weet de fysiotherapeut zeker dat de geluidsgolf zal reflecteren.

Als de golflengte kleiner is en de golfsnelheid dezelfde is, dan is de frequentie hoger.

Opgave 4

- Een mens bestaat voor een groot deel uit water.
De lichaamstemperatuur is ongeveer $37 \text{ }^\circ\text{C}$ en ligt in de buurt van $40 \text{ }^\circ\text{C}$.
- De tijd bereken je met de formule voor de snelheid.
De snelheid is de geluidssnelheid in water van $40 \text{ }^\circ\text{C}$.
Bij het berekenen van de afstand moet je ermee rekening houden dat de geluidspuls heen en weer gaat tussen de transducer en de ongeboren baby.

$$s = v \cdot t$$

$$s = 2 \times 12 \text{ cm} = 24 \text{ cm} = 0,24 \text{ m}$$

$$v = 1,529 \cdot 10^3 \text{ m s}^{-1} \quad (\text{Zie BINAS tabel 15A; } 40 \text{ }^\circ\text{C} = 313 \text{ K})$$

$$0,24 = 1,529 \cdot 10^3 \times t$$

$$t = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

- c De frequentie waarmee de geluidspulsen worden uitgezonden, bereken je met de formule voor de frequentie.

De tijd T is de tijd tussen twee pulsen.

De tijd T is de tijdsduur van een puls plus de tijd die nodig is om heen en weer te gaan tussen buikwand en ongeboren kind.

$$T = 110 \mu\text{s} + 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$T = 110 \cdot 10^{-6} + 1,6 \cdot 10^{-4} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

$$f = \frac{1}{2,7 \cdot 10^{-4}}$$

$$f = 3,7 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

Deze frequentie is hoorbaar voor mensen.

Opgave 5

- a De golflengte bereken je met de formule voor de golfsnelheid.
De golfsnelheid van elektromagnetische golven is de lichtsnelheid.

$$v = f \cdot \lambda$$

$$v = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$$f = 53,5 \text{ MHz} = 53,5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

$$2,9979 \cdot 10^8 = \lambda \times 5,35 \cdot 10^7$$

$$\lambda = 5,603 \text{ m}$$

Afgerond: $\lambda = 5,60 \text{ m}$.

- b De sterkte van het magnetisch veld bereken je met de gegeven formule.

$$f = \frac{\gamma \cdot B_{\text{ext}}}{2\pi} \quad \text{met } f = 53,5 \text{ MHz} = 53,5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

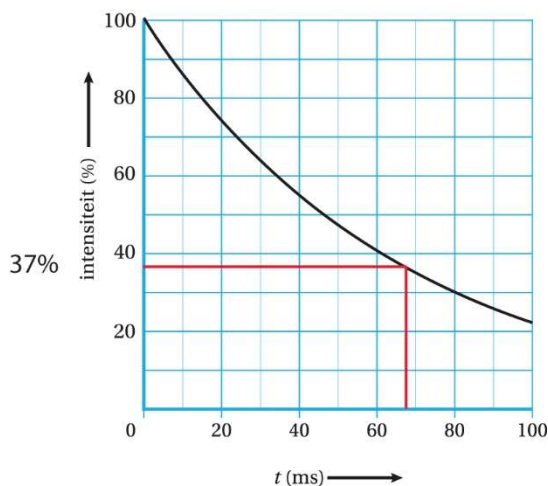
$$\gamma = 267,5 \text{ MHz T}^{-1} = 267,5 \cdot 10^6 \text{ Hz T}^{-1}$$

$$53,5 \cdot 10^6 = \frac{267,5 \cdot 10^6 \cdot B_{\text{ext}}}{2\pi}$$

$$B_{\text{ext}} = 1,256 \text{ T}$$

Afgerond: 1,26 T.

- c Hersenvocht bevat meer water dan andere weefsels. In een molecuul water is het percentage waterstofkernen veel groter dan in andere moleculen.
- d Als 63% van de waterstofkernen een foton heeft uitgezonden, dan is de intensiteit afgenomen tot 37%. In figuur 12.1 hieronder lees je af dat de relaxatietijd dan gelijk is aan 68 ms. Uit tabel 12.1 in het basisboek volgt dat de straling afkomstig is uit vetweefsel.



Figuur 12.1

Opgave 6

- a Er geldt: $E_f = h \cdot f$ en $c = f \cdot \lambda$.

Hoe groter de energie van een foton, des te groter is de frequentie

Omdat de waarde van c niet verandert, volgt uit een grotere frequentie een kleinere golflengte.

De kleinste golflengte heeft uv-C en dus is uv-C het gevaarlijkst.

- b De energie bereken je met de formule voor de energie van een foton.

$$E_f = h \cdot f$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$$

$$f = 50 \text{ MHz} = 50 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

$$E_f = 6,626 \cdot 10^{-34} \times 50 \cdot 10^6$$

$$E_f = 3,313 \cdot 10^{-26} \text{ J}$$

$$3,313 \cdot 10^{-26} \text{ J} = \frac{3,313 \cdot 10^{-26}}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 2,068 \cdot 10^{-7} \text{ eV}$$

Dit is veel minder dan 'enkele elektronvolts'.

Dus de straling is niet in staat om atomen te ioniseren.

- c De frequentie bereken je met de energie van een foton.

$$141 \text{ keV} = 141 \cdot 10^3 \times 1,602 \cdot 10^{-19} = 2,2588 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

$$E_f = h \cdot f$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$$

$$2,2588 \cdot 10^{-14} = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot f$$

$$f = 3,409 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$$

Afgerond: $3,41 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$.

- d harde röntgenstraling

12.2 Röntgenfotografie en CT-scan

Opgave 7

De hoeveelheid straling die wordt doorgelaten, bereken je met de formule voor de verzwakking van de γ -straling.

$$I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{d_{\frac{1}{2}}}}$$

$$I = 100 - 85 = 15\%$$

$$I_0 = 100\%$$

$$d_{\frac{1}{2}} = 1,5 \text{ cm} \quad (\text{Zie BINAS tabel 28F})$$

$$15 = 100 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{1,5}}$$

$$0,15 = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{1,5}}$$

$$d = 4,105 \text{ cm}$$

Afgerond: $d = 4,1 \text{ cm}$.

