

14 Kernfysica

VWO

14.1 Radioactieve straling

- 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** Zoek het atoomnummer van Pu op.
 - b** Leg uit hoeveel protonen er in een Pu kern zitten.
Eén proton heeft een lading van $1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
 - c** Bereken de lading van een Pu kern.
 - d** Leg uit hoeveel elektronen een Pu atoom heeft.
 - e** Bereken het aantal neutronen in een Pu-244 kern.
 - f** 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 komt veel voor in de natuur.

- a Zoek het atoomnummer van zuurstof op.
- b Zoek op hoeveel isotopen zuurstof heeft.
- c Welke isotopen van zuurstof komen voor op aarde?
- d Welke zuurstofisotoop komt het meest voor op aarde?
- e Bereken van het ^{18}O isotoop het aantal neutronen in de kern.
- f Geef het symbool van dit isotoop in drie verschillende notaties.
- g Geef de reactievergelijking van het verval van het ^{15}O isotoop.
- h Geef de reactievergelijking van het verval van het ^{19}O isotoop.

6** In een bepaalde atoomkern zitten 30 protonen en 40 neutronen.

- a Leg uit tot welk element dit atoom behoort.
- b Zoek het aantal isotopen van dit element op.
- c Zoek op welke isotopen van dit element radioactief zijn.
- d Zoek op welke isotoop van dit element β^- straling uitzendt.
- e 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.
- f Zoek op welke isotopen van dit element γ -straling uitzenden.

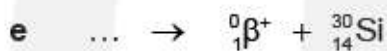
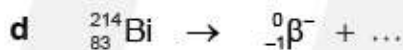
7** Het element neptunium heeft twee isotopen, die beide radioactief zijn.

- a Zoek van ieder isotoop op welke straling hij uitzendt.
- b Stel voor het verval van beide isotopen de reactievergelijking op.

8** ^{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.

- a Geef de reactievergelijking bij het uitzenden van een β^- deeltje.
- b Geef de reactievergelijking bij het uitzenden van een β^+ deeltje.

9*** Maak de reactievergelijkingen af.



10*** Het element chloor heeft twee stabiele isotopen. Chloorgas bestaat uit Cl_2 moleculen.

- a Bereken hoeveel verschillende soorten Cl_2 moleculen er bestaan.
- b 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.

- c Leg dit uit.

11**** 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.

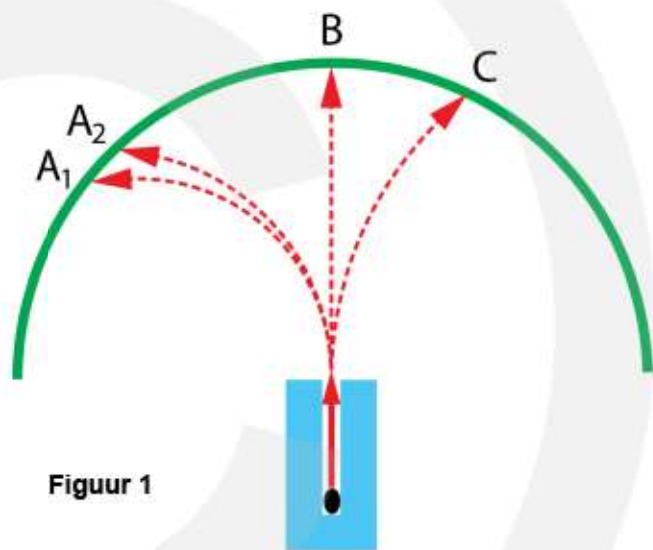
12 **** Krypton-81m is de isomeer van krypton-81 en ontstaat kunstmatig uit een kernreactie.

- a Leg uit wat een 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.

13 **** Om de eigenschappen van α -, β - en γ -straling te onderzoeken wordt de opstelling van figuur 1 gebruikt.

Een radioactief preparaat bevindt zich in vacuüm in een loden koker. Het preparaat zendt zowel α -, β - als γ -straling uit.

In het cilindrische deel is een fotografische plaat aangebracht die zwart wordt waar de uitgezonden straling de plaat treft.



Figuur 1

Een magnetische veld is aangebracht om de verschillende soorten straling van elkaar te scheiden.

De β -deeltjes worden met verschillende snelheid uitgezonden.

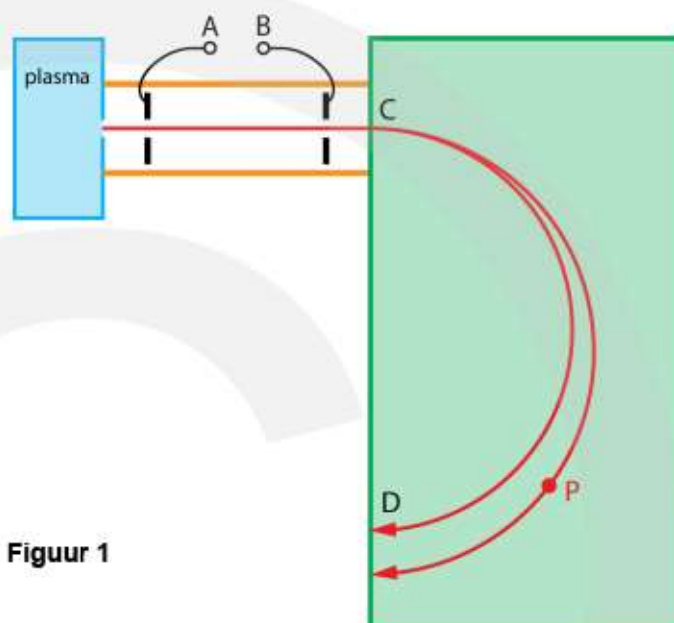
- a Bepaal de richting van het magnetisch veld.
- b Leg uit of de snelheid van de deeltjes die de plaat bij A₁ treffen groter, kleiner of gelijk is aan de snelheid van de deeltjes die bij A₂ aankomen.
- c Leg uit of de lorentzkracht op de deeltjes die de plaat bij A₁ treffen groter, kleiner of gelijk is aan de lorentzkracht op de deeltjes die bij A₂ aankomen.
- d Leg uit waar de α -straling de plaat treft.
- e Leg uit waar de γ -straling de plaat treft.

De straal van de cirkelbaan van de deeltjes die bij C aankomen is 2,0 keer zo groot als de straal van de cirkelbaan van de deeltjes bij A.

f Bereken de verhouding van de snelheden van de deeltjes die bij A aankomen en die bij C aankomen.

g Wat kun je zeggen van de snelheid van de deeltjes die bij B aankomen?

- 14**** Om isotopen van elkaar te scheiden kan gebruik worden gemaakt van een massaspectrometer. De werking van een massaspectrometer is weergegeven in figuur 1.



Figuur 1

In een gasontladingsbuis wordt een plasma gemaakt waarin ionen aanwezig zijn. De ionen komen met een verwaarloosbare beginsnelheid in een ruimte waarin een homogeen elektrisch veld is aangebracht. Door het E-veld worden ze versneld. Daarna komen de ionen in een ruimte waar een homogeen magnetisch veld is aangebracht. Door dit veld worden de ionen in een cirkelvormige baan afgebogen. Na een halve cirkelbaan treffen ze een detector. Een massa spectrometer wordt gebruikt om chloorisotopen van elkaar te scheiden.

a Geef in figuur 1 aan hoe de spanningsbron moet worden aangesloten om de chloorionen te versnellen.

De chloorionen komen met een verwaarloosbare beginsnelheid het elektrische veld binnen. Bij het verlaten van het elektrische veld hebben niet alle chloorionen dezelfde snelheid.

b Leg uit waardoor dit wordt veroorzaakt.

c Bereken de verhouding tussen de snelheden van de snelste en van de traagste chloorionen.

d Bereken hoeveel procent de variatie is tussen de snelheden.

e Bepaal de richting van het magnetisch veld in figuur 1.

f Leg uit waarom de ionen in het magnetisch veld een cirkelvormige baan beschrijven.

g Bepaal de richting van de lorentzkracht in punt P

h Geef met een pijl de richting aan van de snelheid van de chloorionen in punt P.

Voor de straal van de halve cirkel geldt: $r = k \cdot \sqrt{m}$ waarin $k = \sqrt{\frac{2 \cdot U_{AB}}{q \cdot B^2}}$

+ i Leid dit af.

Bij de detector worden twee bundels gemeten op 9,80 mm afstand van elkaar. De intensiteit van de ene bundel is drie keer zo sterk als die van de andere bundel. De straal van de buitenste baan is 1,028 keer zo groot als de straal van de binnenste baan.

Hieruit wordt geconcludeerd dat het chloor bestaat uit twee isotopen Cl-35 en Cl-37.

j Laat met bovenstaande formules zien dat dit een juiste conclusie is.

k Leg uit of de binnenste of de buitenste bundel de meeste intensiteit heeft.

l Bereken de afstand tussen C en D

14.2 De snelheid van radioactief verval

Halveringstijd

- 1*** a Leg met eigen woorden uit wat de halveringstijd is.

De halveringstijd van een isotoop is 1 dag.

- b Hoeveel procent van de radioactieve stof is er nog aanwezig na 1 dag.
c Hoeveel procent van de radioactieve stof is er nog aanwezig na 2 dagen.
d Hoeveel procent van de radioactieve stof is er nog aanwezig na 3 dagen.

- 2*** 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.

- 3*** De halveringstijd van Si-31 is 2,6 uur en de halveringstijd van Si-32 is 150 jaar.

- a Welke van deze isotopen is het stabielst?
b Verwacht je dat één van deze isotopen op aarde voorkomt?

- 4*** De isotoop P-30 wordt kunstmatig gemaakt.

- a Zoek de halveringstijd van P-30 op.

Je maakt 2000 P-30 kernen.

