

10 Kernfysica

havo

10.1 Het verval van atoomkernen

- 1*** Een atoom is opgebouwd uit deeltjes.
- a** Uit welke deeltjes bestaat de atoomkern.
 - b** Welke deeltjes bevinden zich in schillen om de atoomkern.
- 2***
- a** Hoeveel protonen, neutronen en elektronen zijn er aanwezig in ${}^7\text{Li}$?
 - b** Hoeveel protonen, neutronen en elektronen zijn er aanwezig in ${}^{40}\text{Ar}$?
 - c** Hoeveel protonen, neutronen en elektronen zijn er aanwezig in ${}^{238}\text{U}$?
- 3*** De atoomkern van het radioactieve element plutonium (Pu) bevat veel kerndeeltjes.
- a** Bereken de lading van een Pu kern. [HINT zoek de lading van een proton op in Binas.](#)
 - b** Leg uit hoeveel elektronen een Pu atoom heeft.
 - c** Bereken het aantal neutronen in een Pu-244 kern.
 - d** Zoek op welk type straling Pu voornamelijk uitzendt.
- 4***
- a** Noem de drie verschillende soorten radioactieve straling.
 - b** Welke soort straling bestaat uit de zwaarste deeltjes?
 - c** Welke soort straling bestaat uit lichtdeeltjes (fotonen)?
 - d** Wat is het verschil tussen β^- -straling en β^+ -straling?
- 5*** Het element zuurstof (O) komt veel voor in de natuur.
- a** Zoek op hoeveel isotopen zuurstof heeft.
 - b** Welke isotopen van zuurstof komen voor op aarde?
 - c** Welke zuurstofisotoop komt het meest voor op aarde?
 - d** Bereken van het ${}^{18}\text{O}$ isotoop het aantal neutronen in de kern.
 - e** Geef het symbool van dit isotoop in drie verschillende notaties.
 - f** Geef de reactievergelijking van het verval van het ${}^{15}\text{O}$ isotoop.
 - g** Geef de reactievergelijking van het verval van het ${}^{19}\text{O}$ isotoop.

6* Vul de tabel in. [werkboek](#)

atoom	aantal protonen	massagetal	aantal neutronen
lithium Li	3	7	4
natrium Na		23	
cobalt Co			32
goud Au			118
	26	56	
	42	99	
	82	208	
uranium U			146
plutonium Pu		244	

7* Geef het aantal protonen en noteer de isotoop in de juiste notatie. [werkboek](#)

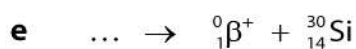
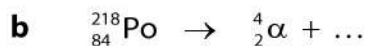
atoom	aantal protonen	aantal neutronen	notatie 1	notatie 2
helium He	2	1	${}^3_2\text{He}$	He-3
koolstof C		8		
zuurstof O		10		
silicium Si		16		
kalium K		22		
ijzer Fe		33		
zilver Ag		63		
kwik Hg		123		
lood Pb		132		

- 8**** In een bepaalde atoomkern zitten 30 protonen en 40 neutronen.
- Leg uit tot welk element dit atoom behoort.
 - Zoek het aantal isotopen van dit element op.
 - Zoek op welke isotopen van dit element radioactief zijn.
 - Zoek op welke isotoop van dit element β^- straling uitzendt.
 - Leg uit hoe je door de uitgezonden straling te meten te weten kunt komen of je met Zn-65 of met Zn-69 te maken hebt.
 - Zoek op welke isotopen van dit element γ -straling uitzenden.

- 9**** Het element neptunium heeft twee isotopen, die beide radioactief zijn.
- Zoek van ieder isotoop op welke straling hij uitzendt.
 - Stel voor het verval van beide isotopen de reactievergelijking op.

- 10**** ^{114}In (indium-114) kan zowel β^- -straling als β^+ -straling uitzenden. Eén enkel ^{114}In atoom zendt een β^- deeltje of een β^+ deeltje uit, maar nooit beide tegelijkertijd.
- Geef de reactievergelijking bij het uitzenden van een β^- deeltje.
 - Geef de reactievergelijking bij het uitzenden van een β^+ deeltje.

- 11***** Maak de reactievergelijkingen compleet.



- 12***** Het element chloor heeft twee stabiele isotopen. Chloorgas bestaat uit Cl_2 moleculen.
- Bereken hoeveel verschillende soorten Cl_2 moleculen er bestaan.
 - Bereken de molecuulmassa's van deze verschillende moleculen uitgedrukt in u.

Door met een hoge snelheid te centrifugeren kun je de verschillende soorten Cl_2 moleculen van elkaar scheiden.

- Leg dit uit.

- 13****** Het element koper heeft twee stabiele isotopen.
- a** Zoek op in welke verhouding deze stabiele Cu isotopen op aarde voorkomen.
 - b** Bereken de gemiddelde atoommassa van koper. Neem aan dat de massa van een proton en van een neutron gelijk is aan één u.

Het periodiek systeem geeft 63,55 u als atoommassa van koper.

- c** Leg uit of jouw waarde overeenkomt met die in het periodieke systeem.

- 14+** Krypton-81m is de nucleair isomeer van krypton-81 en ontstaat kunstmatig uit een kernreactie.
- a** Leg uit wat een nucleair isomeer is.
 - b** Leg uit dat krypton-81m niet kan ontstaan uit β^- verval.
 - c** Leg uit dat krypton-81m ook niet kan ontstaan uit β^+ verval.
 - d** Geef de vervalvergelijking van krypton-81m.

10.2 De snelheid van radioactief verval

Halveringstijd

1* Het radioactieve element uranium komt op aarde voor.

- a** Bereken het aantal neutronen in een U-238 kern.
- b** Bereken het aantal neutronen in een U-234 kern.

Het U-238 komt op aarde veel meer voor dan het U-234. De halveringstijd geeft aan hoe snel een atoomkern uit elkaar valt.

- c** Vergelijk de halveringstijden van U-238 en U-234 en verklaar hiermee waarom U-234 veel minder voorkomt op aarde.

2* Si-31 en Si-32 zijn beide radioactief.

- a** Zoek de halveringstijden van Si-31 en van Si-32 op in Binas.
- b** Welke van deze isotopen is het stabielst?
- c** Verwacht je dat één van deze isotopen op aarde voorkomt?

3* De halveringstijd van een isotoop is 1 dag. In het begin zijn er 1000 radioactieve kernen

- a** Hoeveel radioactieve kernen zijn er aanwezig na 1 dag?
- b** Hoeveel radioactieve kernen zijn er aanwezig na 2 dagen?
- c** Hoeveel radioactieve kernen zijn er vervallen na 3 dagen?

4** De isotoop P-30 wordt kunstmatig gemaakt. Je maakt $1,0 \cdot 10^9$ P-30 kernen.

- a** Zoek de halveringstijd van P-30 op.
- b** Hoeveel kernen zijn er aanwezig na 20 minuten?
- c** Hoeveel kernen zijn er aanwezig na 40 minuten?
- d** Hoeveel kernen zijn er in 60 minuten vervallen?

5** De isotoop P-33 wordt kunstmatig gemaakt.

- a** Zoek de halveringstijd van P-33 op.
- b** Na hoeveel tijd is de 75% van het gemaakte P-33 vervallen?
- c** Na hoeveel tijd is van het gemaakte P-33 nog 6,25% over?

6** Een archeoloog gebruikt C-14 om de ouderdom van een prehistorische ploeg te bepalen. De hoeveelheid C-14 in de ploeg is een kwart van de hoeveelheid C-14 in vers hout.

- a** Hoe oud is de ploeg?

- 7***** Een patiënt krijgt 8,0 gram ^{131}I (jood-131) toegediend.
- Na hoeveel tijd is 7,0 gram van het toegediende ^{131}I vervallen?
 - Na hoeveel tijd is 93,75% van het toegediende ^{131}I verdwenen?

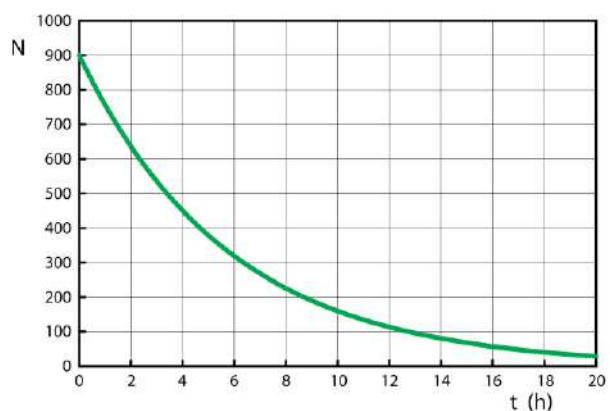
- 8***** Een radioactieve stof wordt kunstmatig gemaakt. Na 24 uur heb je nog maar 12,5% van de oorspronkelijke hoeveelheid over.
- Bereken de halveringstijd van deze stof.
 - Bereken hoeveel procent van deze stof is vervallen na 16 uur.
 - Bereken hoeveel procent van deze stof is vervallen na 48 uur.

- 9***** In 1986 ontplofte in Tsjernobyl een kernreactor waarbij radioactieve stoffen in de atmosfeer kwamen. Een groot gebied werd radioactief besmet met onder andere Cs-137 (cesium-137).

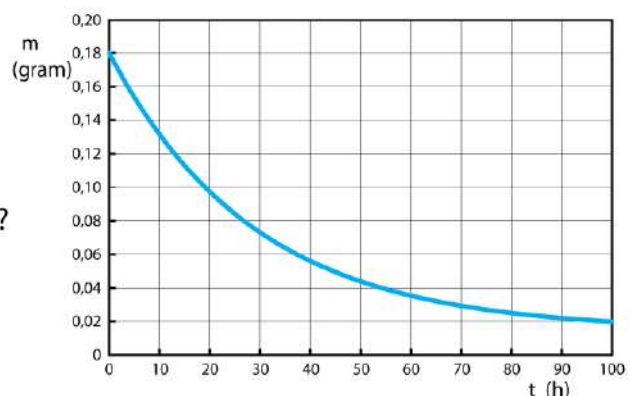


- Welke straling zendt deze isotoop uit?
- Hoeveel procent van de oorspronkelijke hoeveelheid Cs-137 is er nog aanwezig na 150 jaar.
- Hoeveel procent van de oorspronkelijke hoeveelheid Cs-137 is er nog aanwezig na 300 jaar.
- In welk jaar het aantal aanwezige Cs-137 kernen afgenomen tot 1,5625% van de oorspronkelijke hoeveelheid?

- 10**** De figuur is het (N-t)-diagram van een radioactief isotoop.
- Hoe groot de halveringstijd?
 - Hoeveel kernen zijn er na 24 uur aanwezig?
 - Hoeveel kernen zijn er na 24 h vervallen?