Opgave 8

De veiligste verpakking laat de minste straling door. Dat is de verpakking met het grootste aantal halveringsdiktes n . Voor het aantal halveringsdiktes geldt $n = \frac{d}{d_{\frac{1}{2}}}$.

IJzer	Aluminium	Beton
$d = 3,0 \text{ cm}$	$d = 6,0 \text{ cm}$	$d = 6,0 \text{ cm}$
$d_{\frac{1}{2}} = 2,1 \text{ cm}$	$d_{\frac{1}{2}} = 6,0 \text{ cm}$	$d_{\frac{1}{2}} = 6,6 \text{ cm}$
$n = \frac{3,0}{2,1} = 1,4$	$n = \frac{6,0}{6,0} = 1,0$	$n = \frac{6,0}{6,6} = 0,91$

De verpakking van ijzer heeft het grootste aantal halveringsdiktes. Verpakking 1 is dus het veiligst.

Opgave 9

- Volgens BINAS tabel 28F is de halveringsdikte van bot kleiner dan de halveringsdikte van water (= zacht weefsel). Bot houdt de straling dus beter tegen dan overig weefsel. De hoeveelheid straling op plaats A is dus kleiner dan op plaats B.
- Beenmerg houdt straling slechter tegen dan botweefsel. Hoe meer straling wordt tegengehouden, des te witter is de foto. Op de foto in figuur 12.11 van het basisboek is de binnenkant van de botten donkerder. Dus daar is de straling door beenmerg gegaan.

Opgave 10

Hoe meer straling wordt tegengehouden, des te witter is de foto. Bariumpap houdt straling dus beter tegen. De halveringsdikte van bariumpap is dus klein.

Opgave 11

Als 30% van de straling wordt tegengehouden, dan wordt 70% doorgelaten.

Een plaatje aluminium van 1,0 cm laat 70% door.

Een tweede laag van 1 cm houdt 70% van de 70% doorgelaten straling door.

Dit is $0,7 \times 70\% = 49\%$. Een plaatje van 2,0 cm houdt dus ongeveer de helft tegen.

Tom heeft gelijk.

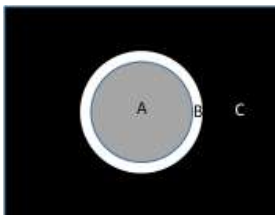
Opgave 12

- a Zie BINAS tabel 28F
50 keV = 0,05 MeV. Dus de halveringsdikte is 0,70 cm

De dikte van het aluminium is 0,70 cm = 7 mm. Dit is precies de halveringsdikte.

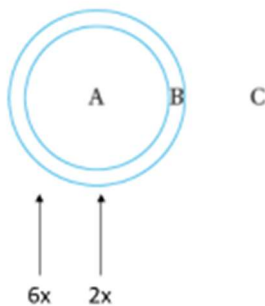
- A De straling wordt gehalveerd door het bovenvlak en door het ondervlak.
Dus 25% wordt doorgelaten. Dus vlak A is grijs.
B De zijde is 7,0 cm. De straling wordt 10x gehalveerd:
Dus $\left(\frac{1}{2}\right)^{10} \times 100\% = 0,097\%$ wordt doorgelaten. Als er geen straling wordt doorgelaten is de kleur op een röntgenfoto wit.
C In deel C wordt 100% van de straling doorgelaten. Op de foto is de kleur dan zwart.

Zie figuur 12.2 hieronder.



Figuur 12.2

- b De 'dikte' van het aluminium, waar de straling doorheen gaat, is niet overal hetzelfde. Bij de overgang naar de holte is de dikte 6 x 7 mm en wordt de straling zes keer gehalveerd. Middenop de holte wordt de straling twee keer gehalveerd. Zie figuur 12.3 hieronder.



Figuur 12.3

12.3 Kernstraling

Opgave 13

- a ${}^{66}_{30}\text{Zn}$
- b In BINAS tabel 25A staan 7 verschillende isotopen van zink. In de laatste kolom zie je dat er 5 isotopen zijn die geen straling uitzenden.
- c β -straling behoort niet tot de elektromagnetische straling; γ -straling wel.
In de laatste kolom zie je dat er 1 isotoop is die elektromagnetische straling uitzendt.
- d β^- -straling bestaat uit elektronen: dus is er 1 isotoop die elektronen uitzendt.

Opgave 14

- a ${}^6_3\text{Li}$ is stabiel
- b ${}^{63}_{28}\text{Ni} \rightarrow {}^0_{-1}\text{e} + {}^{63}_{29}\text{Cu}$
- c ${}^{15}_8\text{O} \rightarrow {}^0_{+1}\text{e} + {}^{15}_7\text{N}$
- d ${}^{244}_{94}\text{Pu} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{240}_{92}\text{U}$
- e ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ is stabiel
- f ${}^{212}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^0_{-1}\text{e} + {}^{212}_{83}\text{Bi}$

Opgave 15

- a ${}^{99m}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^0_0\gamma + {}^{99}_{43}\text{Tc}$
- b ${}^{99}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^0_{-1}\text{e} + {}^{99}_{44}\text{Ru}$
- c Technetium-99m zendt een foton uit. Technetium-99 zendt een elektron uit. De elektronen worden door je lichaam geabsorbeerd, omdat de dracht van elektronen in weefsel zeer klein is.

Opgave 16

- a Bij elke ionisatie verliest het α -deeltje ongeveer 10 eV aan energie. Met enkele MeV kun je dan ongeveer een half miljoen atomen ioniseren. Daarna is de energie te laag om nog een atoom te ioniseren.
- b Voor de kinetische energie geldt $E_k = \frac{1}{2}m \cdot v^2$.
Een β -deeltje heeft dus een veel kleinere massa dan een α -deeltje.
Als de kinetische energie hetzelfde is, is de snelheid dus veel groter.
- c – Een α -deeltje heeft een kleinere snelheid en daardoor meer tijd voor interactie met een atoom waar het langs komt.
– Een β -deeltje heeft lading -1 , een α -deeltje lading $+2$. Door de grotere lading is de interactie bij een α -deeltje groter dan bij een β -deeltje.
- d Een β -deeltje met een bepaalde energie kan net zoveel atomen ioniseren als een α -deeltje. Omdat de ionisatie minder vaak lukt bij een β -deeltje, komt het dus verder.
- e De kans om 1 atoom te passeren is $100 - 0,01 = 99,99\%$.
De kans om 7000 atomen te passeren is $0,9999^{7000} = 0,497$
Met een kans van 0,497 is de kans dus ongeveer 50%.
Dus een rij van 7000 atomen komt overeen met de halveringsdikte.