- b Hoeveel kernen zijn er nog aanwezig na 5 minuten?
c Hoeveel kernen zijn er nog aanwezig na 10 minuten?
d Hoeveel kernen zijn er in 10 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 12,5% 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** Zoek de halveringstijd van C-14 op.
- b** Hoe oud is de ploeg?

7** Een patiënt krijgt ^{131}I (jood-131) toegediend.

- a** Hoelang duurt het totdat de radioactiviteit in haar lichaam afkomstig van ^{131}I is gedaald tot 25% van de oorspronkelijke hoeveelheid?
- b** 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.

- a** Bereken de halveringstijd van deze stof.
- b** Bereken hoeveel procent van deze stof is vervallen na 16 uur.
- c** 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).

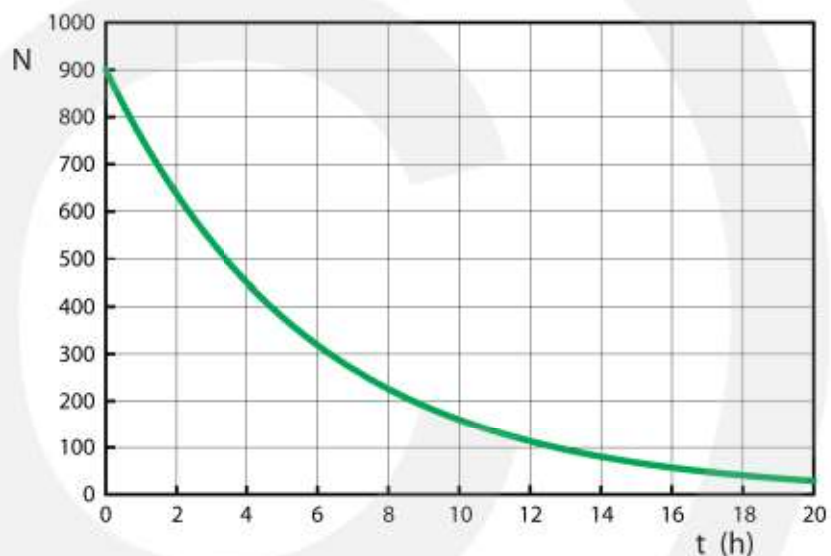
- a** Welke straling zendt deze isotoop uit?



- b** Hoeveel procent van de oorspronkelijke hoeveelheid Cs-137 is er nog aanwezig na 150 jaar.
- c** Hoeveel procent van de oorspronkelijke hoeveelheid Cs-137 is er nog aanwezig na 300 jaar.
- d** In welk jaar is het aantal Cs-137 kernen afgenomen tot 12,5% van de oorspronkelijke hoeveelheid?
- e** In welk jaar het aantal aanwezige Cs-137 kernen afgenomen tot 1,5625% van de oorspronkelijke hoeveelheid?

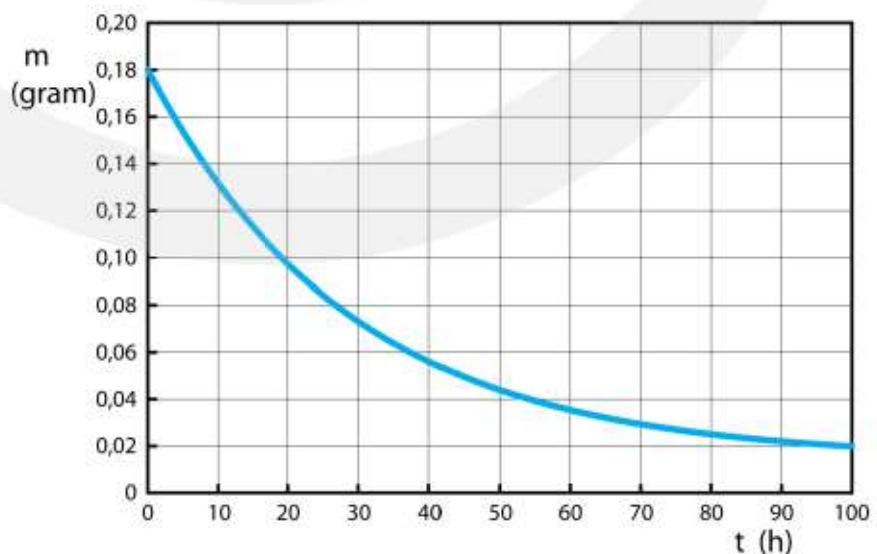
10** De figuur is het (N-t)-diagram van een radioactief isotoop.

- a** Hoe groot de halveringstijd?
- b** Hoeveel kernen zijn er na 24 uur nog aanwezig?
- c** Hoeveel kernen zijn er na 24 h vervallen?



11** In figuur zie je hoe de massa van een radioactief isotoop afneemt in de tijd.

- a** Hoe groot is de halveringstijd?
- b** Na hoeveel tijd is er 3,125% van de oorspronkelijke hoeveelheid aanwezig?
- c** 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**** Een brokje radioactieve stof zendt 160 α -deeltjes per minuut uit.
- a** Hoe groot is de activiteit van dit brokje stof?
- Acht uur later zendt het brokje nog maar 10 α -deeltjes per minuut uit.
- b** Wat is de halveringstijd van deze stof?

- 14*** 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?
- 15**** 1 gram radioactief ^{131}I (jood-131) heeft een activiteit van $4,6 \cdot 10^{15}$ Bq.
- a** Leg uit of de halveringstijd van 2 gram ^{131}I groter, kleiner of gelijk is aan die van 1 gram ^{131}I .
 - b** Leg uit of de activiteit van 2 gram ^{131}I groter, kleiner of gelijk is aan de activiteit van 1,0 gram ^{131}I .

16** Na 24 uur is de activiteit van een preparaat gedaald tot 12,5%.

a Bereken de halveringstijd.

17** De activiteit van ^{14}C in de schedel van een Neanderthaler is 128 keer zo klein als bij een levend mens.

a Hoe lang geleden leefde deze Neanderthaler?



18*** 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 B een grotere activiteit heeft dan stof A.

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?

19*** Van 4 gram radioactieve stof blijkt de activiteit in 6 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 4 gram nemen we nu 100 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.

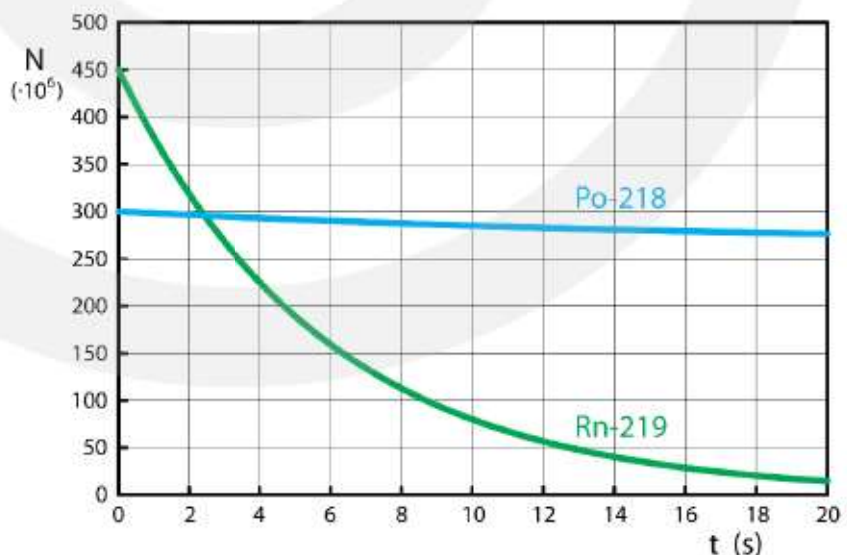
20*** De snelheid van het verval ^{82}Br (broom-82) en ^{65}Ni (nikkel-65) gaan we vergelijken. In het begin hebben beide stoffen evenveel atomen.

- a Zoek de halveringstijden van ^{82}Br en ^{65}Ni op.
- b Leg uit welk isotoop de grootste stabiliteit heeft.
- c Leg uit welk isotoop de grootste activiteit heeft op $t=0$.
- d Verklaar waarom de activiteit van beide stoffen afneemt in de tijd.
- e Leg uit bij welk isotoop de afname het snelst verloopt.

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

- a Bereken de activiteit van 1 gram ^{131}I .
- b Bereken de activiteit van 5 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.
- e Bereken na hoeveel tijd de activiteit is gedaald tot $2,0 \cdot 10^{13}$ Bq.
- f Bereken na hoeveel tijd 90% van het jood-131 is vervallen.

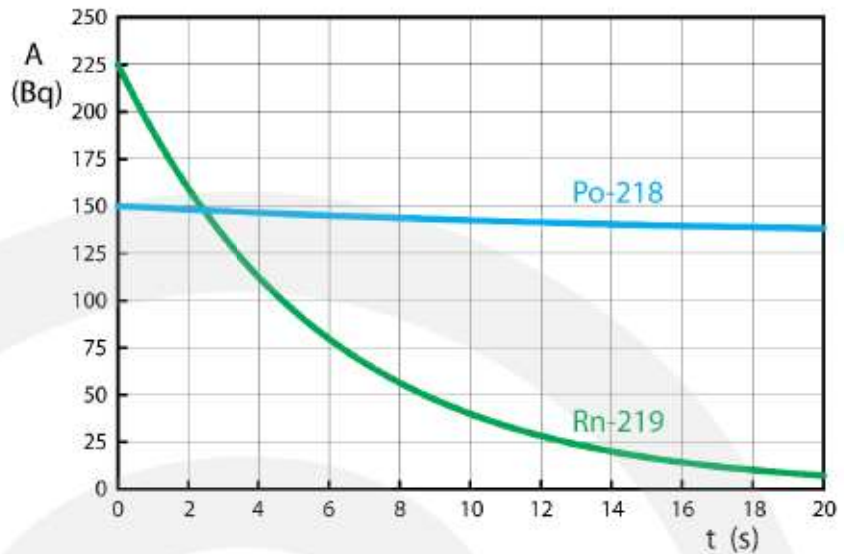
22*** De figuur is het (N, t)-diagram van het verval van Rn-219 (radon) en van Po-218 (polonium).