- 11**** In figuur zie je hoe de massa van een radioactief isotoop afneemt in de tijd.
- Hoe groot is de halveringstijd?
 - Na hoeveel tijd is er 3,125% van de oorspronkelijke hoeveelheid aanwezig?
 - Hoeveel gram is er in deze tijd vervallen?



Activiteit

- 12***
- a** Leg met eigen woorden uit wat met de activiteit is.
 - b** Wat is het symbool van de grootheid activiteit?
 - c** Wat is de eenheid van de activiteit en wat is het symbool hiervan?

De halveringstijd van een isotoop is 1 dag.

- d** Hoeveel procent van de activiteit is er nog aanwezig na 1 dag.
- e** Hoeveel procent van de activiteit is er nog aanwezig na 2 dagen.
- f** Hoeveel procent van de activiteit stof is er nog aanwezig na 3 dagen.

- 13*** De atoombom die op Nagasaki is gegooid (Fat Man) bevatte 7 kg plutonium-239 (^{239}Pu). Omdat bij de explosie niet al het plutonium is omgezet is het ^{239}Pu in een groot gebied om Nagasaki terecht gekomen.
- a** Wordt de activiteit van het ^{239}Pu in een mensenleven merkbaar kleiner?
 - b** Hoelang zal het nog duren voordat de helft van het ^{239}Pu is verdwenen?



- 14**** Een brokje radioactieve stof zendt 1600 α -deeltjes per minuut uit.
- a** Hoe groot is de activiteit van dit brokje stof?

8,0 uur later zendt het brokje nog maar 100 α -deeltjes per minuut uit.

- b** Hoe groot de halveringstijd van deze stof?

- 15**** Na 258 dagen is de activiteit van een preparaat gedaald tot 12,5%.
- a** Bereken de halveringstijd.

- 16**** De activiteit van ^{14}C in de schedel van een Neanderthaler is 512 keer zo klein als bij een levend mens.
- a** Hoelang geleden leefde deze Neanderthaler?



- 17***** Van 40 gram radioactieve stof blijkt de activiteit in 6,0 uur te zijn teruggelopen tot een kwart van de oorspronkelijke hoeveelheid.
- a** Hoeveel gram van deze stof is er in 6 uur vervallen?
 - b** Bereken de halveringstijd van deze isotoop.

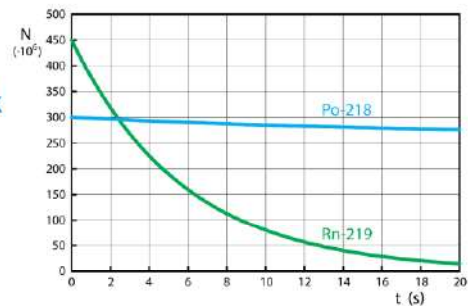
In plaats van 40 gram nemen we nu 120 gram van deze stof.

- c** Bereken de hoeveel van deze stof aanwezig is na 6 uur.
- d** Bereken hoeveel van deze stof aanwezig is na 24 uur.
- e** Bereken hoeveel van deze stof is vervallen is na 12 uur.

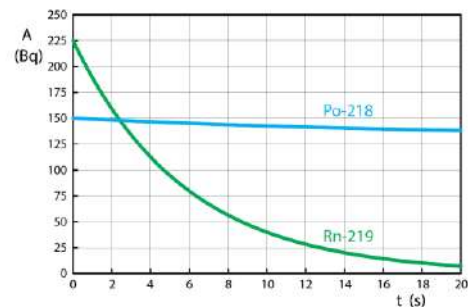
- 18**** 1 gram radioactief ^{131}I (jood-131) heeft een activiteit van $4,6 \cdot 10^{15}$ Bq.
- Leg uit of de halveringstijd van 2 gram ^{131}I groter, kleiner of gelijk is aan die van 1 gram ^{131}I .
 - Leg uit of de activiteit van 2 gram ^{131}I groter, kleiner of gelijk is aan de activiteit van 1,0 gram ^{131}I .

- 19***** De snelheid van het verval ^{82}Br (broom-82) en ^{65}Ni (nikkel-65) gaan we vergelijken. In het begin hebben beide stoffen evenveel atomen.
- Zoek de halveringstijden van ^{82}Br en ^{65}Ni op.
 - Leg uit welk isotoop de grootste stabiliteit heeft.
 - Leg uit welk isotoop de grootste activiteit heeft op $t=0$.
 - Verklaar waarom de activiteit van beide stoffen afneemt in de tijd.
 - Leg uit bij welk isotoop de afname het snelst verloopt.

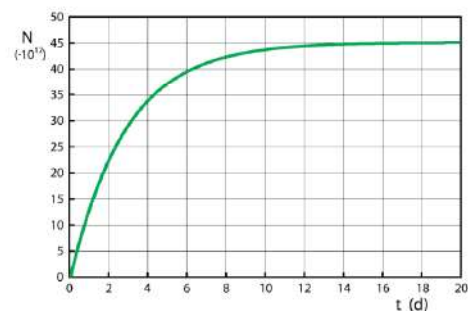
- 20***** De figuur is het (N, t) -diagram van het verval van Rn-219 (radon) en van Po-218 (polonium).
- Bepaal de activiteit van Rn-219 op $t = 8,0$ s. [werkboek](#)
 - Bepaal de gemiddelde activiteit van Rn-219 tussen $t = 0$ en $t = 16$ s. [werkboek](#)
 - Bepaal de activiteit van Po-218 op $t = 8,0$ s. [wb](#)
 - Bepaal de gemiddelde activiteit van Po-218 tussen $t = 0$ en $t = 20$ s. [werkboek](#)



- 21***** De figuur is het (A, t) -diagram van het verval van Po-218 (polonium) en Rn-219.
- Bepaal het aantal vervallen Rn-219 kernen op $t = 10$ s. [werkboek](#)
 - Bepaal het aantal vervallen Po-218 kernen op $t = 10$ s. [werkboek](#)



- 22***** In de figuur zie je het aantal vervallen kernen van een radioactief isotoop.
- Schets het (N, t) -diagram van dit verval. [werkboek](#)
 - Bepaal de halveringstijd. [werkboek](#)
 - Leg uit of de activiteit toeneemt, afneemt of gelijk blijft.
 - Bepaal de gemiddelde activiteit tussen $t = 0$ en $t = 2,0$ d. [werkboek](#)
 - Bepaal de gemiddelde activiteit tussen $t = 0$ en $t = 20$ d. [werkboek](#)



Bij de opgaven **23 t/m 25** moet je het inzicht hebben dat de activiteit recht evenredig is met het aantal aanwezige radioactieve kernen en omgekeerd evenredig met de halveringstijd in seconde. De formule waarmee je de activiteit (A) kunt uitrekenen als je het aantal aanwezige kernen (N) weet of andersom is:

$$A = \frac{0,693}{t_{1/2}} \cdot N \quad t_{1/2} \text{ moet in seconde}$$

- 23***** Stof A heeft grote halveringstijd een stof B heeft een kleine halveringstijd. Isabel beweert dat je hieruit mag concluderen dat stof A een grotere activiteit heeft dan stof B. Leonardo beweert dat je moet concluderen dat stof A een kleinere activiteit heeft dan stof B.

a Wie van hen heeft gelijk? Isabel, Leonardo of geen van beiden?

Jasmijn beweert dat je ook het gewicht van de stoffen A en B moet weten om conclusies te kunnen trekken.

b Heeft Jasmijn gelijk?

- 24***** Eén gram ^{131}I (jood-131) bevat $4,60 \cdot 10^{21}$ atomen.

a Bereken de activiteit van 1,0 gram ^{131}I . gebruik $A = (0,693 / t_{1/2}) \cdot N$

b Bereken de activiteit van 5,0 gram ^{131}I .

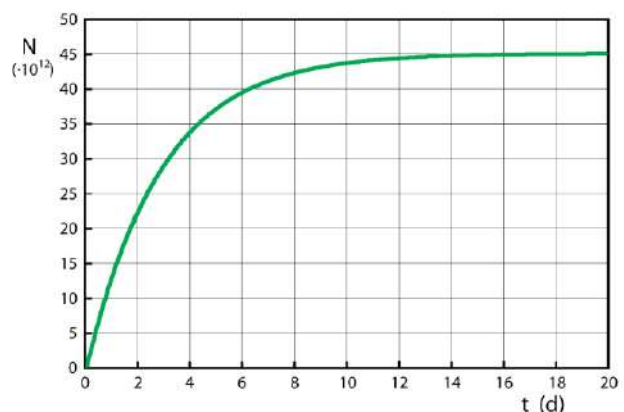
c Bereken na hoeveel tijd er nog 1/64 deel van de activiteit over is.

d Bereken na hoeveel tijd 87,5% van het ^{131}I is vervallen.

- 25***** In de figuur zie je het aantal vervallen kernen van een radioactief isotoop.

a Bepaal de activiteit op $t = 5,0$ d.

gebruik $A = (0,693 / t_{1/2}) \cdot N$



10.3 Ioniserende straling

- 1***
- a** Leg uit wat met de dracht van een deeltje wordt bedoeld.
 - b** Leg uit wat met het ioniserend vermogen wordt bedoeld.
- 2****
- De dracht (indringdiepte) van α - en β -deeltjes hangt af van de energie van het deeltje.
- a** Leg uit waarom dit het geval is.
- Alfadeeltjes hebben een kleiner dracht (indringdiepte) dan bètadeeltjes.
- b** Leg uit waarom dit het geval is.
- Als de dracht klein is dan is het ioniserend vermogen groot.
- c** Leg uit waarom dit het geval is.
- De dracht (indringdiepte) van α - en β -deeltjes hangt af van de dichtheid van een stof.
- d** Leg uit waarom dit het geval is.
- Het doordringend vermogen van γ -fotonen is veel groter dan van α - en β -deeltjes.
- e** Leg uit waarom dit het geval is.
- 3****
- Om een lek in een pijpleiding op te sporen wordt aan de vloeistof in de pijp een radioactieve stof toegevoegd.
- a** Leg uit of je hiervoor het beste een α -straler een β -straler of een γ -straler kunt gebruiken.
 - b** Als je kunt kiezen tussen het toevoegen van ^{131}I (jood-131) en ^{32}Si (silicium-32) welke van deze kun je dan het beste gebruiken?

- 4*****
- Vroeger zat in een rookmelder ^{241}Am (americium-241). Nu is dat verboden en werkt een rookmelder met een lichtsensor.
- a** Geef de vervalreactie van Am-241.
 - b** Leg uit of de activiteit van Am-241 na 20 jaar veel is veranderd.