Opgave 17

De achtergrondstraling bestaat onder andere uit kosmische straling en straling uit natuurlijke gesteenten.

De dampkring houdt een deel van de kosmische straling tegen. Hoog in de bergen is de dampkring boven je hoofd dunner. Daar wordt minder kosmische straling tegengehouden.

In de bergen bevind je je dichter bij natuurlijk gesteente. De stralingsintensiteit is daar dus groter. (Bergen zijn ontstaan doordat de aardkorst omhoog is geduwd. Laag gelegen gebieden zijn bedolven onder sediment zoals zand.)

Opgave 18

- a Het massagetal van U-238 is 238 en het massagetal van Pb-206 is 206. Het verschil in massagetal is gelijk aan $238 - 206 = 32$.
 Bij het uitzenden van een α -deeltje komt er een He-4 kern uit de moederkern. Het massagetal van een He-4 kern is gelijk aan 4.
 Bij het uitzenden van een β -deeltje komt er een elektron uit de moederkern. Het massagetal van een elektron is gelijk aan 0.
 De afname van het massagetal wordt dus veroorzaakt door het uitzenden van α -deeltjes.
 Per uitgezonden α -deeltje neemt het massagetal met 4 af. In totaal neemt het massagetal met 32 af. Er wordt dus bij $\frac{32}{4} = 8$ stappen een α -deeltje uitgezonden.
- b De vervalvergelijking is ${}_{91}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb} + 8{}_{2}^4\text{He} + n{}_{-1}^0\text{e}$
 Als $n = 7$, klopt de vergelijking.
 Dus bij zeven stappen wordt een elektron uitgezonden.

Opgave 19

- a ${}_{9}^{18}\text{F} \rightarrow {}_{+1}^0\text{e} + {}_{8}^{18}\text{O}$
- b De orde van grootte van Δt bereken je met de formule voor de (gemiddelde) snelheid.
 De (gemiddelde) snelheid is de lichtsnelheid.

$$c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$c = 2,997 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

$\Delta x = 0,2 \text{ m}$ (het verschil in afgelegde afstand is ongeveer gelijk aan de diameter van het hoofd)

$$2,997 \cdot 10^8 = \frac{0,2}{\Delta t}$$

$$\Delta t = 6,673 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$

De orde van grootte is 10^{-9} s .

- c Mogelijke oorzaken zijn:
- Eén van de twee fotonen (of beide) is (zijn) onderweg geabsorbeerd.
 - De patiënt ligt niet stil.
 - Twee fotonen afkomstig van verschillende annihilaties komen binnen, maar wel binnen de tijdsduur Δt

12.4 Halveringstijd en activiteit**Opgave 20**

- a De activiteit bereken je met de formule voor de (radio)activiteit.
De tijd t is de tijd tussen het tijdstip van injecteren en het tijdstip van de meting.

Tussen maandag 9:10 h en dinsdag 8:46 h zijn 23 uren en 36 minuten verstreken.

$$t = 23 \text{ uur} + 36 \text{ minuten}$$

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}}$$

$$t_{\frac{1}{2}} = 13,2 \text{ h} \quad (\text{Zie BINAS tabel 25A})$$

$$t = 23 \text{ h} + 36 \text{ min} = 23 + \frac{36}{60} \text{ h} = 23,6 \text{ h}$$

$$A_0 = 100\%$$

$$A = 100 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{23,6}{13,2}}$$

$$A = 28,959\%$$

De afname is $100,00\% - 28,959 = 71,04\%$

Afgerond: 71,0%.

- b Om de schildklier te onderzoeken, moet een deel van het radioactieve preparaat in de schildklier terecht komen. Het duurt een bepaalde tijd voordat het radioactieve preparaat zich door het lichaam verspreid heeft.
- c Radioactief materiaal vervalft spontaan. Bovendien scheidt het lichaam stoffen uit via urine.

Opgave 21

- a De massa van I-131 bereken je met het aantal atomen I-131 en de massa van een atoom.

Het aantal atomen I-131 bereken je met $A = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}} \cdot N$.

$$A = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}} \cdot N$$

$$A = 6,0 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$$

$$t_{\frac{1}{2}} = 8,0 \text{ d} = 8,0 \times 24 \times 3600 = 6,912 \cdot 10^5 \text{ s}$$

$$6,0 \cdot 10^{15} = \frac{\ln 2}{6,912 \cdot 10^5} \cdot N$$

$$N = 5,9831 \cdot 10^{21} \text{ atomen I-131}$$

De massa van een atoom I-131 is afgerond 131 u.

$$1 \text{ u} = 1,660538921 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \quad (\text{Zie BINAS tabel 7})$$

$$\text{De massa van I-131 is } 5,9831 \cdot 10^{21} \times 131 \times 1,660538921 \cdot 10^{-27} = 1,30 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

Dit is afgerond: $m = 1,3 \text{ g}$.

- b Nee, de halveringstijd is een eigenschap van de stof zelf en hangt dus niet af van de hoeveelheid.
- c Ja, de activiteit van een preparaat is het aantal kernen dat per seconde vervalft. Elke radioactieve kern heeft in een seconde evenveel kans om te vervallen. Als de hoeveelheid radioactieve kernen verdubbeld wordt, zal het aantal kernen dat elke seconde vervalft ook verdubbelen.
- d Het aantal dagen waarin de activiteit is gedaald tot $1,7 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$ bereken je met de formule voor de (radio)activiteit.

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

$$A = 1,7 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$$

$$A_0 = 6,0 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$$

$$t_{1/2} = 8,0 \text{ d}$$

$$1,7 \cdot 10^{15} = 6,0 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{8,0}}$$

$$t = 14,555 \text{ d}$$

Afgerond: $t = 15 \text{ d}$.

Opgave 22

- a Tussen 1986 en 2076 liggen 90 jaar. Dus na 90 jaar is de radioactiviteit van cesium afgenomen tot 12,5 %. Dat is na drie halveringstijden. De halveringstijd is dus gelijk aan 30 jaar. Volgens BINAS tabel 25 is dat de halveringstijd van cesium-137.
- b Het aantal radioactieve isotopen bereken je met de formule van het aantal moederkernen.