- a Bepaal de activiteit van Rn-219 op $t=8,0$ s met de raaklijn-methode.
- b Bepaal de activiteit van Rn-219 op $t=8,0$ s met de aflees-methode.
- c Bepaal de gemiddelde activiteit van Rn-219 tussen $t = 0$ en $t = 16$ s.
- d Bepaal de activiteit van Po-218 op $t = 8,0$ s met de raaklijnmethode.
- e Bepaal de activiteit van Po-218 op $t = 8,0$ s met de afleesmethode.
- f Bepaal de gemiddelde activiteit van Po-218 tussen $t = 0$ en $t = 20$ s.

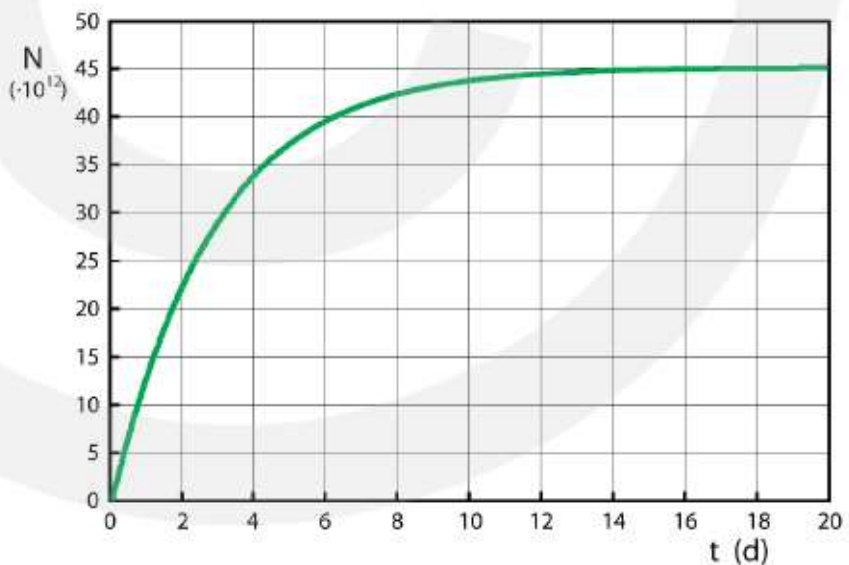
23 *** De figuur is het (A, t)-diagram van het verval van Po-218 (polonium) en Rn-219 (radon).

- Bepaal het aantal vervallen Rn-219 kernen op $t = 10$ s met de oppervlakte-methode.
- Bepaal het aantal vervallen Rn-219 kernen op $t = 10$ s met de aflees-methode.
- Bepaal het aantal vervallen Po-218 kernen op $t = 10$ s met de oppervlakte-methode.
- Bepaal het aantal vervallen Po-218 kernen op $t = 10$ s met de afleesmethode.



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

- Schets het (N, t)-diagram van dit verval.
- Bepaal de halveringstijd.
- Leg uit of de activiteit toeneemt, afneemt of gelijk blijft
- Bepaal de activiteit op $t = 5,0$ d met de afleesmethode.
- Bepaal de gemiddelde activiteit tussen $t = 0$ en $t = 2,0$ d.
- Bepaal de gemiddelde activiteit tussen $t = 0$ en $t = 20$ d.



14.3 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 een klein beetje ^{241}Am (americium-241). Nu is dat niet meer zo en wordt er gebruik gemaakt van een lichtsensor.



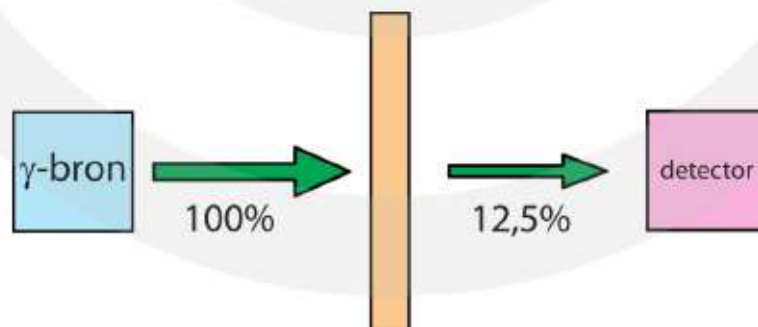
- a Geef de vervalreactie van Am-241.
- b Leg uit of de activiteit van americium-241 na 20 jaar veel of weinig is veranderd.

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.
- 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 mm. Een plaatje van deze stof staat voor een γ -bron. Achter het plaatje staat een detector.

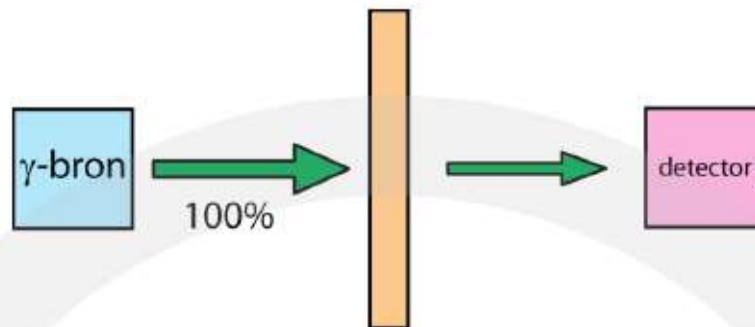


- a Hoe dik is het plaatje als 12,5% van de straling in de detector komt?

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 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?

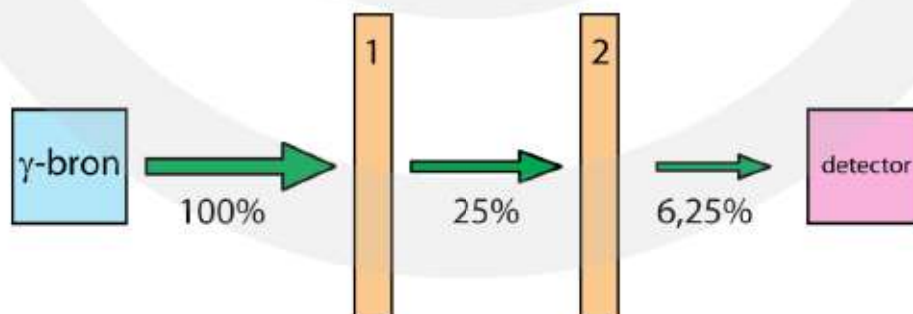
Een plaatje met een andere dikte houdt 87,5% van de straling tegen.

b Hoe dik is dit plaatje?

Bij een plaatje met weer een andere dikte komt maar 0,78% 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.



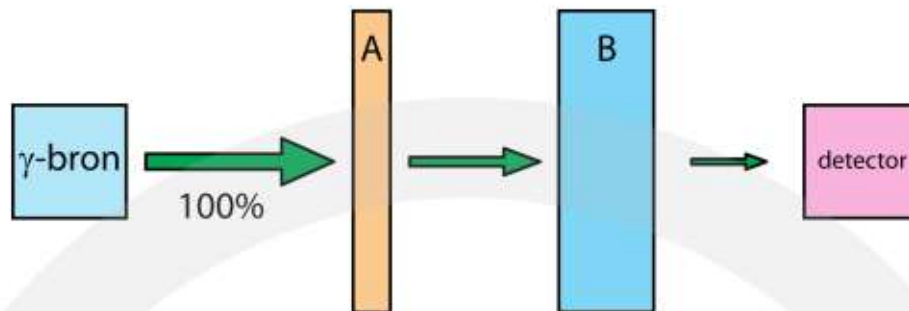
Na het eerste plaatje is nog 25% van de straling aanwezig.

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 mm. Stof B heeft een halveringsdikte van 5 mm.



Plaatje A heeft een dikte van 2 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 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 0,055 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.



14.4 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 geiger-müllerteller (GM-teller) mee.

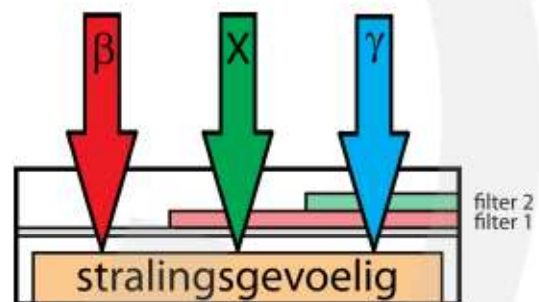
b Leg uit waarom dit niet nodig is.

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.

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

c Teken de verkleuring van het stralingsgevoelige materiaal bij blootstelling aan β - en γ -straling.

3*** Stralingsbescherming

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.

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

- 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, 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.

- 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 het best gebruikt kan worden om de badges te testen.

14.5 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** Inwendige bestraling

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 aan de centrale.

- b** Bereken het dosisequivalent dat de monteur in één jaar ontvangt.

Volgens de Nederlandse wet mag iemand die met stralingsbronnen werkt per jaar maximaal 20 mSv ontvangen.

- c** Voldoet de monteur aan deze wet?



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 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 stewardess 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.

a Bereken de dosisequivalent die ze in een jaar ontvangt.

In Nederland mogen mensen boven de 18 die beroepshalve met radioactieve straling werken een stralingsdosis van maximaal 20 mSv per jaar ontvangen. De stralingsweegfactor is 1.