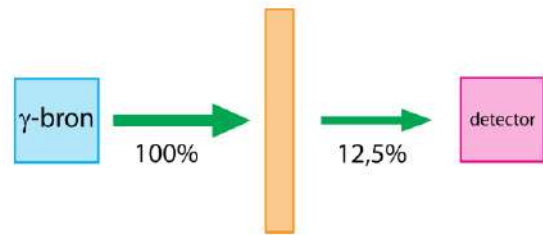


Bij het verval van Am-241 ontstaat een radioactieve stof. Na een bepaalde tijd is de helft van het Am-241 vervallen. Van beide stoffen zijn dan evenveel kernen aanwezig.

- c** Leg uit of de ontstane stof dan meer of minder activiteit heeft dan het aanwezige Am-241. **gebruik $A = (0,693 / t_{1/2}) \cdot N$**
- d** Kan de uitgezonden α -straling normaal gesproken buiten het plastic doosje van de rookmelder komen?
- e** Leg uit waarom rookmelders met radioactief americium gevaarlijk kan zijn voor bewoners en hulpdiensten als er brand uitbreekt.

Halveringsdikte

- 5**** Van een bepaalde stof is de halveringsdikte 5,0 mm. Een plaatje van deze stof staat voor een γ -bron. Achter het plaatje staat een detector.

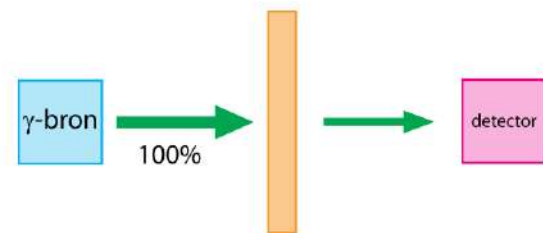


- a** Hoe dik is het plaatje als 12,5% van de straling in de detector komt?

Je wilt dat minder dan 1% van de γ -straling door het plaatje gaat en in de detector komt.

- b** Hoe dik moet je het plaatje maken? Rond af op een heel aantal keer de halveringsdikte.

- 6**** Van een bepaalde stof is de halveringsdikte 2,0 cm. Een plaatje van deze stof staat voor een γ -bron. Achter het plaatje staat een detector.



Van de uitgezonden straling komt 6,25% in de detector.

- a** Hoe dik is het plaatje?

Een plaatje met een andere dikte houdt 87,5% van de straling tegen.

- b** Hoe dik is dit plaatje?

Bij een plaatje met weer een andere dikte komt maar 0,1953% van de uitgezonden straling in de detector.

- c** Hoe dik is dit plaatje?

- 7***** Van een bepaalde stof is de halveringsdikte 1,5 cm. Twee plaatjes van deze stof staan voor een γ -bron. Achter het plaatje staat een detector.



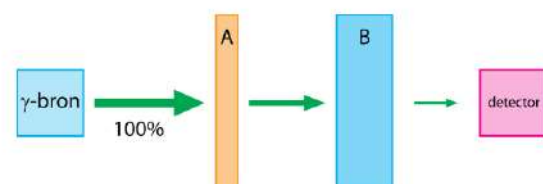
Na het eerste plaatje is nog 25% van de straling aanwezig.

- a** Bereken de dikte van het eerste plaatje.

Na het tweede plaatje is nog 6,25% van de straling aanwezig.

- b** Bereken de dikte van het tweede plaatje.

- 8***** Een plaatje van stof A en een plaatje van stof B staan voor een γ -bron. Stof A heeft een halveringsdikte van 2,0 mm. Stof B heeft een halveringsdikte van 5,0 mm.



Plaatje A heeft een dikte van 2,0 mm en plaatje B heeft een dikte van 10 mm.

a Hoeveel procent van de straling komt er in de detector?

Bij een ander experiment heeft plaatje A een dikte van 8,0 mm en plaatje B een dikte van 15 mm.

b Hoeveel procent van de straling komt er nu in de detector?

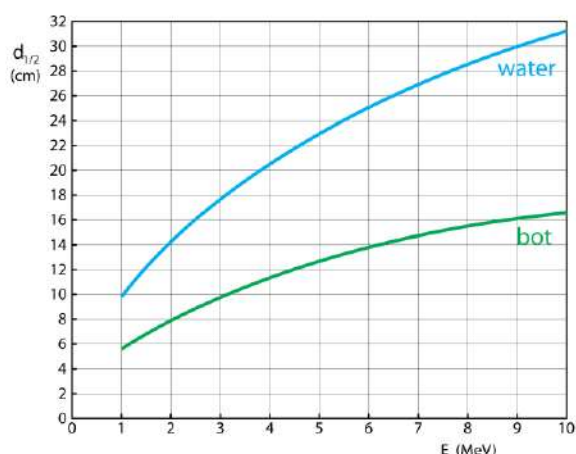
9*** Bij het maken van röntgenfoto's moeten medewerkers van de afdeling radiologie in een ziekenhuis beschermd worden tegen röntgenstraling. Ter bescherming is een kledingstuk ontwikkeld waarin lood is verwerkt, het zogenaamde loodschort. In het schort is een hoeveelheid lood verwerkt die overeenkomt met een dikte van 0,053 cm.

De röntgenstraling waarmee wordt gewerkt, heeft een energie van 0,10 MeV.

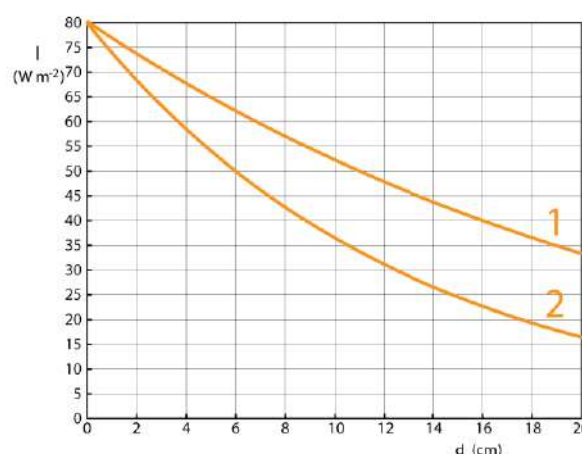
a Bereken hoeveel procent van de straling door het loodschort wordt tegengehouden.



10*** Bij een medische behandeling wordt een patiënt bestraald met γ -deeltjes. In figuur 1 zie je hoe de halveringsdikte bij water en bij bot afhangt van de energie. De halveringsdikte voor zacht weefsel (spieren en vet) is gelijk aan de halveringsdikte van water. In figuur 2 zie je hoe de intensiteit van de γ -straling afneemt bij toename van de indringdiepte d .



Figuur 1



Figuur 2

a Leg uit welke grafiek in figuur 2 bij weefsel hoort en welke bij bot.

b Bepaal met behulp van de figuren 1 en 2 de energie van de gebruikte γ -deeltjes.

Een tumor bevindt zich 10 cm onder de huid en moet worden bestraald met 126 W m^{-2} . Tussen de huid en de tumor zit geen bot.

c Bepaal de intensiteit van de γ -straling waarmee de patiënt moet worden bestraald om bij de tumor de gewenste intensiteit te krijgen.

11 **** Een radioactieve bron zendt γ -straling uit met een activiteit van 1000 Bq. De bron wordt bewaard in een ijzeren kluis waarvan de wanden 10 cm dik zijn. Per seconde gaan er 62,5 γ -deeltjes door de wanden van de kluis. In de figuur zie je hoe bij verschillende stoffen de halveringsdikte afhangt van de energie van de γ -deeltjes.

De radioactieve bron wordt overgeplaatst naar een kluis van beton. De betonnen kluis biedt dezelfde bescherming als de ijzeren kluis.

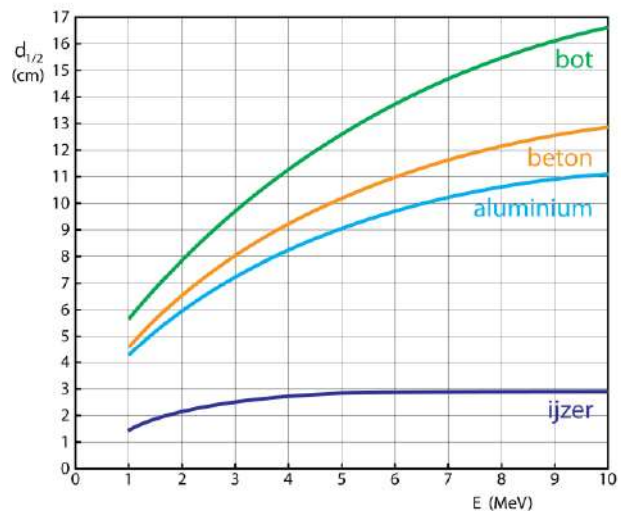
a Bepaal hoe dik de wanden van de betonnen kluis zijn.

In de betonnen kluis wordt ook een tweede radioactieve bron bewaard die γ -deeltjes met 6,0 MeV energie uitzendt. De activiteit van deze tweede bron is ook 1000 Bq.

b Leg uit of van de tweede bron er per seconde meer of minder γ -deeltjes door de wanden van de kluis gaan dan van de eerste bron.

Er mogen maximaal 200 γ -deeltjes per seconde door de wanden van de kluis gaan.

+ **c** Controleer met een berekening of aan deze eis is voldaan.



10.4 Detectie van straling

1** Een onderhoudsmonteur van een kerncentrale draagt altijd een badge.

a Leg uit waarom dit belangrijk is.

Een onderhoudsmonteur van een kerncentrale neemt niet altijd een geigerteller (GM-teller) mee.

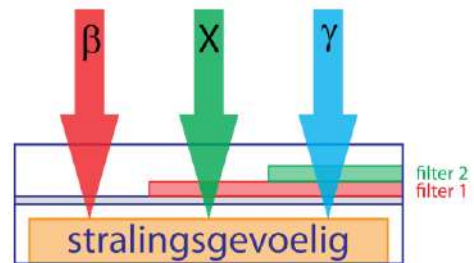
b Leg uit waarom dit niet nodig is.

Er zijn situaties waarbij de onderhoudsmonteur wel een GM-teller meeneemt.

c Noem een voorbeeld van zo'n situatie.

2** Een medewerker van de afdeling radiologie van het ziekenhuis wordt blootgesteld aan ioniserende straling en draagt daarom altijd een badge. Zie figuur.