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

$$N = 1\%$$

$$N_0 = 100\%$$

$$t_{1/2} = 28 \text{ y} \quad (\text{Zie BINAS tabel 25A})$$

$$1 = 100 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{28}}$$

$$t = 186,02 \text{ j}$$

Dus het duurt meer dan een eeuw voordat er minder dan 1% van de oorspronkelijke hoeveelheid strontium-90 over is.

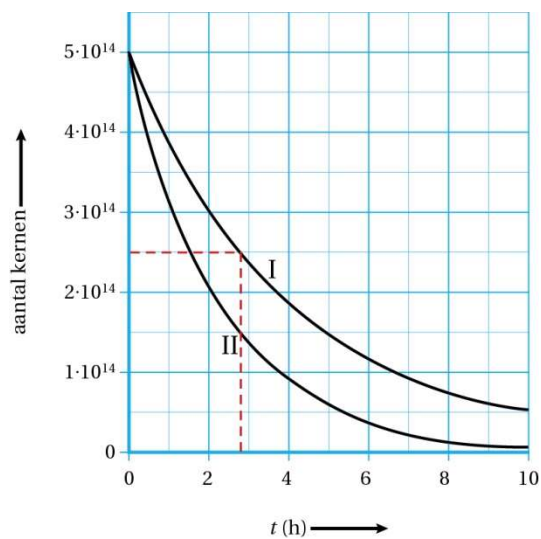
OF

Een eeuw komt overeen met ongeveer vier halveringstijden van Sr-90. Na vier halveringstijden is nog 6,25% over en dat is veel meer dan 1%.

- c Na 6,0 uur is er nog 25% van de radioactieve stof over. Dit komt overeen met twee halveringstijden.
De halveringstijd is dus 3,0 uur.

Opgave 23

- a Hoe instabieler een isotoop is, hoe sneller hij vervalst.
Op $t = 0 \text{ s}$ is het aantal deeltjes hetzelfde. Daarna neemt het aantal deeltjes van preparaat II sneller af dan dat van preparaat I.
Preparaat I is dus het meest stabiel.
- b De halveringstijd van een isotoop is de tijd waarin de helft van de isotopen vervallen is. In figuur 12.4 hierna lees je af dat na 2,8 h het aantal kernen gehalveerd is.
De halveringstijd van preparaat I is dus 2,8 h.



Figuur 12.4

- c De activiteit op een moment bereken je met de formule voor de (radio)activiteit.

$$A = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}} \cdot N$$

$$t_{\frac{1}{2}} = 2,8 \text{ h} = 2,8 \times 3600 = 1,008 \cdot 10^4 \text{ s}$$

$$N = 5,0 \cdot 10^{14}$$

$$A = \frac{\ln 2}{1,008 \cdot 10^4} \times 5,0 \cdot 10^{14}$$

$$A = 3,43 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

$$\text{Afgerond: } 3,4 \cdot 10^{10} \text{ Bq.}$$

OF

De activiteit op een moment volgt uit de raaklijn aan het (N,t) -diagram.

Zie figuur 12.5 hierna.

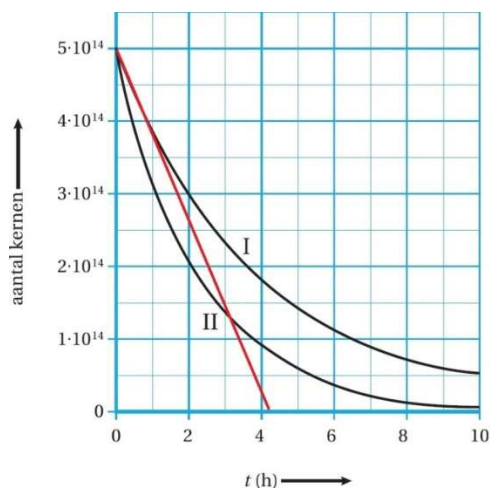
$$A = - \left(\frac{\Delta N}{\Delta t} \right)_{\text{raaklijn}}$$

$$\Delta N = 0 - 5,0 \cdot 10^{14}$$

$$\Delta t = 4,1 - 0,0 = 4,1 \text{ h} = 4,1 \times 3600 = 1,476 \cdot 10^4 \text{ s}$$

$$A = - \frac{-5,0 \cdot 10^{14}}{1,476 \cdot 10^4} = 3,38 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Dus de afname is $3,4 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.



Figuur 12.5

d Op $t = 2,8$ h geldt $N = 2,5 \cdot 10^{14}$.

$$A = \frac{\ln 2}{1,008 \cdot 10^4} \times 2,5 \cdot 10^{14}$$

$$A = 1,71 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Afgerond: $1,7 \cdot 10^{10}$ Bq.

OF

De activiteit op een moment volgt uit de raaklijn aan het (N,t) -diagram.

Zie figuur 12.6 hierna.

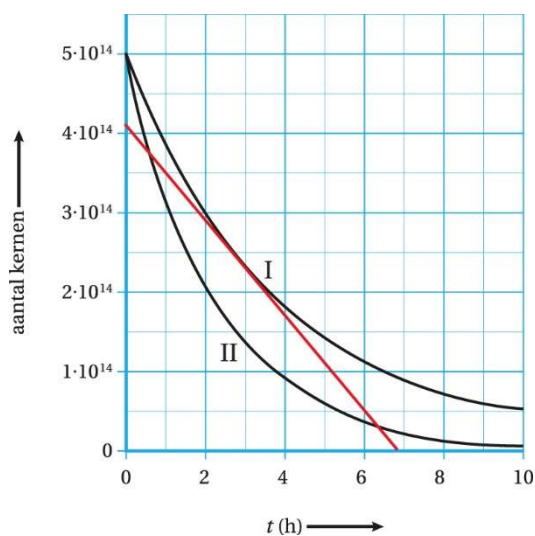
$$A = - \left(\frac{\Delta N}{\Delta t} \right)_{\text{raaklijn}}$$

$$\Delta N = 0 - 4,2 \cdot 10^{14} = -4,2 \cdot 10^{14}$$

$$\Delta t = 6,8 - 0,0 = 6,8 \text{ h} = 6,8 \times 3600 = 2,448 \cdot 10^4 \text{ s}$$

$$A = - \frac{-4,2 \cdot 10^{14}}{2,448 \cdot 10^4} = 171 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Dus de activiteit is $1,7 \cdot 10^{10}$ Bq.



Figuur 12.6

e Uit de formule $A = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}} \cdot N$ volgt dat A en N recht evenredig met elkaar zijn.