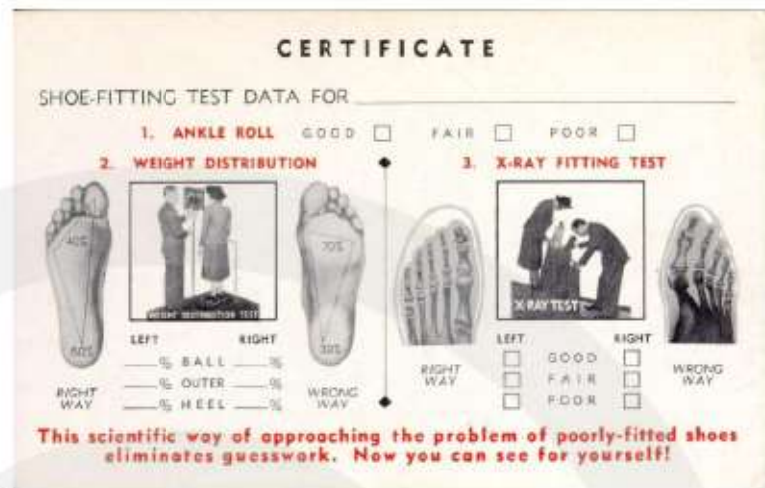
b Bereken hoeveel uur een stewardess per week gemiddeld moet vliegen om de stralingsnorm te overschrijden.



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.



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

De massa van dit stukje huid is 18 g. De radioactieve α -bron lekt iedere seconde $6.0 \cdot 10^{-8}$ J stralingsenergie.

Volgens de Nederlandse regelgeving mag de dosisequivalent bij een volwassene paar jaar niet meer zijn dan 1 mSv.

- c** Ga na of het ontvangen dosisequivalent is toegestaan volgens de Nederlandse regelgeving.

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*** 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.
- 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 absorbeert.

12*** Radon is een radioactief gas dat voortdurend uit de aardbodem ontsnapt en ook door bouwmaterialen wordt afgestaan. Doordat de huizen ten behoeve van warmteisolatie steeds minder worden geventileerd is de hoeveelheid radongas per m^3 in de afgelopen jaren in huis toegenomen. We beperken ons tot de aanwezige radon-222 isotoop.

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

13

Bij het gebruik van radioactieve stoffen in de geneeskunde wordt niet alleen op de halveringstijd van de stralingsbron gelet maar ook op de biologische halveringstijd. Met de biologische halveringstijd wordt de tijd bedoeld waarin de helft van de toegediende stof door het lichaam is uitgescheiden. Zo heeft jodium-131 een natuurkundige halveringstijd van 8,0 dagen en, na opname door de schildklier, een biologische halveringstijd van 12 dagen. De natuurkundige en biologische halveringstijd vormen samen de effectieve halveringstijd.

De effectieve halveringstijd is altijd korter dan zowel de natuurkundige als biologische halveringstijd.

a Leg uit waarom dit het geval is.

Het toegediende jodium-131 verzamelt zich in korte tijd in de schildklier van de patiënt. De activiteit van het opgenomen jodium-131 stellen we op A_0 Bq.

b Bereken dat de activiteit van het opgenomen jodium-131 na 24 dagen $1/8 A_0$ zou bedragen als er geen biologische uitscheiding zou zijn.

c Bereken dat de activiteit van het opgenomen jodium-131 na 24 dagen $1/32 A_0$ bedraagt ten gevolge van zowel de natuurkundige als de biologische halveringstijd.

Voor het natuurkundige verval van radioactieve kernen geldt:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{\tau_N}} \quad \tau_N \text{ is de natuurkundige halveringstijd}$$

Voor de biologische uitscheiding van lichaamsvreemde stoffen geldt:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{\tau_B}} \quad \tau_B \text{ is de biologische halveringstijd}$$

Als natuurkundig verval en biologische uitscheiding van kernen tegelijkertijd optreedt geldt:

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

d Leg uit waarom dit het geval is.

We kunnen deze formule ook opschrijven als:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{\tau_{\text{eff}}}} \quad \text{met} \quad \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_N} + \frac{1}{\tau_B}$$

+ e Toon dit aan.

f Bereken met deze formule de effectieve halveringstijd van jodium-131 opgenomen door de schildklier.

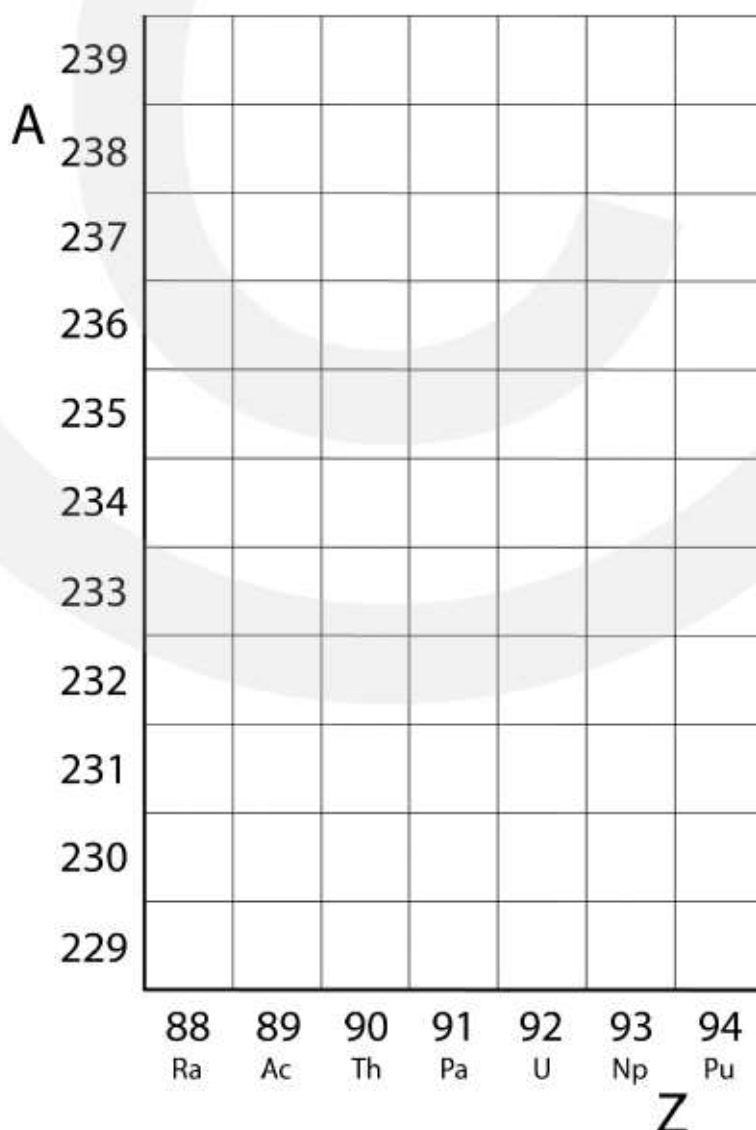
g Bereken met deze formule dat de activiteit na 24 dagen inderdaad nog maar $1/32 A_0$ is.

14.6 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.



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 er een α -deeltje wordt uitgezonden.
- Beredeneer bij hoeveel stappen in de vervalreeks er 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.

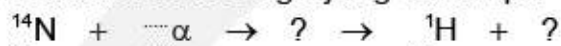


Gestimuleerde reacties

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.

a Maak de reactievergelijking van stap 1 kloppend: $^{14}_7\text{N} + \alpha \rightarrow ?$

b Maak de reactievergelijking van stap 1 + stap 2 compleet.



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

a Geef de reactievergelijkingen van deze gestimuleerde reactie.

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

b Geef de reactievergelijkingen 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 Stel de reactievergelijking op.

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.

a Stel de reactievergelijking op.

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

b Stel de reactievergelijking op.

K-vangst

8** Koolstof-11 vervalt door middel van K-vangst. Bij het verval ontstaat röntgenstraling.

- a** Leg uit wat met K-vangst wordt bedoeld.
- b** Stel de reactievergelijking op.
- + **c** Leg uit of de röntgenstraling uit fotonen met dezelfde energie bestaat of dat er röntgenfotonen met verschillende energieën worden uitgezonden.

9*** Magnesium-22 vervalt door middel van K-vangst.

- a** Stel de reactievergelijking op.

Magnesium heeft 2 elektronen in de K-schil en 8 elektronen in de L-schil en 2 elektronen in de M-schil. Bij K-vangst bestaat de uitgezonden röntgenstraling uit fotonen met drie verschillende energiewaarden, laag, middel en hoog.

- b** Leg uit waardoor dit wordt veroorzaakt.

De energiewaarden van de fotonen zijn aan elkaar gerelateerd. Noem de fotonenergie $E_{f, \text{laag}}$, $E_{f, \text{middel}}$ en $E_{f, \text{hoog}}$.

- + **c** Stel de vergelijking op waaraan $E_{f, \text{laag}}$, $E_{f, \text{middel}}$ en $E_{f, \text{hoog}}$ moeten voldoen.

14.7 Massa en energie

- 1*** Maak de reactievergelijkingen af. Zet op de stippelijnen het juiste getal en vul het vraagteken in.



- 2*** Een gemiddeld gezin in Nederland gebruikt per jaar 4000 kWh aan elektrische energie. $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$.

a Bereken hoeveel massa met deze hoeveelheid energie correspondeert.

De verbrandingwarmte van stookolie is $40 \cdot 10^9 \text{ J / m}^3$.

b Bereken hoeveel liter stookolie er verbrand moet worden om aan de jaarlijkse elektrische energiebehoefte te voldoen. Neem aan dat er geen verliezen zijn.

c Bereken hoeveel liter stookolie er verbrand moet worden om evenveel energie te krijgen als de energie die vrijkomt bij volledige omzetting van 1,0 kg materie in energie.