Het stralingsgevoelige materiaal kleurt donker als het met ioniserende straling in aanraking komt.



a Teken de verkleuring van het stralingsgevoelige materiaal bij blootstelling aan uitsluitend β -straling. [werkboek](#)

b Teken de verkleuring van het stralingsgevoelige materiaal bij blootstelling aan uitsluitend röntgenstraling (X-straling). [werkboek](#)

c Teken de verkleuring van het stralingsgevoelige materiaal bij blootstelling aan β - en γ -straling. [werkboek](#)

3*** Medewerkers op de afdeling radiologie in een ziekenhuis hebben beroepshalve te maken met straling. Om te controleren of ze niet te veel straling ontvangen, dragen zij een badge.

a Leg uit waarom het niet zinvol is om badges te maken die gevoelig zijn voor α -straling.

Om te controleren of badges goed werken, moet je ze van tijd tot tijd bestralen met straling van een bekende stof. Voor de badges die gevoelig zijn voor β -straling kun je een keuze maken uit één van de volgende stoffen: Cs-137, Sr-90 en Po-209.

b Geef de vervalreactie van Cs-137.

c Geef de vervalreactie van Sr-90.

d Geef de vervalreactie van Po-209.

e Leg uit welke van deze drie stoffen je het beste kunt gebruiken om de badges te testen.

10.5 Absorptie van straling door materie

- 1**** Bij ongelukken in een kerncentrale dragen hulpverleners pakken waarin lood is verwerkt. Verder dragen ze ook een gasmasker.
- a** Leg uit waarom er lood in de pakken wordt verwerkt.
 - b** Leg uit waarom ze ook een gasmasker dragen.

Medewerkers van de afdeling radiologie in een ziekenhuis dragen kleding waarin lood is verwerkt, maar ze dragen geen gasmasker.

- c** Leg uit waarom een gasmasker voor hen niet nodig is.



- 2**** Radioactieve straling (ioniserende straling afkomstig uit een radioactieve stof) kan gebruikt worden om tumoren te bestrijden. De straling kan van buiten het lichaam komen, maar de stralende bron kan ook in het lichaam ingebracht worden. Deze inwendige bestraling is zinvol bij een goed gelokaliseerde tumor, zoals borstkanker of prostaatkanker.



Bij inwendige bestraling wordt een radioactief isotoop in afgesloten metalen naaldjes rondom de tumor geplaatst. Zie figuur. Voor inwendige bestralen is alfastraling niet geschikt.

- a** Leg uit waarom dit het geval is.

Voor inwendige bestraling zijn radium-226 (Ra-226) en cobalt-60 (Co-60) geschikt.

- b** Geef de reactievergelijkingen voor het verval van Ra-226 en van Co-60.
- c** Noem de belangrijkste verschillen tussen het gebruik van Ra-226 en Co-60.

- 3**** Een monteur van een kerncentrale wordt blootgesteld aan α -straling en absorbeert per seconde $1,0 \cdot 10^{-7}$ joule stralingsenergie. Zijn massa is 90 kg.
- a** Bereken het dosisequivalent dat de monteur na 1,0 uur werken ontvangt.



De monteur werkt gemiddeld 5 uur per dag 150 dagen per jaar in de centrale.

- b** Bereken het dosisequivalent dat de monteur in één jaar ontvangt.
- c** Hoe groot is de dosislimiet die iemand beroepshalve mag ontvangen? [Zoek op in Binas.](#)
- d** Voldoet de monteur aan deze dosislimiet?

- 4***** Bij het maken van röntgenfoto's moeten medewerkers van de afdeling radiologie in een ziekenhuis beschermd worden tegen röntgenstraling. Ter bescherming is een kledingstuk ontwikkeld waarin lood is verwerkt, het zogenaamde loodschort. De röntgenstraling waarmee wordt gewerkt, heeft een energie van 0,40 MeV.



Een medewerker wordt tijdens zijn werk per ongeluk gedurende 2,5 minuten blootgesteld aan deze straling. Het vermogen van de röntgenstraling is 0,15 microwatt. Van deze straling wordt 70% geabsorbeerd door een spiermassa van 12 kg.

- a** Bereken de stralingsdosis die de spieren ontvangen.
- b** Bereken de activiteit van de stralingsbron.

- 5***** Een medewerker van de afdeling radiologie in een ziekenhuis mag worden blootgesteld aan een dosis van maximaal 5,0 mGy per jaar. De medewerker weegt 65 kg.
- a** Bereken de stralingsenergie die de medewerker per jaar maximaal mag ontvangen.

Als de stralingsbron aan staat ontvangt de medewerker per seconde $1,0 \cdot 10^{-7}$ joule aan stralingsenergie.

- b** Hoeveel uur mag de medewerker per jaar een bestraling uitvoeren?

- 6***** Uit een radioactieve bron komt γ -straling. In één seconde geeft de bron $5,0 \cdot 10^{-9}$ joule aan stralingsenergie. Een man van 60 kg wordt gedurende 15 minuten door deze bron bestraald.

- a** Bereken de stralingsdosis die de man ontvangt.

Uit veiligheidsoverweging gaat hij achter een muur staan die 75% van de γ -straling absorbeert.

- b** Bereken de stralingsdosis die de man nu in een uur ontvangt.

- 7***** Een piloot vliegt gemiddeld 20 uur per week op 11 km hoogte. Tijdens de vlucht ontvangt ze een dosisequivalent van $7,0 \mu\text{Sv}$ per uur. Ze werkt 45 weken per jaar.

- a** Bereken het dosisequivalent dat ze in een jaar ontvangt.

In Nederland mogen mensen boven de 18 die beroepshalve met radioactieve straling werken een dosisequivalent van maximaal 20 mSv per jaar ontvangen.

- b** Bereken hoeveel uur een piloot per werkweek gemiddeld moet vliegen om de stralingsnorm te overschrijden.



- 8***** Om te controleren of schoenen goed passen werd vroeger een apparaat gebruikt waarbij de voeten met röntgenstraling werden bestraald. De verkoper kon de botten van de voeten zien bewegen. Vooral bij het passen van kinderschoenen werden deze apparaten gebruikt. Vanaf 1960 zijn deze apparaten verboden. Zie figuur.



De geabsorbeerde stralingsenergie per seconde van een kindervoet is bij deze machine 1,5 mJ. Een kindervoet heeft een massa van 200 gram.

- a** Bereken de dosis die de kindervoet ontvangt na 20 seconden bestralen.

Vooral de handen van de verkopers liepen gevaar, omdat ze tijdens het passen in de schoenen knepen. De stralingsenergie per minuut op een hand is bij deze machine 0,18 J. Een hand heeft een massa van 300 gram.

- b** Bereken de dosis die de hand van de verkoper ontvangt na 20 seconden bestralen.



Op een dag wordt het apparaat gemiddeld drie keer gedurende 10 seconden gebruikt. De stralingsweegfactor van de gebruikte röntgenstraling is 0,90. De schoenenwinkel is 250 dagen per jaar open.

- c** Bereken de dosisequivalent die de hand van de verkoper in een jaar ontvangt.

- 9***** Door een lekkage in de verpakking komt er radioactieve straling naar buiten. Hierdoor wordt bij een medewerker een deel van de huid gedurende 3,0 minuten blootgesteld aan α -straling. De stralingsweegfactor voor α -straling is 20. Van de aanwezige α -straling wordt 15% geabsorbeerd.

De massa van dit stukje huid is 18 g. De radioactieve α -bron lekt iedere seconde $6,0 \cdot 10^{-8}$ J stralingsenergie.

- a** Bereken de stralingsdosis die de huid ontvangt.
b Bereken het ontvangen dosisequivalent.
c Hoe groot is de dosislímiet die iemand per jaar mag ontvangen? [Zoek op in Binas.](#)
d Ga na of het ontvangen dosisequivalent is toegestaan volgens de Nederlandse wet.

- 10**** Om glaswerk een groene gloed te geven werd vroeger uranium aan glas toegevoegd en onder de naam uraniumglas verkocht.

- a** Word je radioactief besmet als je uit uraniumglas drinkt?
b Word je radioactief bestraald als je uit uraniumglas drinkt?



- 11 ***** Radon is een radioactief gas dat voortdurend uit de aardbodem ontsnapt en ook door bouwmaterialen wordt afgestaan. Doordat de huizen ten behoeve van warmte-isolatie steeds minder worden geventileerd is de hoeveelheid radongas per m³ in de afgelopen jaren in huis toegenomen. We beperken ons tot de aanwezige radon-222 isotoop.

De longen van een mens bevatten gemiddeld 2,5 dm³ lucht. Als je longen gevuld zijn met huiskamerlucht geeft het ingeademde radon-222 iedere seconde $5,3 \cdot 10^{-14}$ J energie af.

- a** Stel de vervalvergelijking van radon-222 op.
- b** Toon aan dat de activiteit van radon-222 van de ingeademde huiskamerlucht per kubieke meter 24 Bq bedraagt.

De bestraalde massa van de longen is 0,15 kg.

- c** Bereken het dosisequivalent dat iemand per jaar door het inademen van radon-222 ontvangt als hij uitsluitend huiskamerlucht inademt.

- 12 ****** In onze spieren bevindt zich kalium dat voor 0,012% uit het radioactieve K-40 bestaat. De massa van al het kalium in de spieren van een volwassene bedraagt gemiddeld 98 g. Kalium bevat $1,54 \cdot 10^{22}$ atomen per gram. Door de opname uit voedsel blijft de hoeveelheid kalium-40 constant.

- a** Stel de vervalvergelijking van K-40 op.

Voor de activiteit geldt: $A = \frac{0,693}{t_{1/2}} \cdot N$

- A is de activiteit (Bq)
- $t_{1/2}$ is de halveringstijd in seconde (s)
- N is het aantal radioactieve kernen

- b** Bereken de activiteit van het kalium-40 in het spierstelsel van een volwassene.

Het spierweefsel neemt 33% van de stralingsenergie op. Een volwassene heeft gemiddeld 30 kg spierweefsel.

- c** Bereken de stralingsdosis die het spierweefsel in een jaar als gevolg van K-40.