Dus als N halveert, dan halveert A ook.

OF

Uit vraag 23b volgt dat de halveringstijd 2,8 h is. Dus na 2,8 h is zowel het aantal radioactieve kernen als de activiteit gehalveerd.

- f De gemiddelde activiteit bereken je met de formule voor de (radio)activiteit.

$$A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

$$\Delta N = 1,45 \cdot 10^{14} - 5,0 \cdot 10^{14} = -3,55 \cdot 10^{14}$$

$$\Delta t = 5,0 - 0,0 = 5,0 \text{ h} = 5,0 \times 3600 = 1,8 \cdot 10^4 \text{ s}$$

$$A_{\text{gem}} = -\frac{-3,55 \cdot 10^{14}}{1,8 \cdot 10^4} = 1,97 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Afgerond: $2,0 \cdot 10^{10}$ Bq.

- g Elke kern die vervalft zendt één alfadeeltje uit. De afname van het aantal radioactieve kernen is $3,55 \cdot 10^{14}$. Er zijn dus $3,55 \cdot 10^{14}$ alfadeeltjes uitgezonden.

Afgerond: $3,6 \cdot 10^{14}$ alfadeeltjes.

Opgave 24

- a In figuur 12.28 van het basisboek lees je af dat na ongeveer een jaar het aantal radioactieve isotopen $1,0 \cdot 10^{19}$ is.

Dit is $\frac{1}{8}$ deel van het oorspronkelijke aantal.

$$\frac{1}{8} = \left(\frac{1}{2}\right)^3. \text{ Dus Y-88 is 3x gehalveerd.}$$

Een jaar = 365 dagen is dus 3x de halveringstijd. Volgens deze berekening is de halveringstijd 122 dagen. Dat komt redelijk overeen met 107 dagen.

- b U-235 vervalft heel langzaam door de lange halveringstijd.

c $A = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}} \cdot N$

De halveringstijd van Cs-137 is kleiner dan die van U-235. Uit de formule volgt dat Cs-137 bij dezelfde waarde van N een hogere activiteit heeft, en dus meer straling uitzendt dan U-235. Y-88 heeft een veel kortere halveringstijd. Y-88 zendt dus in korte tijd veel straling uit, maar daarna is de activiteit vrijwel nul en is er geen gevaar meer.

Opgave 25

- a Het percentage radioactieve isotopen op $t = 59$ dagen bereken je met de formule voor het aantal moederkernen.

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}}$$

$$N_0 = 100 \%$$

$$t = 59 \text{ d}$$

$$t_{\frac{1}{2}} = 8,0 \text{ d} \quad (\text{Zie BINAS tabel 25A})$$

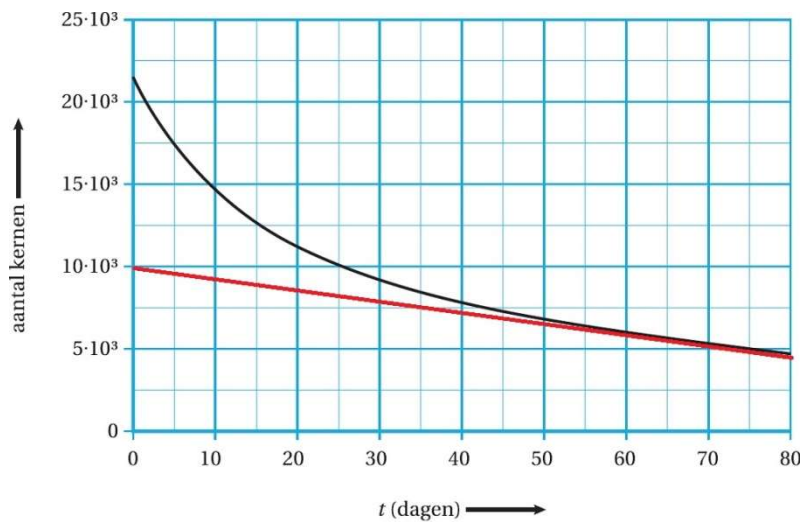
$$N = 100 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{59}{8,0}}$$

$$N = 6,0 \cdot 10^{-1} \%$$

Na 59 dagen is het aantal radioactieve isotopen minder dan 1,0%.

- b De activiteit op een moment volgt uit de raaklijn aan het (N,t) -diagram.

Zie figuur 12.7 hierna.



Figuur 12.7

$$A = -\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_{\text{raaklijn}}$$

$$\Delta N = -4,5 \cdot 10^3 - 10,5 \cdot 10^3 = -6,0 \cdot 10^3$$

$$\Delta t = 80 - 0 = 80 \text{ d} = 80 \times 24 \times 3600 = 6,912 \cdot 10^6 \text{ s}$$

$$A = \frac{-6,0 \cdot 10^3}{6,912 \cdot 10^6} = 8,68 \cdot 10^{-4} \text{ Bq}$$

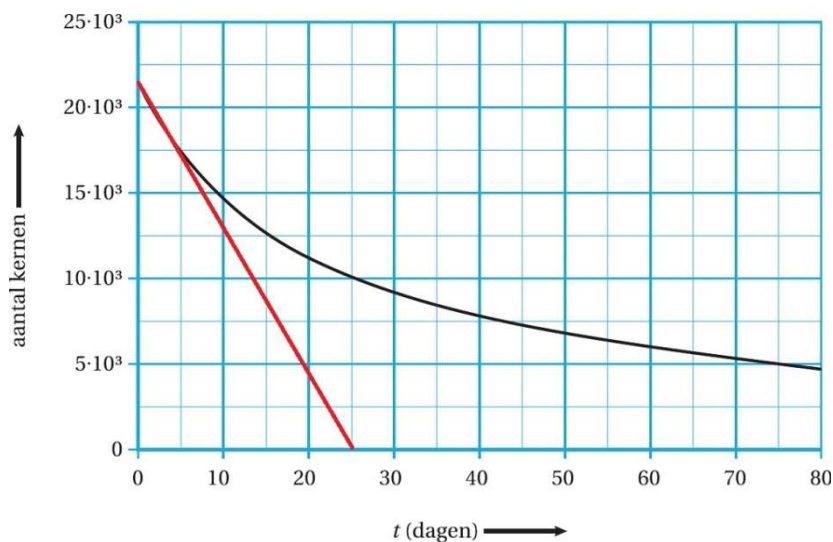
Afgerond: $8,7 \cdot 10^{-4} \text{ Bq}$.