Massadefect

- 3*** Lithium-7 kan in theorie overgaan in beryllium-7 door het uitzenden van een β -deeltje.

a Beredeneer of deze overgang spontaan kan optreden.

- 4**** Polonium-210 is een radioactief isotoop.

a Stel de reactievergelijking op.

Bij een spontaan radioactief vervalproces komt altijd energie vrij.

b Leg uit waarom dit het geval is.

c Bereken het massadefect bij het verval van Po-210.

d Bereken uit het massadefect de hoeveelheid vrijkomende energie.

- e Vergelijk de vrijgemaakte energie met de energie van het uitgezonden α -deeltje volgens Binas 25 en leg uit waarom de berekende waarde bij d afwijkt van de waarde in Binas.

5**** Het element neptunium heeft twee isotopen, die beide radioactief zijn.

- a Bereken het massadefect voor het α -verval van neptunium.
- b Bereken het massadefect voor het β -verval van neptunium.
- c Beredeneer of deze vervalprocessen spontaan kunnen verlopen.

6*** Berilium-9 wordt beschoten door deeltjes met een kinetische energie van 2,5 MeV. Er treden verschillende kernreacties op. Bij een bepaalde reactie ontstaat er een Li-7 kern met een kinetische energie van 3,2 MeV en een α -deeltje met een kinetische energie van 6,5 MeV.

De kinetische energie van de beschoten Be-9 kernen is te verwaarlozen.

- a Bepaal met welke deeltjes het beryllium is beschoten.
- b Leg uit of bij deze kernreactie sprake is van massatoename of van massa-afname.
- c Bereken het massadefect.

Kernreactor

7*** In een kernreactor wordt uranium-235 gespleten door het met neutronen te beschieten. Als een uranium-235 kern één neutron opneemt kan er een kernreactie optreden, waarbij twee middelgrote kernen met massagetalen 94 en 140 ontstaan. Eén van deze kernen is een cesiumkern $_{55}\text{Cs}$.

- a Bereken hoeveel neutronen er ontstaan.
- b Stel de vergelijking van deze kernreactie op.

De gevormde middelgrote kernen zijn beide radioactief. Beide kernen sturen achter elkaar drie β -deeltjes uit waarbij uiteindelijk stabiele kernen ontstaan.

- c Ga na welke stabiele kernen er uiteindelijk worden gevormd.

8** De neutronen die vrijkomen bij de splijting van uranium-235 hebben een te hoge snelheid om de kettingreactie in stand te houden. Door een moderator aan te brengen worden de neutronen afgeremd.

- a** Leg uit waarom het beter is om als moderator een stof met lichte kernen te gebruiken dan een stof met zware atoomkernen.

9**** In een kernreactor wordt uranium-235 gespleten door het met neutronen te beschieten. Een van de optredende kernreacties is:



Hierbij is X een nader te bepalen kern.

- a** Bepaal het atoomnummer, de naam en het massagetal van kern X.

Kern X heeft een massa van 143,93823 u.

- b** Bereken hoeveel kg aan massa er verdwijnt bij de kernreactie. Gebruik alle beschikbare significante cijfers.
- c** Bereken hoeveel joule aan energie er ontstaat bij de splitsing van één mol U-235.

Examenvragen havo

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 **a** 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 **b** 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 **c** 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 **a** 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 **b** 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 **c** 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 **d** 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.

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

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



Figuur 1

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 **b** Geef de vervalreactie van Cs-137.
- 2p **c** 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 **d** 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 **e** Bereken de stralingsdosis die de spiermassa ontvangt.

Castor container

Het radioactief afval van Duitse kerncentrales wordt in zogenaamde Castor-containers per trein naar de opwerkingsfabriek in La Hague aan de Franse kust afgevoerd. Zie figuur 1.



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. 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 **a** 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 **b** 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 **c** 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 **d** 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 **a** Schrijf de vergelijking van deze vervalreactie op.

Plutonium-238 zendt α -straling uit. De halveringstijd van plutonium-238 is 87,7 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 **b** Leg uit waarom dit niet hoeft.

Het rendement van de generator is 3,4%.

- 4p **c** Bereken het nuttig vermogen van de generator 7,0 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 **d** 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 plutoniumisotoop, 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 **e** 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.

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



Figuur 1

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.

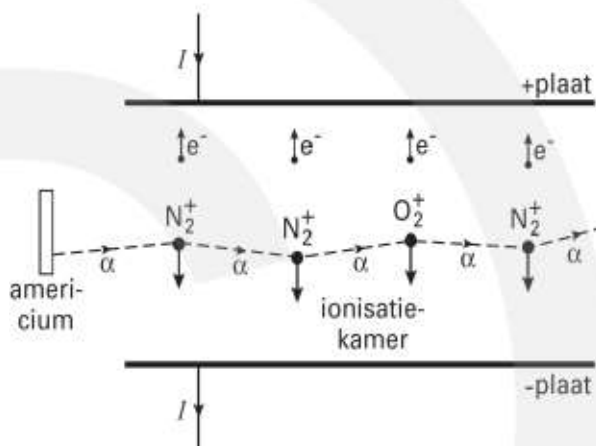
- 4p **b** Bereken de massa van het americium-241 dat in de rookmelder mag zitten om binnen de wettelijke grens te blijven.

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

- 4p **c** 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.

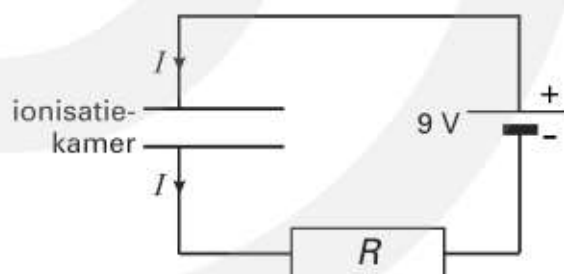
In figuur 2 is ook te zien dat het americium voor een opening in de ionisatiekamer is aangebracht.



Figuur 2

- 2p **d** 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 stikstofmoleculen 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.



Figuur 3

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.

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

Techne-⁹⁹m

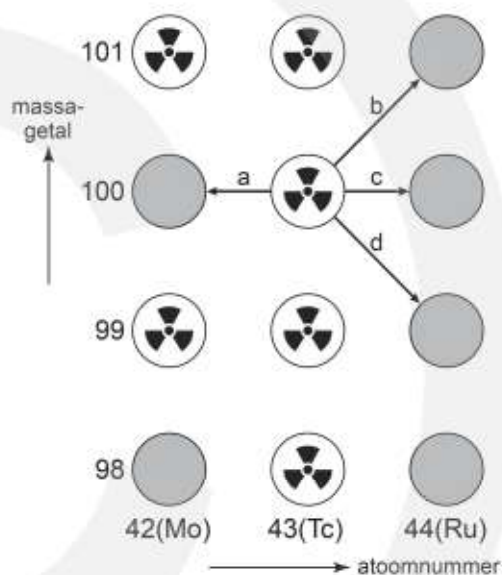
Radioactief afval van kerncentrales bevat een grote verscheidenheid aan radioactieve stoffen. Een van die stoffen is technetium-99 (Tc-99) dat een zeer lange halveringstijd heeft.

- 4p **a** 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 vervalt. Daartoe bestraalt men het technetium met neutronen. Als een technetium-99-kern een neutron invangt, ontstaat de isotoop technetium-100.

- 2p **b** 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.

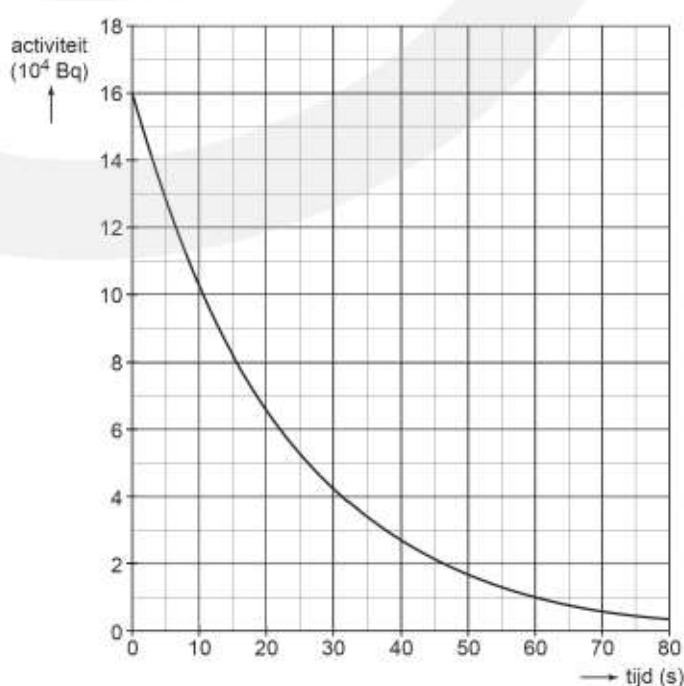


Figuur 1

- 3p **c** 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.

- 2p **d** Bepaal uit figuur 2 de halveringstijd van technetium-100.
- 4p **e** Bepaal met behulp van figuur 2 het aantal kernen dat tussen 0 s en 10 s is vervallen.



Figuur 2

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 **f** 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 schildklierzellen 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 **a** Geef de vervalreactie van I-131.

De straling beschadigt de schildklierzellen die het hardst werken.