10.6 Kernreacties

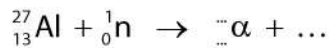
Vervalketen

- 1***** $^{238}_{92}\text{U}$ vervalt spontaan in vier stappen naar $^{230}_{90}\text{Th}$.
- Bij hoeveel van deze stappen wordt er een α -deeltje uitgezonden?
 - Bij hoeveel van deze stappen wordt er een β^- -deeltje uitgezonden?
 - Bij hoeveel van deze stappen wordt er een β^+ -deeltje uitgezonden?
 - Geef de reactievergelijkingen van deze vier reacties.
 - Geef in het (A, Z)-diagram de isotopen aan die betrokken zijn bij deze vervalketen en teken de reactiepijlen. [werkboek](#)
- 2***** Uranium-238 vervalt in een aantal stappen tot lood-206. Bij het verval worden zowel α -deeltjes als β^- -deeltjes uitgezonden.
- Leg uit of de verandering van het massagetal wordt veroorzaakt door het uitzenden van α -deeltjes of door het uitzenden van β^- -deeltjes.
 - Beredeneer bij hoeveel stappen in de vervalreeks er een α -deeltje wordt uitgezonden.
 - Beredeneer bij hoeveel stappen in de vervalreeks er een β^- -deeltje wordt uitgezonden.
- 3***** $^{212}_{83}\text{Bi}$ vervalt in twee stappen naar $^{208}_{82}\text{Pb}$. Bij het verval worden zowel α -deeltjes als β^- -deeltjes uitgezonden.
- Beredeneer bij hoeveel stappen in de vervalreeks een α -deeltje wordt uitgezonden.
 - Beredeneer bij hoeveel stappen in de vervalreeks een β^- -deeltje wordt uitgezonden.
 - Geef de vervalketen waarbij eerst een α -deeltje wordt uitgezonden.
 - Geef de vervalketen waarbij eerst een β^- -deeltje wordt uitgezonden.
 - Geef in het (A, Z)-diagram de isotopen aan die betrokken zijn bij deze vervalketen en teken de pijlen voor beide vervalketens. [werkboek](#)

Gestimuleerde reacties

- 4**** In 1919 heeft Ernest Rutherford een kernreactie veroorzaakt. Hij bombardeerde stikstof atomen (^{14}N -kernen) met α -deeltjes en ontdekte dat daarbij protonen ^1_1H ontstaan. De kernreactie bestaat uit twee stappen. Bij de eerste stap wordt het α -deeltjes opgenomen in de ^{14}N -kern.
- Maak de reactievergelijking van stap 1 kloppend: $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ?$
 - Maak de reactievergelijking van stap 1 + stap 2 compleet.
 $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ? \rightarrow ^1_1\text{H} + ?$

- 5**** Een plaat van aluminium-27 wordt bestraald met neutronen. Eén neutron versmelt met de Al-27 kern die daarna uiteenvalt en een α -deeltje uitzendt.



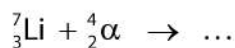
a Maak de reactievergelijking compleet.

Bij deze reactie ontstaat een instabiel isotoop die spontaan uiteenvalt onder uitzending van een β^- -deeltje.

b Geef de reactievergelijking van deze spontane reactie.

c Controleer of het reactieproduct (de dochterkern) een stabiel isotoop is.

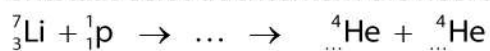
- 6**** Lithium-7 wordt beschoten met α -deeltjes. Eén α -deeltje versmelt met de Li-7 kern.



a Maak de reactievergelijking compleet.

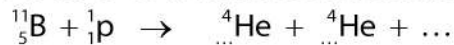
b Controleer of het reactieproduct een stabiel isotoop is.

- 7***** Lithium-7 wordt beschoten met protonen totdat al het lithium is omgezet in He-4. Er ontstaat eerst dochterkern die heel snel uit elkaar valt.



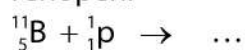
a Maak de reactievergelijking compleet.

Als boor-11 wordt beschoten met protonen ontstaat er uiteindelijk ook helium-4.



b Maak de reactievergelijking compleet.

Behalve de reactie bij vraag b kan het beschieten van boor-11 met protonen ook anders verlopen.



c Maak de reactievergelijking compleet.

Examenvragen havo

Als een havo examenvraag over β^- -straling gaat is dit altijd β^- -straling.

Radongas

Uit de aardkorst en uit bouwmaterialen komt radon-222 (^{222}Rn) vrij. Daardoor komt ieder mens in aanraking met dit radioactieve edelgas radon.

- 3p **1** Geef de vervalreactie van radon-222.

Uranium-238 vervalst via een aantal radioactieve tussenkernen, waaronder radon-222, tot het stabiele lood-206. Daarbij wordt bij elke stap of een α -deeltje of een β^- -deeltje uitgezonden. Wanneer een kern een β^- -deeltje uitzendt, verandert het aantal nucleonen van de kern niet.

- 3p **2** Leg uit hoeveel α -deeltjes er in totaal worden uitgezonden bij het stapsgewijze verval van een uranium-238 kern tot een lood-206 kern.

Iemand heeft gemiddeld 4,0 liter lucht in zijn longen. Die lucht bevat radongas waardoor het longweefsel aan straling bloot staat. Neem aan dat de gemiddelde activiteit van radon-222 gelijk is aan 29 Bq per m^3 lucht. De massa van het bestraalde longweefsel is 200 gram.

- 5p **3** Bereken het dosisequivalent dat de persoon per jaar ontvangt alleen ten gevolge van de straling van radon-222.

Hartfoto's

Tegenwoordig maakt men hartfoto's met een zogenaamde gammacamera. Een gammacamera heeft een film die gevoelig is voor γ -straling. Enige tijd voordat de foto gemaakt wordt, spuit men bij de patiënt een oplossing van kaliumchloride in. Een deel van het kalium bestaat uit de isotoop K-43 dat als tracer dienstdoet. Kalium, dus ook K-43, wordt beter opgenomen door goed werkende hartspieren dan door slecht werkende hartspieren.

In figuur 1 is links een opname te zien van een goed werkende hartspier en rechts een opname van een slecht werkende hartspier.



Figuur 1

In de tabel hieronder staan gegevens van twee isotopen, kalium-43 en thallium-201.

Isotoop	Soort straling en energie		$t_{1/2}$ (uur)
K-43	β^- (830 keV)	γ (619 keV)	22
Tl-201	–	γ (135 keV)	72

Naast γ -straling wordt door de isotoop K-43 ook β^- -straling uitgezonden.

- 3p **1** Geef de vergelijking van dit β^- -verval.

De uitgezonden β^- -straling zorgt voor een extra stralingsbelasting van het hart. We nemen aan dat van deze straling 80% door het hart wordt geabsorbeerd. We gaan er verder van uit dat gedurende twee uur de gemiddelde activiteit van het ingespoten kalium 1,2 MBq is. De massa van het hart bedraagt 280 g.

- 4p **2** Bereken de stralingsdosis die het hart in deze periode van twee uur ontvangt ten gevolge van de β^- -straling.

In een periode van 66 uur na het inspuiten is een bepaald percentage van het isotoop K-43 vervallen.

- 3p **3** Bereken dit percentage.

Voor hartonderzoek gebruikt men tegenwoordig de isotoop Tl-201. Zie bovenstaande tabel. Tl-201 wordt even goed door het hart opgenomen als K-43.

- 4p **4** Noem één voordeel en één nadeel van het gebruik van de Tl-isotoop ten opzichte van de K-isotoop. Geef zowel bij het voordeel als bij het nadeel een toelichting.

Stralingsbescherming (aangepast)

Medewerkers op de afdeling radiologie in een ziekenhuis hebben beroepshalve te maken met straling. Om te controleren of ze niet te veel straling ontvangen, dragen zij een badge op hun kleding. Zie figuur 1.

Een badge registreert de hoeveelheid ontvangen straling. Na een bepaalde periode wordt daaruit de stralingsdosis bepaald die de betreffende persoon in die periode heeft ontvangen.



Figuur 1

Er bestaan afzonderlijke badges voor het detecteren van β -straling, γ -straling en röntgenstraling.

- 2p **1** Leg uit waarom het niet zinvol is om badges te maken die gevoelig zijn voor α -straling.

Om te controleren of badges goed werken, worden ze van tijd tot tijd bestraald met straling van een bekende stof. Voor de badges die gevoelig zijn voor β straling wil men een keuze maken uit één van de volgende stoffen: Cs-137, Sr-90 en Po-209.

- 3p **2** Geef de vervalreactie van Cs-137.

- 2p **3** Leg uit welke van deze drie stoffen het best gebruikt kan worden om de badges te testen.

Bij het maken van röntgenfoto's moeten de medewerkers beschermd worden tegen röntgenstraling. Ter bescherming is een kledingstuk ontwikkeld waarin lood is verwerkt, het zogenaamde loodschort. In het schort is een hoeveelheid lood verwerkt die overeenkomt met een dikte van 0,053 cm. De röntgenstraling waarmee wordt gewerkt, heeft een energie van 0,10 MeV.

- 4p **4** Bereken hoeveel procent van de straling door het loodschort wordt tegengehouden.

Een medewerker wordt tijdens zijn werk per ongeluk gedurende 25 seconden blootgesteld aan deze straling. Het vermogen van de röntgenstraling is 0,15 microwatt. Van deze straling wordt 73% geabsorbeerd door een spiermassa van 12 kg.

- 4p **5** Bereken de stralingsdosis die de spiermassa ontvangt.

Castor container

Het radioactief afval van Duitse kerncentrales wordt in Castor-containers per trein naar de opwerkingsfabriek in La Hague aan de Franse kust afgevoerd. Zie figuur 1. Een Castor-container is een cilindervormig vat met een stalen wand van 50 cm dikte, waarin ongeveer 10 ton (1 ton = 1000 kg) aan afgewerkte splijtstofstaven bewaard kan worden.



Figuur 1

Castor-containers worden luchtdicht afgesloten zodat de hoog-radioactieve inhoud niet naar buiten kan. De wand is niet alleen voor de stevigheid zo dik, maar biedt ook bescherming tegen de straling.

- 3p **1** Geef voor elk van de drie soorten straling (α , β , γ) aan of deze wel of niet bijdraagt aan de stralingsbelasting buiten de Castor-container.

Technisch is het mogelijk om containers met een dunnere wand te maken die toch stevig genoeg zijn. Bovendien zou een container met een wand van 30 cm dikte aanmerkelijk goedkoper zijn dan eentje met een wand van 50 cm. De stralingsbelasting zou dan toenemen. De halveringsdikte van staal is voor de betrokken straling gelijk aan 2,5 cm.

- 3p **2** Bereken met welke factor de stralingsbelasting zou toenemen als een container een wanddikte van 30 cm in plaats van 50 cm zou hebben.

Het transport van Castor-containers gaat meestal per trein. In verband met de veiligheid rijden die treinen slechts 20 tot 30 km/h. Het transport vindt plaats onder politiebewaking. Voor de manier van bewaken moest men kiezen uit twee alternatieven:

- óf een beperkte groep van ongeveer honderd agenten mee laten reizen met de trein, wat betrekkelijk goedkoop is,
- óf een enorme groep van enkele duizenden agenten langs de spoorlijn posteren, wat veel geld kost.

Tabel 27D2 in Binas bevat de stralingsnormen die in de Europese Unie worden toegepast. Politieagenten worden in dit verband gerekend tot de categorie "individuele leden van de bevolking". De stralingsnorm voor de effectieve totale lichaamsdosis is van toepassing.