- c De activiteit van I-131 op $t = 0$ bereken je met de totale activiteit en de activiteit van de I-125 op $t = 0$.

De activiteit van I-125 op $t = 0$ bereken je met de formule voor de (radio)activiteit.

De totale activiteit op $t = 0$ volgt uit de raaklijn aan het (N, t) -diagram.

Zie figuur 12.8 hierna.



Figuur 12.8

$$A_{\text{tot}} = -\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_{\text{raaklijn}}$$

$$\Delta N = 0,0 - 21,3 \cdot 10^3 = -21,3 \cdot 10^3$$

$$\Delta t = 25 - 0 = 25 \text{ d} = 25 \times 24 \times 3600 = 2,16 \cdot 10^6 \text{ s}$$

$$A_{\text{tot}} = -\frac{-21,3 \cdot 10^3}{2,16 \cdot 10^6} = 9,86 \cdot 10^{-3} \text{ Bq}$$

$$A_{\text{I-125}} = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}}$$

$A_{\text{I-125}} = 8,7 \cdot 10^{-4} \text{ Bq}$ op $t = 59$ dagen

$t = 59 \text{ d}$

$t_{\frac{1}{2}} = 59 \text{ d}$

$$8,7 \cdot 10^{-4} = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{1,0}$$

$$A_0 = 1,74 \cdot 10^{-3} \text{ Bq}$$

De activiteit van I-131 op $t = 0$ was dus $9,86 \cdot 10^{-3} - 1,74 \cdot 10^{-3} = 8,12 \cdot 10^{-3} \text{ Bq}$
Afgerond: $8,1 \cdot 10^{-3} \text{ Bq}$.

12.5 Risico's van ioniserende straling

Opgave 26

- a Het micaalagje aan de linkerkant laat alle straling door. Dat het linker gedeelte verkleurd is, betekent dat de badge bestraald is geweest. Het karton in het midden laat alleen de bèta- en de gammastraling door. Het linker gedeelte is donkerder dan het rechtergedeelte. Dus de verpleegkundige is blootgesteld geweest aan alfastraling. Het rechter stukje lood laat enkel de gammastraling door. Omdat het midden en het rechterdeel even sterk verkleurd zijn, betekent dit dat de badge niet bestraald is geweest door bètastraling.
- b Het micaalagje aan de linkerkant laat alle soorten straling door. Er valt dan nog steeds gammastraling op het linker gedeelte. Dus de film is niet wit.
- c Het micaalagje aan de linkerkant laat alle straling door. Aan de linkerkant zie je dus de totale activiteit. Het laagje lood laat enkel (een deel van) de gammastraling door. De badge is daar nauwelijks verkleurd. De intensiteit van de gammastraling was dus lager dan de intensiteit van de alfastraling.

Opgave 27

- a ${}_{86}^{222}\text{Rn} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{84}^{218}\text{Po}$
- b De gemiddelde activiteit per m^3 bereken je met de activiteit in de longen en het volume van de longen.
De activiteit in de longen bereken je met het stralingsvermogen en de energie die per vervalreactie vrijkomt.

$$E_{\text{verval}} = 5,486 \text{ MeV} \quad (\text{Zie BINAS tabel 25})$$

$$A_{\text{longen}} = \frac{P_{\text{longen}}}{E_{\text{verval}}}$$

$$E_{\text{verval}} = 5,486 \text{ MeV} = 5,486 \times 1,60217 \cdot 10^{-13} = 8,78950 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$P_{\text{longen}} = 5,3 \cdot 10^{-14} \text{ W.}$$

$$A_{\text{longen}} = \frac{5,3 \cdot 10^{-14}}{8,78950 \cdot 10^{-13}} = 6,03 \cdot 10^{-2}$$

$$A_{\text{gem}} = \frac{A_{\text{longen}}}{V_{\text{longen}}}$$

$$V_{\text{longen}} = 2,5 \text{ dm}^3 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$A_{\text{gem}} = \frac{6,03 \cdot 10^{-2}}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 24,11 \text{ Bq}$$

Afgerond: $A = 24 \text{ Bq}$.

- c De effectieve dosis bereken je met de formule voor dosisequivalent.
De stralingsdosis bereken je met de formule voor de (geabsorbeerde stralings)dosis.
De geabsorbeerde energie bereken je met de formule voor het (geabsorbeerde) vermogen en de tijd.

$$E = P_{\text{longen}} \cdot t$$

$$P_{\text{longen}} = 5,3 \cdot 10^{-14} \text{ W}$$

$$t = 1 \text{ jaar} = 3,15 \cdot 10^7 \text{ s}$$

$$E = 5,3 \cdot 10^{-14} \times 3,15 \cdot 10^7 = 1,6695 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

$$D = \frac{E}{m}$$

$$E = 1,6695 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

$$m = 0,15 \text{ kg}$$

$$D = \frac{1,6695 \cdot 10^{-6}}{0,15} = 1,113 \cdot 10^{-5} \text{ Gy}$$

$$H = w_R \cdot D$$

$$w_R = 20 \quad (\text{Zie BINAS tabel 27D3})$$

$$H = 20 \times 1,113 \cdot 10^{-5} = 2,226 \cdot 10^{-4} \text{ Sv}$$

$$\text{Afgerond: } H = 2,2 \cdot 10^{-4} \text{ Sv.}$$

Opgave 28

- a Een stralingsmeter meet de intensiteit van de straling die een voorwerp uitzendt. Bij besmetting bevindt een radioactieve stof zich op of in je lichaam. Je zendt zelf straling uit en die kun je met een stralingsmeter meten.
Bij bestraling bevindt de bron zich buiten je lichaam. Je weefsel is na bestraling plaatselijk veranderd maar niet radioactief geworden. Een stralingsmeter meet dus niets.
- b Bij besmetting komt een radioactieve stof op of in je lichaam terecht. De speciale kleding zorgt ervoor dat de onderzoeker niet in aanraking komt met die radioactieve stof. De voorzorgsmaatregelen beschermen hem dus tegen besmetting.
- c Alfastraling wordt al tegengehouden door een velletje papier. Voor bètastraling en gamma straling zijn laagjes metaal nodig. Als de speciale kleding hieruit bestaat, dan bieden ze bescherming tegen bestraling.