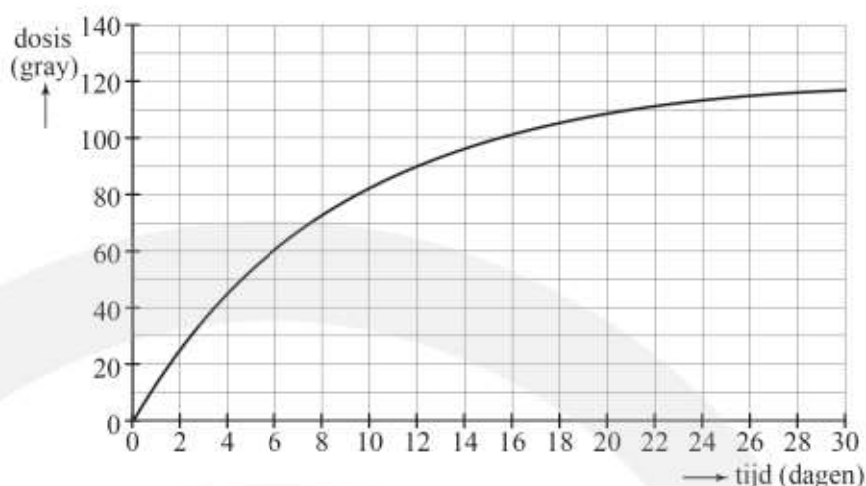
- 2p **b** Leg uit welke straling, de β -straling of de γ -straling, vooral verantwoordelijk is voor die beschadiging.

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

- 2p **c** 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



Op het tijdstip $t = 20$ d is de activiteit van het I-131 in de schildklier lager dan op het tijdstip $t = 2$ d.

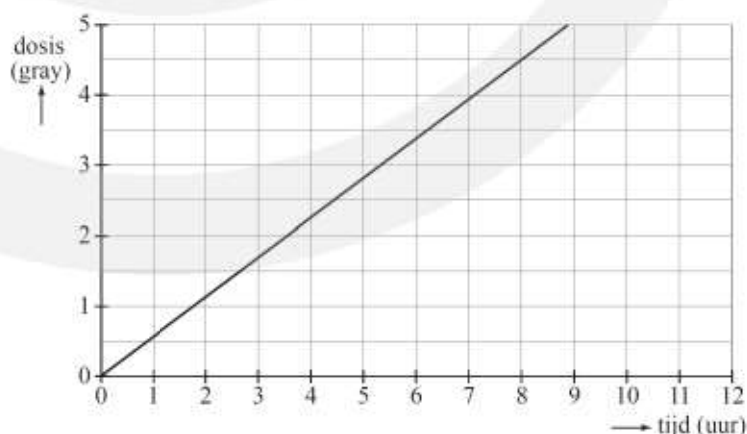
- 2p **d** Leg uit hoe dit uit de grafiek blijkt.

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 **e** 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 **f** 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.



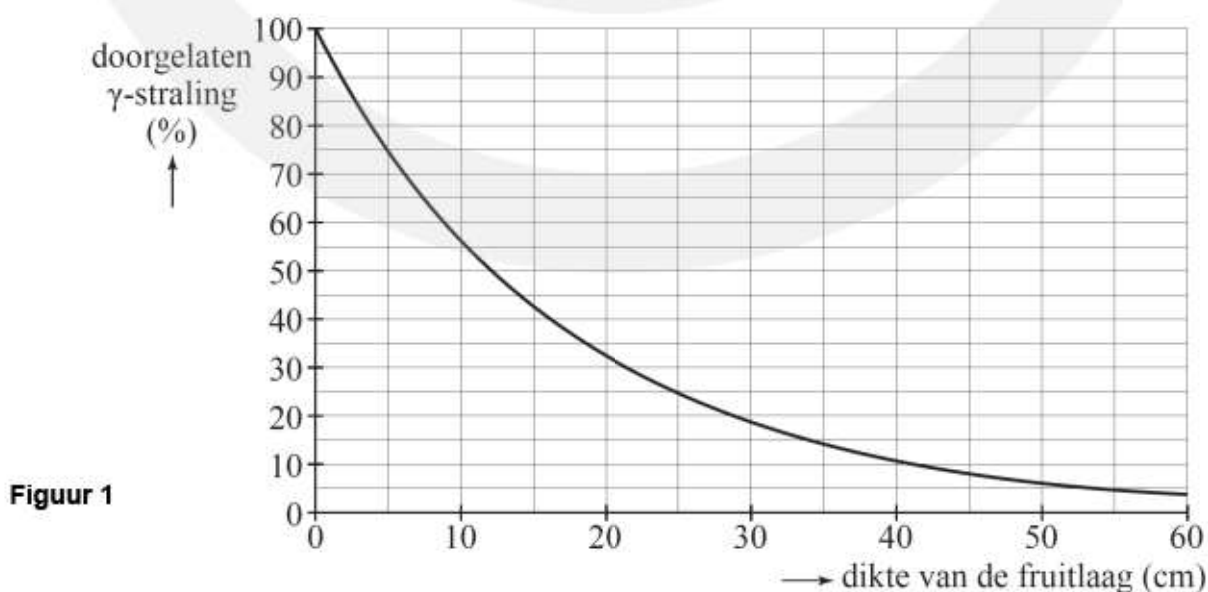
Als stralingsbron wordt ^{60}Co (kobalt-60) gebruikt dat bij verval β - en γ -straling uitzendt. De kistjes fruit komen via een lopende band onder de bestraler. Dan stopt de band even en wordt het fruit enige tijd doorstraald. Daarna schuift het volgende kistje onder de bestraler.

- 3p **a** 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 **b** 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 **c** 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 **d** 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 **e** 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 verspreiden 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 **a** 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 $3,0 \cdot 10^3$ km² (drieduizend vierkante kilometer) in de directe omgeving van de centrale, de zogenoemde 'verboden zone', veroorzaakte het neergeslagen cesium een gemiddelde activiteit van $2,0 \cdot 10^6$ Bq/m².

- 3p **b** 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 **c** 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 **d** 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 **e** 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 **f** 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?

De natuurlijke kernreactor van Oklo

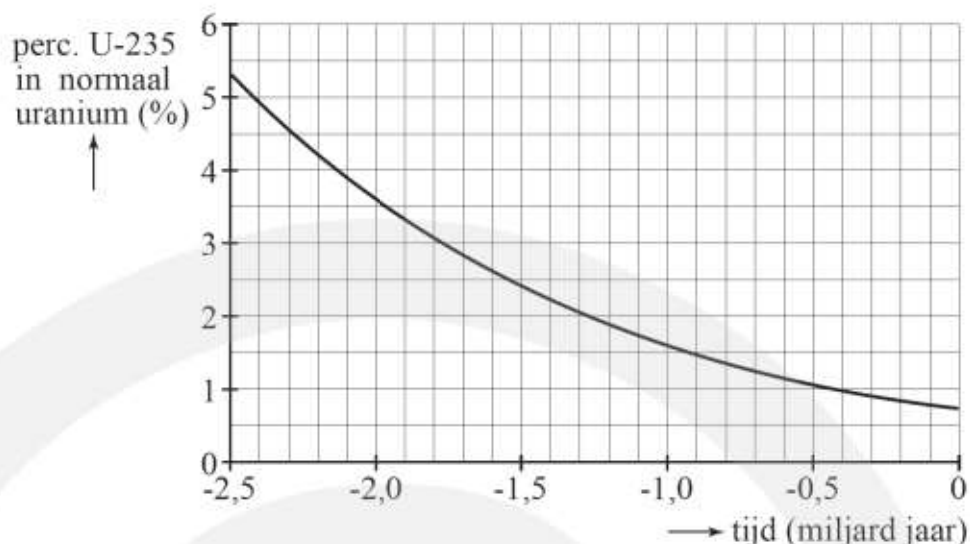
Lees eerst onderstaande tekst.

In 1972 ontdekten Franse kernfysici dat het uranium uit de mijn Oklo in Gabon een iets lager percentage U-235 bevatte dan normaal uranium. Dit verschil in percentage is te verklaren door aan te nemen dat de mijn zo'n twee miljard jaar geleden als een natuurlijke kernreactor in actie is geweest.

Er zijn twee voorwaarden voor een kettingreactie van het splijten van U-235: het percentage U-235 moet minstens 3% zijn en er moet water aanwezig zijn om als moderator te dienen. Waarschijnlijk kon het water door aardverschuivingen bij het uranium komen.

Normaal uranium bestaat voor 0,7% uit de radioactieve isotoop U-235 en voor 99,3% uit de radioactieve isotoop U-238. Men kan uitrekenen hoe het percentage U-235 in uranium in de loop van de tijd is veranderd. Zie figuur 1.

Figuur 1

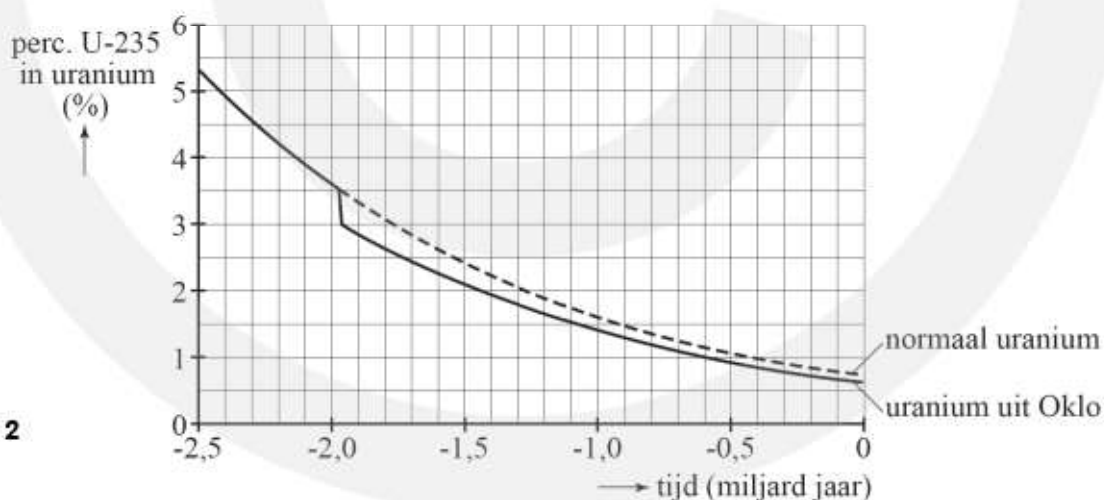


Het heden is het tijdstip $t = 0$.