Agenten die met de trein meereizen, zouden een dosisequivalent oplopen van ongeveer 0,2 mSv per uur.

- 3p **3** Leg uit waarom men niet de goedkopere maar de duurdere manier van bewaken gekozen heeft. Uit je antwoord moet blijken dat je tabel 27D2 van Binas hebt gebruikt.

De splijtstofstaven in de container zijn zeer radioactief. In een bepaalde container bedraagt de activiteit $4,4 \cdot 10^{17}$ Bq. Per vervalreactie komt gemiddeld 0,78 MeV energie vrij. Deze energie wordt vrijwel volledig geabsorbeerd en omgezet in warmte.

- 3p **4** Bereken hoeveel warmte, in joule, per seconde in de container wordt ontwikkeld.

Energie voor verre reizen (aangepast)

In oktober 1997 vertrok de Amerikaanse ruimtesonde Cassini naar de planeet Saturnus om daar onder meer de atmosfeer van één van de manen van Saturnus te onderzoeken. De vlucht ernaartoe duurt bijna zeven jaar. De sonde kreeg een kleine nucleaire generator met een hoeveelheid radioactief materiaal mee. Bij de start bestond dit materiaal uit 33 kg zuiver plutonium-238. In de generator wordt energie die vrijkomt bij het verval van het plutonium omgezet in elektrische energie voor de apparatuur aan boord. Plutonium-238 ontstaat zelf als vervalproduct van een andere radioactieve kern, een zogenaamde β^- -straler.

- 3p **1** Schrijf de vergelijking van deze vervalreactie op.

Plutonium-238 zendt α -straling uit. De halveringstijd van plutonium-238 is 88 jaar. Bij het verval van één plutonium-238-kern komt 5,6 MeV energie vrij. Bij de start heeft het radioactieve materiaal een activiteit van $2,1 \cdot 10^{16}$ Bq. Voor het berekenen van de activiteit van het radioactieve materiaal tijdens de vlucht hoeft geen rekening gehouden te worden met het verval van de dochterkernen.

- 3p **2** Leg uit waarom dit niet hoeft.

Het rendement van de generator is 3,4%.

- 4p **3** Bereken het nuttig vermogen van de generator 8,0 jaar na het begin van de vlucht.

Milieuactivisten zijn tegen het gebruik van plutonium-238 in ruimtesondes. Als het plutonium bij een ongeluk vrijkomt, zou volgens hen een groot deel van de wereldbevolking longkanker kunnen krijgen. Volgens de Amerikaanse ruimtevaartorganisatie NASA zou het extra dosisequivalent (effectieve dosis) voor een volwassene in een periode van 50 jaar na een eventueel ongeluk slechts $1,0 \cdot 10^{-5}$ Sv bedragen. Dit dosisequivalent is gebaseerd op uitsluitend α -verval van plutonium-238, waarbij de α -deeltjes worden opgenomen door longblaasjes met een totale massa van 75 gram.

- 4p **4** Bereken het aantal plutonium-238 atomen dat in een periode van 50 jaar volgens NASA bij de longblaasjes van een volwassene zou zijn vervallen.

Bij kernproeven in het verleden is al een flinke hoeveelheid van een andere plutonium-isotoop, plutonium-239, in de atmosfeer van de aarde terechtgekomen. Er zijn een aantal verschillen tussen plutonium-238 en plutonium-239. In het volgende gedachtenexperiment vergelijken we de stralingsbelasting door deze twee isotopen bij besmetting. Stel dat twee personen ieder evenveel plutoniumatomen binnenkrijgen maar dat de ene persoon alleen met plutonium-238 wordt besmet en de andere alleen met plutonium-239.

- 4p **5** Leg aan de hand van twee verschillen tussen het α -verval van plutonium-238 en plutonium-239 uit welke van deze twee personen de grootste stralingsbelasting ten gevolge van α -straling ondervindt.

Rookmelder

Een rookmelder (zie figuur 1) is een apparaatje dat een alarmsignaal geeft als er rook in komt, bijvoorbeeld bij brand. Een bepaald type rookmelder bevat een kleine hoeveelheid van de radioactieve isotoop americium-241. Het americium zendt bij verval α -straling uit.



Figuur 1

- 3p **1** Geef de vervalvergelijking van americium-241.

Voor de activiteit van een radioactieve stof geldt de volgende formule: $A = \frac{0,693}{t_{1/2}} \cdot N$

- A is de activiteit van de radioactieve stof in Bq
- N is het aantal kernen in de radioactieve stof
- $t_{1/2}$ is de halveringstijd in seconde

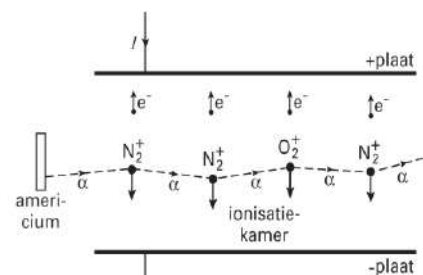
De wettelijk toegestane activiteit van het americium-241 in een rookmelder bedraagt 37 kBq. De massa van een atoom americium-241 is $4,00 \cdot 10^{-25}$ kg.

- 4p **2** Bereken de massa van het americium-241 dat in de rookmelder mag zitten om binnen de wettelijke grens te blijven.

De uitgezonden α -deeltjes hebben elk een energie van 5,6 MeV.

- 4p **3** Bereken de snelheid van zo'n α -deeltje.

In de rookmelder bevindt zich een ionisatiekamer. Dat is de ruimte tussen de twee platen in figuur 2. Deze ruimte staat in open verbinding met de omgeving. In figuur 2 is ook te zien dat het americium voor een opening in de ionisatiekamer is aangebracht.

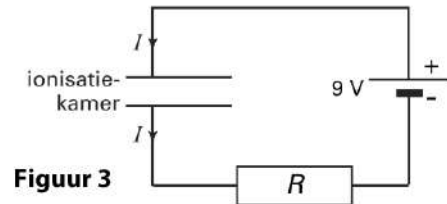


Figuur 2

- 2p **4** Noem twee oorzaken waarom niet alle α -deeltjes in de ionisatiekamer terechtkomen.

Een α -deeltje dat in de ionisatiekamer terechtkomt, botst een flink aantal keren tegen de zuurstof- en stikstof-moleculen van de lucht. Bij elke botsing vindt een ionisatie plaats. Daarbij wordt uit een molecuul een elektron (e^-) losgemaakt en blijft een positief ion (N_2^+ of O_2^+) over. Zie nogmaals figuur 2.

Omdat de positieve ionen naar de negatieve plaat ($-$) worden getrokken en de elektronen naar de positieve plaat ($+$), loopt er een kleine elektrische stroom door de schakeling waarin de ionisatiekamer is opgenomen. Zie figuur 3.



Figuur 3

Voor de ionisatie van één molecuul is gemiddeld 34 eV nodig. Je mag aannemen dat de α -deeltjes hun energie van 5,6 MeV in zijn geheel door ionisaties binnen de ionisatiekamer verliezen en dat alle vrijgekomen elektronen de +plaat bereiken. Per seconde bereiken $5,0 \cdot 10^3$ α -deeltjes de ionisatiekamer.

- 4p **5** Bereken de stroomsterkte I . Bereken daartoe eerst het aantal elektronen dat per seconde in de ionisatiekamer uit moleculen wordt vrijgemaakt.

Technetium-99

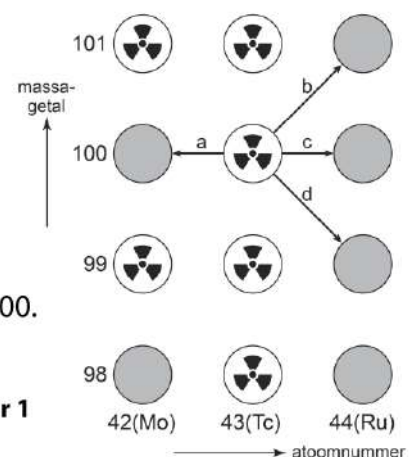
Radioactief afval van kerncentrales bevat een grote verscheidenheid aan radioactieve stoffen. Een van die stoffen is technetium-99 (Tc-99) dat een zeer lange halveringstijd heeft.

- 4p **1** Bereken hoeveel procent van een bepaalde hoeveelheid technetium-99 over is na 1,05 miljoen jaar.

Tegenwoordig onderzoekt men de mogelijkheid om een langlevende radioactieve stof als technetium-99 om te zetten in een stof die sneller vervalft. Daartoe bestraalt men het technetium met neutronen. Als een technetium-99-kern een neutron invangt, ontstaat de isotoop technetium-100.

- 2p **2** Hoeveel neutronen bevat een technetium-100-kern? Licht je antwoord toe.

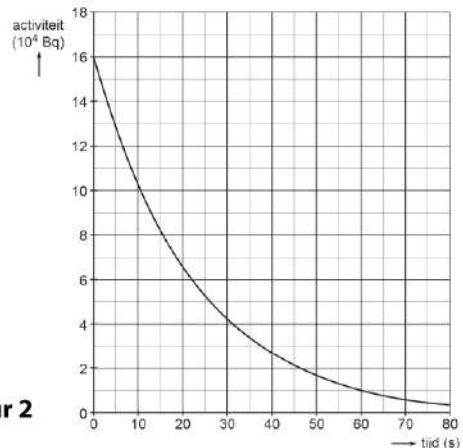
In figuur 1 zijn twaalf kernen als cirkels weergegeven. De kernen die verticaal onder elkaar staan, hebben hetzelfde atoomnummer; de kernen die horizontaal naast elkaar staan, hebben hetzelfde massagetal. De grijze kernen zijn stabiel, de andere isotopen zijn radioactief. Vanuit de cirkel die de technetium-100-kern voorstelt, zijn de vier pijlen a, b, c en d getekend. Eén van die pijlen stelt het β^- -verval voor van technetium-100.



Figuur 1

- 3p **3** Leg uit welke pijl.

Het verloop van de activiteit van een bepaalde hoeveelheid technetium-100 is gemeten. Figuur 2 is de grafiek van die metingen.



Figuur 2

- 2p **4** Bepaal uit figuur 2 de halveringstijd van technetium-100. [werkboek](#)
- 4p **5** Bepaal met behulp van figuur 2 het aantal kernen dat tussen 0 s en 10 s is vervallen. [werkboek](#)

Hoewel het chemisch afscheiden van technetium-99 en het bestralen met neutronen kostbaar is, overweegt men sterk om dit te gaan uitvoeren. Stel, je bent minister en je besluit om deze techniek toe te gaan passen.