Opgave 29

- a De totale intensiteit is 1,5 keer zo groot en wordt geleverd door 3 bronnen. Elke bron heeft dus een intensiteit die 0,5 keer zo groot is als de originele bron.
- b De stralingsdosis die gezond weefsel krijgt is dan 0,5 keer zo groot als die bij gebruik van één bron. De kans van beschadiging van gezonde weefsel is dus kleiner.
- c Bij een diepliggende tumor wordt er veel omliggend weefsel bestraald. Deze methode ontziet deels het omliggend weefsel en is dus het meest geschikt voor diepliggende tumoren.

Opgave 30

- a Bij inwendige bestraling wordt een bron zeer dicht bij de tumor in het lichaam geplaatst. De dracht van gammastraling is zeer groot, dus wordt er ook gezond omliggend weefsel bestraald. De dracht van alfa- en bètastraling is klein, dus wordt enkel tumorweefsel bestraald.
- b Alfastraling kun je tegenhouden met papier. Alfastraling kan dus niet door een afgesloten capsule dringen. Er wordt enkel bètastraling gebruikt bij een afgesloten capsule.

Opgave 31

- a Voor de stralingsdosis geldt $H = w_R \cdot D$. Voor röntgenstraling geldt $w_R = 1$. De stralingsdosis is dus gelijk aan de effectieve dosis.
- b Het aantal röntgenfotonen bereken je met totale energie en de energie per foton. De totale energie bereken je met behulp van het percentage geabsorbeerde fotonen. De hoeveelheid geabsorbeerde energie bereken je met de formule voor (geabsorbeerde stralings)dosis.

$$H = 7,2 \text{ } \mu\text{Sv} = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ Sv}$$

$$\text{Dus } D = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ Gy}$$

$$D = \frac{E}{m}$$

$$m = 17 \text{ kg}$$

$$7,2 \cdot 10^{-6} = \frac{E}{17}$$

$$E = 1,224 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

Dit is 60% van de totale energie van de röntgenfotonen.

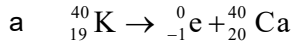
$$\text{De totale energie van de röntgenfotonen is dus gelijk aan } \frac{1,224 \cdot 10^{-4}}{0,60} = 2,04 \cdot 10^{-4} \text{ J.}$$

$$\text{De energie van een foton } 12 \text{ keV} = 12 \cdot 10^3 \times 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,922 \cdot 10^{-15} \text{ J.}$$

Er vielen dus $\frac{2,04 \cdot 10^{-4}}{1,922 \cdot 10^{-15}} = 1,061 \cdot 10^{11}$ röntgenfotonen op de patiënt.

Afgerond: $1,1 \cdot 10^{11}$.

Opgave 32



b K-40 heeft een halveringstijd van 1,28 miljard jaar.

In de tijd dat je een banaan kunt laten liggen neemt de activiteit nauwelijks af.

c Het aantal bananen bereken je met de stralingsnormen en het aantal mSv per banaan.

Het aantal mSv per banaan bereken je met de effectieve dosis en de activiteit van een banaan.

De activiteit van een banaan bereken je met het aantal gram kalium in een banaan en de activiteit van een gram kalium.

Een banaan bevat 0,50 g kalium en de activiteit is 31 Bq per gram kalium.

Een banaan heeft dus een activiteit van 15,5 Bq.

De effectieve dosis van een banaan is dus $15,5 \times 6,2 = 96$ nSv.

Volgens tabel 27d2 is de norm 1 mSv per jaar.

Er zijn $\frac{1 \cdot 10^{-3}}{96 \cdot 10^{-9}} = 1,041 \cdot 10^4$ bananen in een jaar.

Dat is $\frac{1,041 \cdot 10^4}{365} = 28,5$ per dag

Dus 29 bananen per dag.

d De jaarlijkse effectieve dosis bereken je met de formule voor de effectieve dosis.

De stralingsdosis bereken met de formule voor de stralingsdosis.

De geabsorbeerde energie per jaar bereken je met de geabsorbeerde energie per seconde en de tijd van een jaar uitgedrukt in seconden.

De geabsorbeerde energie per seconde bereken je met de activiteit en de energie van een elektron.

$$E = A \cdot E_{\text{elektron}}$$

$$A = 5,4 \text{ kBq} = 5,4 \cdot 10^3 \text{ Bq}$$

$$E_{\text{elektron}} = 7,1 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

$$E = 5,4 \cdot 10^3 \times 7,1 \cdot 10^{-14} \text{ J s}^{-1}$$

$$E = 3,83 \cdot 10^{-10} \text{ J s}^{-1}$$

Dus in een jaar is de geabsorbeerde energie $3,83 \cdot 10^{-10} \times 3,15 \cdot 10^7 = 1,207 \cdot 10^{-2} \text{ J}$.

$$D = \frac{E}{m}$$

$$m = 70 \text{ kg}$$

$$D = \frac{1,20710^{-2}}{70}$$

$$D = 1,72410^{-4} \text{ Gy per jaar}$$

$$H = W_R \cdot D$$

$$W_R = 1 \quad (\text{Zie BINAS tabel 27D3})$$

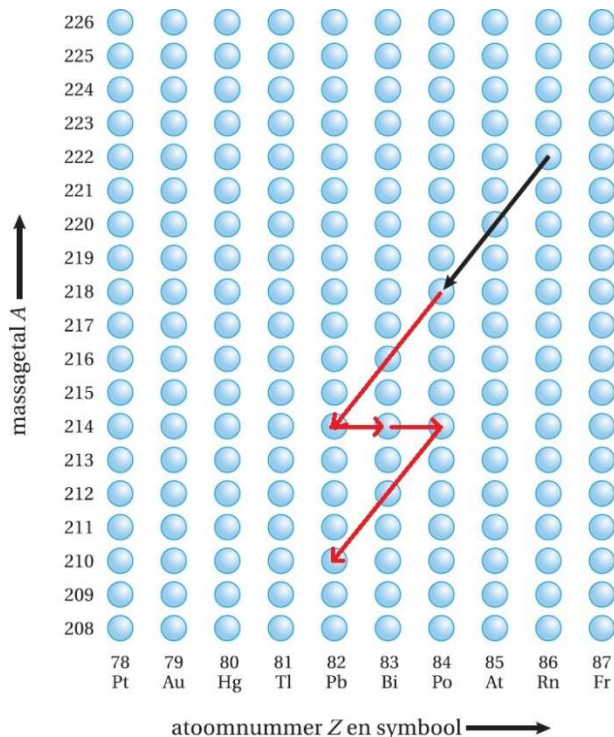
$$H = 1,724 \cdot 10^{-4} \text{ Sv}$$

$$\text{Afgerond: } H = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ Sv.}$$

12.6 Afsluiting

Opgave 33

- a Een alfadeeltje is ${}^4_2\text{He}$. Komt er een alfadeeltje vrij, dan neemt dus het atoomnummer met 2 af en het massagetal neemt met 4 af. Dit komt overeen met figuur 12.35 in het basisboek.
- b Bij bètaverval verandert in de kern een neutron in een proton en een elektron. Het atoomnummer neemt dus met 1 toe en het massagetal blijft gelijk. In figuur 12.9 hieronder zie je de vervalreeks weergegeven. De isotoop die ontstaat is lood-210.