- 2p **a** Leg uit waarom het percentage U-235 in uranium in de loop van de tijd is afgenomen.

Omdat de samenstelling van het uranium uit de mijn van Oklo iets afwijkt van normaal, heeft men teruggerekend hoe het (massa)percentage U-235 van dit uranium in de loop van de tijd is veranderd. Zie figuur 2.

Figuur 2



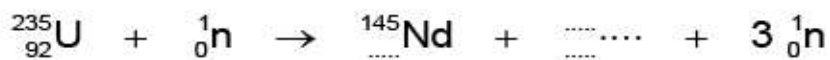
Ongeveer twee miljard jaar geleden moet er plotseling U-235 verdwenen zijn door kernsplijting. Men schat de hoeveelheid verdwenen U-235 op $1,1 \cdot 10^4$ kg.

- 3p **b** Bepaal met behulp van de grafiek de totale massa die het uranium had op het moment dat de reactor begon te werken.

Bij de splijting van één U-235-kern komt gemiddeld 200 MeV energie vrij.

- 4p **c** Bereken de hoeveelheid energie in J die de kernreactor van Oklo heeft geproduceerd.

In het uraniumerts uit Oklo zijn sporen van neodymium-145 (Nd-145) gevonden. Dit moet bij de kernsplijting van U-235 zijn ontstaan. Hieronder is deze reactie onvolledig weergegeven.



- 3p **d** Maak bovenstaande reactie compleet door de stippellijntjes in te vullen.
(Nd-145 en het andere splijtingsproduct staan niet in tabel 25 van Binas)

Examenvragen vwo

Nieronderzoek

Om het functioneren van nieren te onderzoeken, brengt men via het bloed een radioactieve stof in het lichaam. Deze stof verspreidt zich door het hele lichaam en wordt via de nieren weer uitgescheiden. Meestal gebruikt men hiervoor een isotoop van technetium, ^{99m}Tc . De "m" betekent metastabiel of isomeer.

In deze metastabiele toestand bezit het isotoop een extra hoeveelheid energie die in de vorm van γ -straling wordt uitgezonden. Het uitzenden van deze γ -straling is een proces met een halveringstijd van 6,0 uur. Daarbij ontstaat het normale ^{99}Tc . Met een voor γ -straling gevoelige camera registreert men hoe het ^{99m}Tc zich in de loop van de tijd door de nieren verspreidt.

Bij een onderzoek wordt een hoeveelheid ^{99m}Tc met een activiteit van 39 MBq bij een patiënt ingebracht.

- 4p **a** Bereken de massa van het ingebrachte ^{99m}Tc .

Per kern ^{99m}Tc die vervalft, komt 140 keV vrij in de vorm van γ -straling. De patiënt absorbeert 60% van de energie van de gammastraling. Bij het onderzoek vervallen er in totaal $8,0 \cdot 10^{11}$ kernen ^{99m}Tc in het lichaam. De massa van de patiënt is 70 kg.

- 4p **b** Bereken het door de patiënt opgenomen dosisequivalent.

Brachytherapie

Brachytherapie is de naam voor een medische behandeling waarbij een hoeveelheid radioactieve stof, die zich in een holle naald bevindt, enige tijd in ziek weefsel wordt gestoken. Deze methode werd voor het eerst toegepast rond 1900, toen men de beschikking had over voldoende radium. Het radium werd op de plaats van het zieke weefsel gebracht en zorgde daar voor intensieve bestraling. Bij het verval van radium-isotopen ontstaat α -, β - en γ -straling.

- 2p **a** Leg uit welke van deze drie soorten straling het zieke weefsel vlakbij het radium het meest aantast.

Tegenwoordig gebruikt men in plaats van radium vaak de radioactieve isotoop iridium-192. Deze isotoop vervalft voornamelijk onder uitzending van β -deeltjes, waarbij als eindproduct een stabiele isotoop ontstaat.

- 3p **b** Geef de vergelijking voor dit verval.

Bij een bepaalde behandeling moet een stukje weefsel van 4 gram een stralingsdosis van 2 Gy ontvangen. De behandeling duurt 3,5 uur. De gemiddelde energie van de hierbij uitgezonden β -deeltjes is $9,6 \cdot 10^{-14}$ J. Neem aan dat alle uitgezonden straling door het stukje weefsel wordt opgenomen.

- 4p **c** Bereken de gemiddelde activiteit die het ingebrachte iridium moet hebben.

De activiteit van het iridium-192 daalt in de loop van de tijd. Met hetzelfde iridium-preparaat wordt de behandeling precies vier weken later herhaald. Men wil dan dezelfde stralingsdosis toedienen aan hetzelfde stukje weefsel.

- 4p **d** Bereken hoe lang de behandeling dan moet duren.

Nieuw element (aangepast)

Lees eerst onderstaande tekst.

Russische onderzoekers hebben vermoedelijk het element met atoomnummer 114 geproduceerd. Al tientallen jaren proberen natuurkundigen met deeltjesversnellers kunstmatig zware kernen te maken. Zij schieten lichte kernen met hoge snelheid op zware kernen af in de hoop samensmelting tot stand te brengen. Bij het Russische onderzoek werden calcium-48-ionen geschoten op plutonium-244. Uit het radioactief verval van de gevormde atoomkern konden de onderzoekers afleiden dat bij deze botsing de isotoop met 175 neutronen van element 114 gevormd was. Het gevormde element zou een levensduur hebben van 30 seconde, buitengewoon lang voor zo'n zware atoomkern.

Om een calciumkern te laten samensmelten met een plutoniumkern is het nodig dat het calciumion met een zeer grote snelheid naar de plutoniumkern geschoten wordt.

- 2p **a** Leg uit waarom die snelheid zeer groot moet zijn.

Bij de botsing met de plutoniumkern ontstaat de in het artikel genoemde isotoop en komen er nog enkele deeltjes vrij.

- 3p **b** Ga na welke deeltjes vrijkomen. Stel daartoe de bijbehorende reactievergelijking op.

Het nieuw gevormde element is radioactief. In het artikel wordt gesproken over de levensduur van het nieuwe element. Onder de levensduur van een aantal radioactieve deeltjes verstaat men de tijd die verloopt tot er nog maar 37% van het oorspronkelijke aantal deeltjes over is.

- 4p **c** Bereken met dit gegeven hoe lang het duurt totdat 75% van het aantal deeltjes van het gevormde element vervallen is.

Protonentherapie

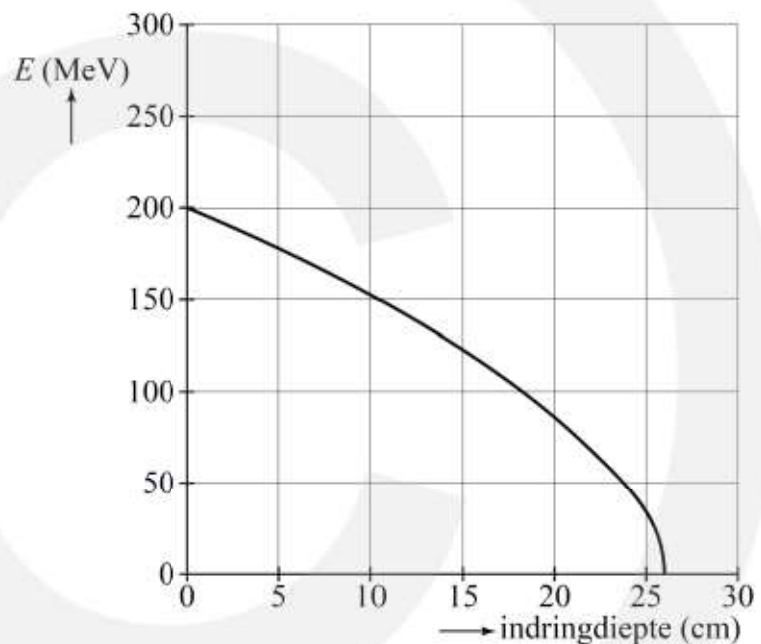
Protonentherapie

Voor het bestralen van tumoren maakt men meestal gebruik van gammastraling. Onderzoekers pleiten voor de bouw van drie centra in Nederland voor bestraling met protonen. Zij hebben het gedrag van protonen in water onderzocht en beweren dat deze manier voordelen heeft boven bestralen met gammastraling.

Onderzoek naar protonen in water is van belang voor eventuele medische toepassingen, omdat protonen zich in water hetzelfde gedragen als in biologisch weefsel.

In figuur 1 is de energie van protonen uitgezet tegen de indringdiepte. Het gaat hier om protonen die met een energie van 200 MeV water binnendringen.

De energieafname per centimeter wordt "stopping power" genoemd met de eenheid MeV cm^{-1} . Uit figuur 1 is af te leiden dat de stopping power aan het begin veel kleiner is dan aan het eind.



Figuur 1

- 3p a Bepaal met behulp van figuur 1 tot welke indringdiepte de stopping power voor deze protonen in water kleiner is dan 10 MeV cm^{-1} .

In een onderzoek naar de bestraling van tumoren doet men een experiment waarbij een bolletje paraffine beschoten wordt met protonen. Het bolletje is bevestigd op een plaat. Het geheel bevindt zich in een bak met water. Zie figuur 2.