- 2p **6** Geef twee argumenten voor je besluit aan de hand van de informatie in deze opgave.

Radioactieve slok

Lees onderstaande tekst.

Behandeling van te snel werkende schildklier met radioactief jodium

Mensen met een te snel werkende schildklier hebben problemen met hun stofwisseling. Deze zogenaamde ziekte van Graves wordt behandeld door de patiënt radioactief jodium (jood) in te laten nemen: de zogenoemde 'radioactieve slok'. Het zijn vooral de te snel werkende schildkliercellen die het jodium opnemen. Deze cellen worden beschadigd door de straling die ze dan absorberen. Daardoor gaat de schildklier na enige tijd weer normaal functioneren.

Deze methode wordt al dertig jaar als een veilige behandeling toegepast. De patiënten kunnen meestal dezelfde dag weer naar huis. Wel moet men enkele voorzorgsmaatregelen in acht nemen, zoals: de eerste dagen twee keer achter elkaar de wc doortrekken en gedurende enkele weken geen baby's op schoot nemen.

In de "radioactieve slok" zit de isotoop I-131 die β -straling en γ -straling uitzendt.

- 3p **1** Geef de vervalreactie van I-131.

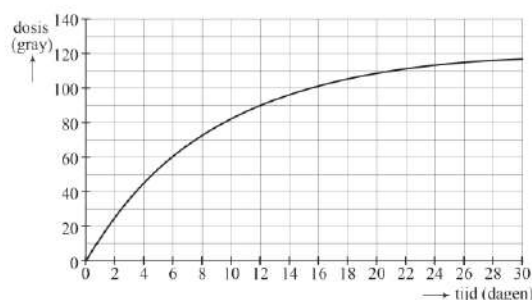
De straling beschadigt de schildkliercellen die het hardst werken.

- 2p **2** Leg uit welke straling, de β -straling of de γ -straling, vooral verantwoordelijk is voor die beschadiging.

In de tekst staat dat behandelde patiënten geen baby's op schoot mogen nemen.

- 2p **3** Leg uit waarom niet.

Zodra het jodium-131 in de schildklier is opgenomen (op $t = 0$ d), absorbeert de schildklier stralingsenergie. Zolang de schildklier straling absorbeert, neemt de totaal ontvangen dosis toe. Dit is weergegeven in figuur 1.



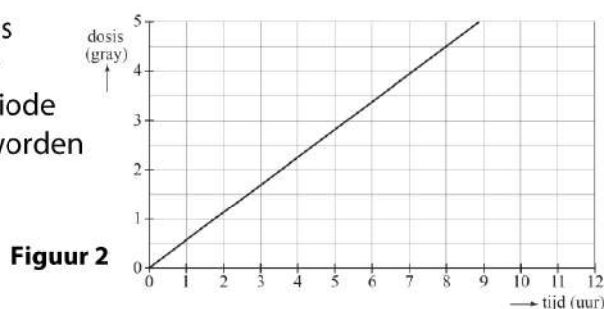
Figuur 1

- 2p **4** Leg uit hoe dit uit de grafiek blijkt.

Onder de effectieve halveringstijd van radioactief materiaal verstaan we de tijd waarin de activiteit ervan in het lichaam (in dit geval in de schildklier) tot de helft is afgenomen. De effectieve halveringstijd van I-131 is kleiner dan de "gewone" halveringstijd die in Binas staat omdat het jodium ook via biologische weg langzaam uit de schildklier verdwijnt.

- 3p **5** Leg met behulp van figuur 1 uit dat de effectieve halveringstijd van I-131 zes dagen is.

In figuur 2 is het verloop van de stralingsdosis van de schildklier getekend in de eerste paar uur nadat het I-131 is opgenomen. In die periode mag de activiteit van het I-131 als constant worden beschouwd.



Figuur 2

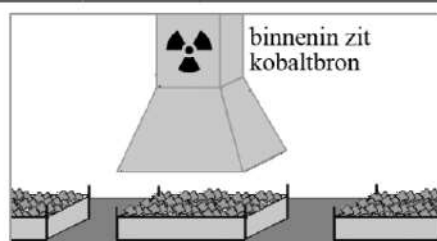
Per verval van een I-131-kern wordt $3,0 \cdot 10^{-14}$ J aan stralingsenergie door de schildklier geabsorbeerd. De massa van de schildklier is 45 gram.

- 5p **6** Bereken de activiteit van het I-131 in de periode die in figuur 2 is weergegeven. Bepaal daartoe eerst de hoeveelheid stralingsenergie die de schildklier per uur absorbeert.

Doorstralen van fruit

Door bestraling kunnen bacteriën en insecten in voedselproducten onschadelijk worden gemaakt. De producten blijven daardoor langer houdbaar. Lees het artikel hieronder.

De houdbaarheid van bijvoorbeeld aardbeien kan aanzienlijk vergroot worden door de vruchten na het plukken te doorstralen met γ -straling. Niet alleen de bacteriën die verantwoordelijk zijn voor het rottingsproces worden onschadelijk gemaakt, maar ook insecten en eitjes van insecten.



Als stralingsbron wordt ^{60}Co (kobalt-60) gebruikt dat bij verval β - en γ -straling uitzendt. De kistjes fruit komen via een lopende band onder de bestraler. Dan stopt de band even en wordt het fruit enige tijd doorstraald. Daarna schuift het volgende kistje onder de bestraler.

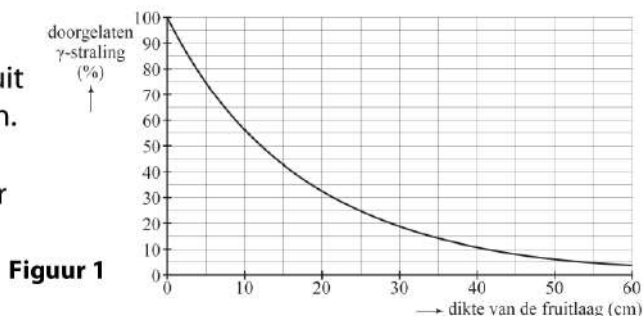
3p **1** Geef de vervalreactie van ^{60}Co (kobalt-60)

De β -straling die het kobalt uitzendt, draagt nauwelijks bij aan het onschadelijk maken van bacteriën en insecten in het fruit.

1p **2** Geef daarvoor de reden.

De grafiek van figuur 1 geeft aan hoeveel procent van de γ -straling door een laag fruit van een bepaalde dikte wordt doorgelaten.

2p **3** Bepaal de halveringsdikte van fruit voor de γ -straling van kobalt.



Na verloop van tijd vermindert de activiteit van de kobaltbron. De bron blijft bruikbaar tot zijn activiteit gedaald is tot 12,5% van de oorspronkelijke waarde.

3p **4** Bereken na hoeveel jaar de bron vervangen moet worden.

Het doorstralen van voedsel met γ -straling gebeurt op grote schaal. Toch bestaan in consumentenkringen bezwaren tegen deze manier van houdbaar maken van voedsel. Men stelt vragen als: "Wordt het bestraalde voedsel zelf radioactief?"

2p **5** Beantwoord deze vraag. Licht je antwoord toe.

Tsjernobyl, ruim 20 jaar later

In 1986 ontplofte in Tsjernobyl een kernreactor. Zie figuur 1. Grote hoeveelheden radioactieve stoffen werden bij dit ongeluk de lucht in geblazen. Door de wind verspreidden de stoffen zich over een enorm gebied. Een van die stoffen was Cs-137.



Figuur 1

Cs-137 is een van de splijtingsproducten in een kernreactor. Wanneer een U-235 kern een neutron invangt, kunnen er verschillende kernreacties plaatsvinden. Bij één zo'n reactie wordt Cs-137 gevormd en komen er vier neutronen vrij.

3p **1** Geef de reactievergelijking van deze kernreactie. (Niet alle isotopen in deze reactie staan in Binas.)

Bij de ontploffing kwam een hoeveelheid Cs-137 vrij met een totale activiteit van $85 \cdot 10^{15}$ Bq. In een gebied van $3,0 \cdot 10^3 \text{ km}^2$ (drieduizend vierkante kilometer) in de directe omgeving van de centrale, de zogenoemde 'verboden zone', veroorzaakte het neergeslagen cesium een gemiddelde activiteit van $2,0 \cdot 10^6 \text{ Bq/m}^2$.

3p **2** Bereken welk percentage van het vrijgekomen Cs-137 in dit gebied terecht kwam.

In de verboden zone wonen nog steeds mensen. De stralingsbelasting die zij ten gevolge van uitwendige bestraling oplopen, wordt voornamelijk bepaald door de absorptie van γ -straling afkomstig van Cs-137. De β -straling van Cs-137 draagt daar nauwelijks aan bij.

1p **3** Geef daarvan de reden.

Bij het verval van een Cs-137-kern komt een γ -deeltje (γ -foton) vrij met een energie van $1,06 \cdot 10^{-13}$ J. Het gebied wordt af en toe bezocht door wetenschappers die de invloed van ioniserende straling op flora en fauna onderzoeken. Geschat wordt dat een persoon van 75 kg in dit gebied $2,4 \cdot 10^5$ γ -deeltjes per seconde absorbeert.

4p **4** Bereken hoeveel dagen deze persoon maximaal in het gebied mag blijven zonder de dosislimiet per jaar te overschrijden voor individuele leden van de bevolking.

De activiteit van het Cs-137 in de verboden zone is inmiddels afgenomen tot $1,2 \cdot 10^6$ Bq/m² en zal met de jaren verder afnemen.

3p **5** Bereken de activiteit per m² van het Cs-137 in het gebied over 90 jaar. Zoek daartoe de halveringstijd van Cs-137 op en neem aan dat de activiteit ervan alleen afneemt ten gevolge van radioactief verval.

In de verboden zone bevond zich een bos waarvan de bomen ernstig waren besmet. Men besloot om de bomen niet te verbranden maar om ze onder een dikke laag zand te begraven.

2p **6** Beantwoord de volgende twee vragen vanuit het oogpunt van stralingsbescherming:
– Wat is het bezwaar tegen het verbranden van de bomen?
– Waarom is het begraven van de bomen onder een laag zand effectief?

Koolstof-14-methode (aangepast)

Om de ouderdom van organisch materiaal te bepalen, kan men gebruikmaken van de koolstof-14-methode. Koolstof-14 is een radioactieve isotoop die in de atmosfeer van de aarde voorkomt. De koolstof-14-methode is in 1949 ontdekt door Willard Frank Libby, die er in 1960 de Nobelprijs voor scheikunde voor ontving. In deze opgave gaan we stapsgewijs in op deze methode. In de natuur vinden we drie isotopen van koolstof: ¹²C, ¹³C, ¹⁴C. Deze isotopen hebben verschillende eigenschappen.