Figuur 12.9

- c De activiteit is 65 Bq per liter lucht. De longen bevatten 6,0 liter lucht. De totale activiteit van de lucht in de longen is dus gelijk aan $65 \times 6,0 = 390$ Bq. De activiteit is het aantal kernen dat elke seconde vervalst. Per vervallen kern absorbeert het longweefsel $3,1 \cdot 10^{-12}$ J. De totale hoeveelheid geabsorbeerde stralingsenergie per seconde is dus gelijk aan $390 \times 3,1 \cdot 10^{-12} = 1,21 \cdot 10^{-9}$ J. Per uur is dat $3600 \times 1,21 \cdot 10^{-9} = 4,4 \cdot 10^{-6}$ J.
- d De equivalente dosis bereken je met de formule voor de dosisequivalent. De stralingsdosis bereken je met de formule voor de (geabsorbeerde stralings)dosis. De geabsorbeerde stralingsenergie bereken je met de tijd en het antwoord van vraag c.

$$E = 32 \times 4,4 \cdot 10^{-6} = 1,408 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

$$D = \frac{E}{m}$$

$$m = 9,5 \cdot 10^2 \text{ g} = 0,95 \text{ kg}$$

$$D = \frac{1,408 \cdot 10^{-4}}{0,95} = 1,482 \cdot 10^{-4} \text{ Gy}$$

$$H = w_R \cdot D$$

$$w_R = 20$$

$$H = 20 \times 1,482 \cdot 10^{-4} = 2,964 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}$$

Afgerond: $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}$.

- e Een stralingsniveau van 1,0 WL is $2,0 \cdot 10^{-9} \text{ curie m}^{-3}$.
Volgens BINAS tabel 5 is de eenheid curie gelijk aan $3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.
Een stralingsniveau van 1,0 WL is dus gelijk aan $2,0 \cdot 10^{-9} \times 3,7 \cdot 10^{10} = 74 \text{ Bq m}^{-3}$.
Het stralingsniveau in de mijn is gelijk aan $65 \text{ Bq L}^{-1} = 65 \cdot 10^3 \text{ Bq m}^{-3}$.

$$\text{Het stralingsniveau in de mijn is dus gelijk aan } \frac{65 \cdot 10^3}{74} = 8,783 \cdot 10^2 \text{ WL}$$

Afgerond: $8,8 \cdot 10^2 \text{ WL}$.

Opgave 34

- a De halveringstijd van C-14 is 5730 jaar. Dit is te lang, dan is er na 5 jaar nog geen meetbare verandering in activiteit.
De halveringstijd van O-15 is 122 seconde. Dit is te kort, na 5 jaar is er geen activiteit meer.
De halveringstijd van H-3 is 12,3 jaar. Dit is goed, na 5 jaar is er meetbaar verschil.
- b De dracht bereken je met de gegeven formule.
De waarde van $\rho \cdot R$ volgt uit figuur 12.37 van het basisboek en de energie van de β -straling van H-3.
De dichtheid van glas zoek je op in BINAS.

Volgens BINAS tabel 10A geldt: $\rho_{\text{glas}} = 2,5 \text{ g cm}^{-3}$ of hoger.

Volgens BINAS tabel 25A is de energie van de β -straling van H-3 gelijk aan 0,018 MeV.

Af lezen in figuur 12.37 van het basisboek geeft $\rho \cdot R = 4 \cdot 10^{-4} \text{ g cm}^{-2}$.

Dus geldt voor de maximale waarde van de dracht:

$$2,5 \cdot R = 4 \cdot 10^{-4}$$

$$R = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

(Dit is veel minder dan de dikte van het glas. Dus komt er geen β -straling door het glas.)

- c ${}_{55}^{137}\text{Cs} \rightarrow {}_{56}^{137}\text{Ba} + {}_{-1}^0\text{e} + {}_0^0\gamma$
- d De golflengte van het γ -foton bereken je met de formule voor de energie van het foton.
De energie van het foton leid je af uit figuur 12.38 van het basisboek.

Uit figuur 12.38 volgt voor de energie van het foton: $E_f = 1,17 - 0,51 = 0,66 \text{ MeV}$

$$E_f = 0,66 \text{ MeV} = 0,66 \times 1,602 \cdot 10^{-19} = 1,057 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$E_f = \frac{h \cdot c}{\lambda} \text{ met } h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js en } c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

$$1,057 \cdot 10^{-13} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \times 2,9979 \cdot 10^8}{\lambda}$$

$$\lambda = 1,879 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

Afgerond: $1,9 \cdot 10^{-12} \text{ m}$.

- e Uit figuur 12.39 van het basisboek volgt dat een fles wijn uit 1960 in 2000 een activiteit had van 390 mBq L^{-1} .
Halverwege 2018 is dus 18,5 jaar later.
De halfwaardetijd van Cs-137 bedraagt 30 jaar.
Dus geldt voor de activiteit van de wijn halverwege 2018:

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \text{ met } n = \frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}$$

$$n = \frac{18,5}{30} = 0,616$$

$$A = 390 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{0,616} = 2,54 \cdot 10^2 \text{ mBq L}^{-1}$$

De fles heeft een volume van $75 \text{ cL} = 0,75 \text{ L}$.

Dus de activiteit is $0,75 \times 2,54 = 1,90 \cdot 10^2 \text{ mBq}$.

Afgerond: $1,9 \cdot 10^2 \text{ mBq}$.

- f In meerdere jaren is omgerekende activiteit per liter gelijk aan 50 mBq L^{-1} .