3p **1** Beantwoord de volgende vragen met JA of NEE.
– Is er een verschil in aantal protonen?
– Is er een verschil in aantal elektronen?
– Is er een verschil in aantal neutronen?
– Is er een verschil in massa?
– Is er een verschil in halveringstijd?

Het aantal C-14 kernen neemt in de loop van de tijd af want C-14 is radioactief.

3p **2** Geef de vervalvergelijking van het radioactieve verval van C-14.

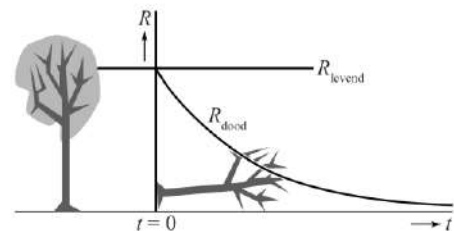
Tegelijkertijd wordt het aantal C-14 kernen in de bovenste lagen van de atmosfeer aangevuld. Neutronen worden ingevangen door stikstof-14 kernen, waarna koolstof-14 ontstaat. Bij dit proces komt nog een ander deeltje vrij. Het invangen van een neutron door een stikstof-14 kern kan als volgt worden weergegeven: $^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + \dots$

- 2p **3** Welk deeltje komt er bij dit proces vrij? Licht je antwoord toe door de reactievergelijking compleet te maken.

In alle levende planten en dieren vindt men dezelfde constante verhouding van

$$R = \frac{\text{aantal } ^{14}\text{C} - \text{kernen}}{\text{aantal } ^{12}\text{C} - \text{kernen}}$$

Als een plant of dier sterft, verandert R , want het koolstof-14 vervalt en wordt niet meer aangevuld. De afname van R is schematisch weergegeven in figuur 1. Een archeologe heeft een schedel van een sabeltandtijger gevonden waarvan zij de ouderdom wil weten. In het laboratorium meet ze dat R precies een kwart is van die van levende dieren.



Figuur 1

- 2p **4** Hoe oud is de schedel? Licht je antwoord toe.

De C-14-methode is bruikbaar voor materialen tot 10 halveringstijden oud.

- 2p **5** Hoeveel procent van de oorspronkelijke hoeveelheid koolstof-14 is er dan nog over? Geef je antwoord in twee significante cijfers.

Samarium-153

Cassie, een acht jaar oude hond met een tumor in een bot, is onlangs als eerste hond ter wereld succesvol behandeld met samarium-153.

Samarium-153 komt niet in de vrije natuur voor. Het wordt gemaakt door samarium-152-kernen te beschieten met een bepaald soort deeltjes.

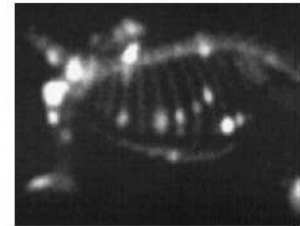


- 1p **1** Met welk deeltje moet een samarium-152-kern beschoten worden om samarium-153 te vormen? Kies A, B, C, D of E.
A alfadeeltje | B bètadeeltje | C gammafoton | D neutron | E proton

Samarium-153 zendt zowel β^- -straling als γ -straling uit. Het kan daarom zowel voor een behandeling tegen tumoren gebruikt worden als voor een scan.

- 4p **2** Geef de vervalreactie van samarium-153.

Samarium hecht zich beter aan geïnfecteerd botweefsel dan aan gezond botweefsel. Daarom kan er tijdens de behandeling ook een scan gemaakt worden van de hond waarin zieke botdelen als lichte vlekken te zien zijn. Zie figuur 1.



Figuur 1

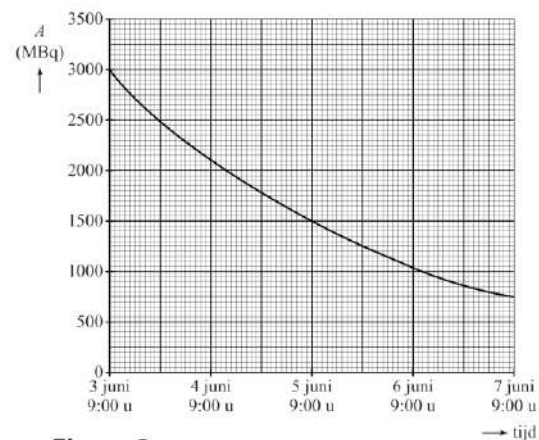
- 1p **3** Welk soort straling wordt gebruikt om een scan te maken en van welke eigenschap van die straling wordt dan gebruik gemaakt? Kies A, B, C, of D.

- A β^- -straling, want deze straling heeft een klein doordringend vermogen
- B β^- -straling, want deze straling heeft een groot doordringend vermogen
- C γ -straling, want deze straling heeft een klein doordringend vermogen
- D γ -straling, want deze straling heeft een groot doordringend vermogen

Het medicijn, met productiedatum 3 juni 9.00 uur, wordt aangeleverd in een flesje met een inhoud van 15 mL. Zie figuur 2. De activiteit van het geleverde samarium-153 is weergegeven in figuur 3.



Figuur 2



Figuur 3

- 2p **4** Bepaal met behulp van figuur 3 de halveringstijd van samarium-153.

Cassie is op 4 juni om 9.00 uur 's ochtends ingespoten met het medicijn. Volgens de arts moet er 37 MBq per kg lichaamsgewicht geïnjecteerd worden. Cassie heeft een massa van 30 kg.

- 3p **5** Bepaal hoeveel milliliter van het medicijn ingespoten moet worden.

De tumor in het bot van Cassie werd bestraald met de β^- -deeltjes die door het samarium-153 zijn uitgezonden. Elk deeltje had een energie van 233 keV. Tijdens de behandeling heeft het geïnfecteerde bot een stralingsdosis ontvangen van 86,5 Gy ten gevolge van de β^- -deeltjes. De massa van het geïnfecteerde bot is 10 g.

- 4p **6** Bereken hoeveel β^- -deeltjes door het geïnfecteerde bot tijdens de behandeling worden geabsorbeerd.

Een deel van het bij Cassie ingespoten samarium is uitgescheiden met de urine. De urine van Cassie werd daarom opgevangen en gedurende 8 halveringstijden bewaard.

- 2p **7** Bereken hoeveel procent van de activiteit van het samarium in de opgevangen urine er na die tijd nog over was. Geef je antwoord in twee significante cijfers.

Lutetium-177 (aangepast)

Lutetium-octreotaat is een radioactief eiwit waarmee patiënten met diepliggende tumoren inwendig en lokaal bestraald kunnen worden. In dit eiwit wordt de radioactieve isotoop Lu-177 gebruikt. Lu-177 vervalst door het uitzenden van β^- en γ -straling.

- 3p **1** Geef de vergelijking van de vervalreactie van Lu-177.

De straling die door Lu-177 wordt uitgezonden, wordt gebruikt om de tumoren in het weefsel te vernietigen, maar ook om te kijken of de tumor het lutetium goed heeft opgenomen. Daarvoor is het belangrijk dat de straling die Lu-177 uitzendt buiten het lichaam kan worden opgevangen.

- 1p **2** Welk soort straling is dit? Kies A, B, C of D.

A α | **B** β^- | **C** β^- en γ | **D** γ

Lu-177 zendt straling uit met een energie van 440 keV.

- 4p **3** Bereken de golflengte van deze straling.

Bij een patiënt wordt bij een behandeling een hoeveelheid Lu-177 in de bloedsomloop gebracht. Als de activiteit van het Lu-177 is afgenomen tot 0,001-ste deel van de oorspronkelijke activiteit, moet de patiënt in het ziekenhuis terugkomen. De halveringstijd van Lu-177 is 6,7 dagen.

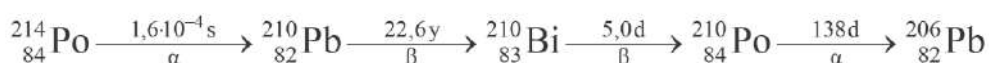
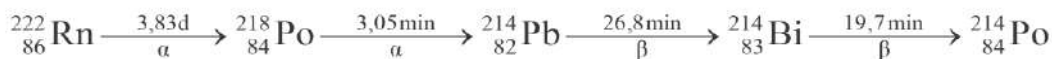
- 3p **4** Beredeneer na hoeveel dagen de eerstvolgende afspraak dan op zijn vroegst kan plaatsvinden.

Radioactieve rook

Tabak wordt gemaakt van de bladeren van de tabaksplant. Zie figuur 1. Tabaksplanten halen water en (voedings)stoffen uit de bodem en de lucht. Hierin zitten ook radio-actieve isotopen. Een van die isotopen is Rn-222, dat in een lange vervalreeks via diverse dochterkernen vervalst tot stabiel Pb-206:



Figuur 1



De dochterkernen uit deze vervalreeks komen in de bladeren van de tabaksplant terecht. Van deze bladeren wordt tabak voor sigaretten gemaakt. De tijd tussen het oogsten van de plant en het roken van een sigaret van die plant is gemiddeld twee jaar.

Na twee jaar is vooral Pb-210 aanwezig in de tabak.

- 2p **1** Leg dat uit met behulp van de halveringstijden uit de vervalreeks.

Naast Pb-210 bevat tabak ook een klein aandeel van de zeer gevaarlijke radioactieve stof Po-210. Een sigaret bevat 0,90 g tabak. Hierin zitten $2 \cdot 10^5$ atomen Po-210.

- 3p **2** Bereken het percentage van de massa van de tabak dat bestaat uit Po-210.

Van de totale massa van een sigaret komt een beperkt, maar wel zeer schadelijk deel via de rook in de kwetsbare longen terecht. Het ingeademde Po-210 plakt door teer in de rook vast op kleine plekken in de longen, de zogenaamde hotspots. De equivalente dosis H voor de longen als geheel, ten gevolge van het ingeademde polonium, kan berekend worden met de formule:

$$H = \frac{w_R \cdot A_{\text{gem}} \cdot \Delta t \cdot E_d}{m}$$

Hierin is:

- w_R de weegfactor
- A_{gem} de gemiddelde activiteit
- Δt de tijd dat het weefsel bestraald wordt
- E_d de energie van het vrijgekomen α -deeltje
- m de massa van het bestraalde weefsel

Het inademen van rook met Po-210 is gevaarlijk omdat 1) Po-210 een α -straler is, 2) de ingeademde Po-210 zich concentreert op hotspots en 3) het Po-210 vastplakt op plekken in de longen.

- 3p **3** Leg met behulp van de formule voor iedere gegeven reden uit waarom het inademen van rook met Po-210 zo gevaarlijk is.