Figuur 2

Protonen gedragen zich in paraffine hetzelfde als in water. Men stelt drie eisen aan de bestraling:

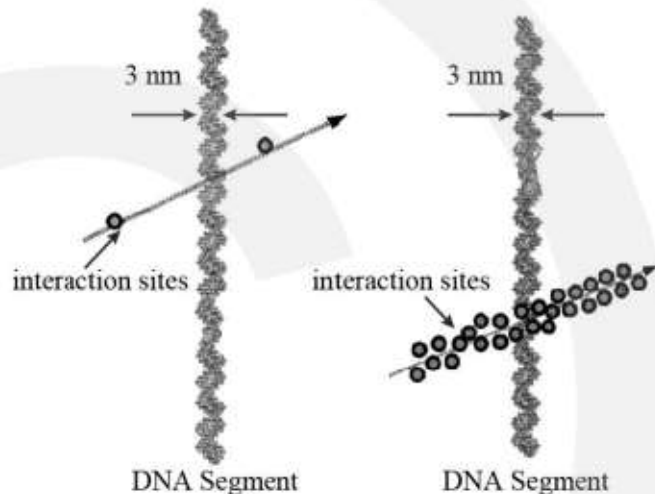
- het water ontvangt een lage stralingsdosis;
- het bolletje ontvangt een hoge stralingsdosis;
- de plaat ontvangt een stralingsdosis gelijk aan nul.

- 3p **b** Leg uit dat de linkerkant van de plaat zich moet bevinden op een afstand van 26 cm van de plaats waar de protonen het water binnenkomen. Bespreek daarbij alle drie de eisen.

Protonen met een hogere beginenergie komen in water verder dan protonen met een lagere beginenergie. Stel dat men de plaat met het bolletje 10 cm meer naar links zou plaatsen.

- 2p **c** Welke beginenergie moeten de protonen hebben om opnieuw aan dezelfde eisen te voldoen?

De protonen geven hun energie af door interactie met watermoleculen. Gemiddeld wordt per interactie een energie van 72 eV afgegeven. In figuur 3 zijn twee segmenten getekend van een DNA-keten. De pijl stelt de baan van een proton voor.

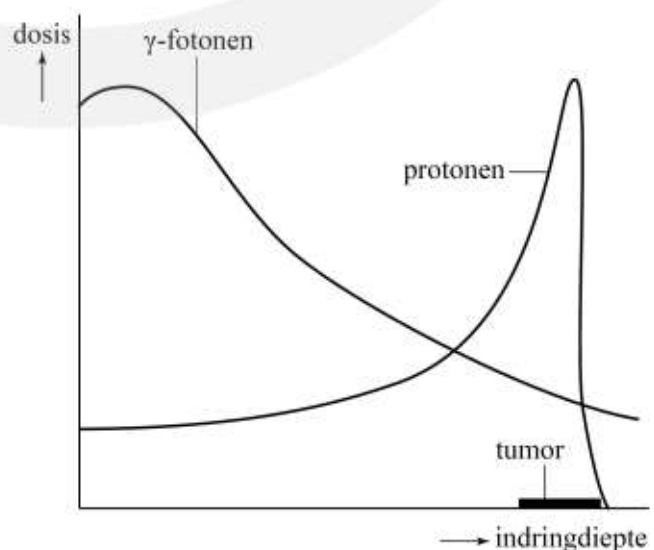


Figuur 3

Bij het linker DNA-segment is de stopping power klein, ongeveer $2,5 \text{ MeV cm}^{-1}$, en liggen twee opeenvolgende interacties op nanoschaal betrekkelijk ver uit elkaar. Bij het rechter DNA-segment is de stopping power groot, namelijk 800 MeV cm^{-1} , en liggen de interacties zo dicht op elkaar dat een gebiedje met de breedte van een DNA-keten op meerdere plaatsen geraakt wordt.

- 2p **d** Maak met een berekening aannemelijk dat bij het rechter DNA-segment het aantal "interaction sites" goed is weergegeven.

Op verschillende plaatsen in de wereld worden hoogenergetische protonen al gebruikt om tumoren te bestralen. Ook in Nederland is de protonentherapie in opkomst. Voorstanders wijzen op de voordelen die de bestraling met protonen heeft ten opzichte van bestraling met gammastraling (fotonen). Hun argumenten worden gevisualiseerd weergegeven in figuur 4.



Figuur 4

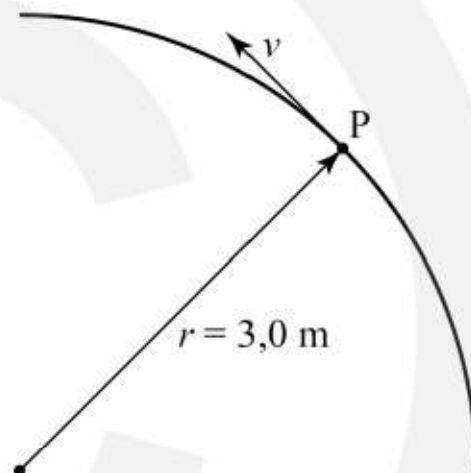
- 1p **e** Leid uit figuur 4 één voordeel af van protonenbestraling ten opzichte van bestraling met fotonen.

Bij een buitenlandse kliniek voor radiotherapie bij kinderen behandelt men tumoren die vlak onder de huid zitten. Daarvoor gebruikt men protonen met veel minder energie. De kliniek beschikt over een protonenversneller die protonen levert met een snelheid van $9,0 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$. De protonen worden vanuit stilstand versneld in een elektrisch veld.

- 4p **f** Bereken de grootte van de spanning, waarmee deze protonen versneld worden.
- 1p **g** Hoe groot is de energie in MeV waarmee de protonen de versneller verlaten?

Op weg van de protonenversneller naar de behandelkamer worden de protonen afgebogen. Daarvoor zijn sterke afbuigmagneten nodig.

We beschouwen protonen die daarbij een deel van een cirkelbaan doorlopen waarvan de straal 3,0 m bedraagt. Zie figuur 5.



Figuur 5

- 3p **h** Bepaal in figuur 5 de richting van het magnetisch veld in de afbuigmagneten. Geef daartoe eerst de richting van de stroomsterkte en van de lorentzkracht aan.
- 4p **i** Bereken de sterkte van het magnetisch veld die nodig is om deze protonen deze baan te laten doorlopen.

Splijfstof in kerncentrale (aangepast)

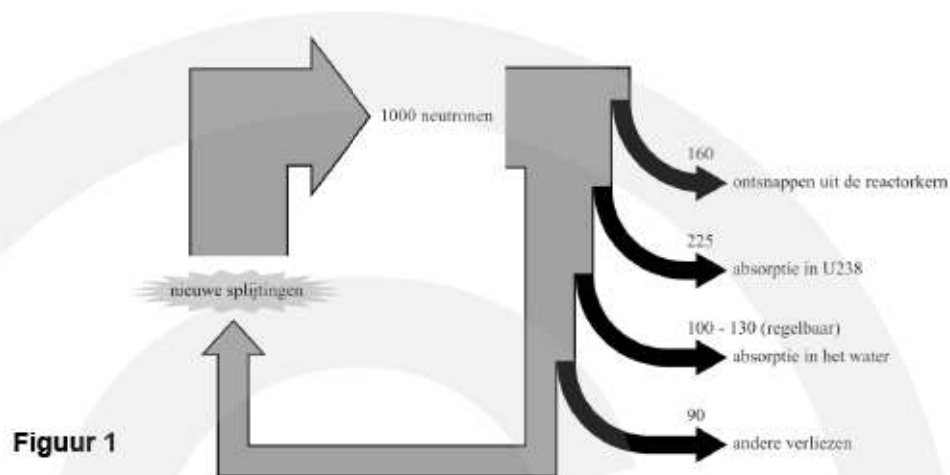
Als splijfstof in een kernreactor wordt uranium-235 gebruikt. De kern hiervan splijt als er een neutron wordt ingevangen. Hierbij ontstaan twee nieuwe kernen en een aantal nieuwe neutronen. Bij een bepaalde splijting ontstaan twee nieuwe neutronen en is barium-147 een van de splijtingsproducten.

- 3p **a** Geef de reactievergelijking van deze splijting.

De totale massa van de splijtingsproducten is kleiner dan de totale massa vóór de splijting. Gemiddeld bedraagt dit massaverschil 0,21 u per reactie. Het gemiddelde vermogen van de kernenergie in een kerncentrale bedraagt 1,8 GW.

- 5p **b** Bereken hoeveel kilogram uranium-235 hierbij per jaar wordt verbruikt.

Gemiddeld ontstaan er per splijting 2,50 nieuwe neutronen. Een kernreactor bevat regelstaven om in noodgevallen snel neutronen te kunnen absorberen. Voor het regelen van de kettingreactie gebruikt men niet de regelstaven maar water met daarin opgelost boorzuur. In figuur 1 is dit schematisch weergegeven. Om het proces inzichtelijk te maken is uitgegaan van 1000 nieuwe neutronen.



Deze 1000 nieuwe neutronen zijn lang niet allemaal beschikbaar om een nieuwe splijting te veroorzaken. De getallen in het schema geven aan welke verliezen er optreden. Het neutronenverlies in het water wordt binnen de aangegeven grenzen geregeld door meer of minder boorzuur aan het water toe te voegen. Het element boor is namelijk een sterke neutronen-absorbeerder.

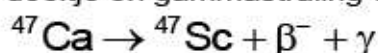
- 3p **c** Bepaal de waarde van de 'absorptie in het water' om de reactor in kritische toestand te laten werken.

Door boorzuur toe te voegen kan een neutron worden ingevangen door een kern van boor-10. De volgende reactie treedt op: $^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^3_1\text{H} + 2 \cdot ^4_2\text{He}$

- 4p **d** Bereken of er bij deze reactie energie vrijkomt of wordt geabsorbeerd én hoeveel MeV energie dat is.

Onderzoek van bot met calcium-47

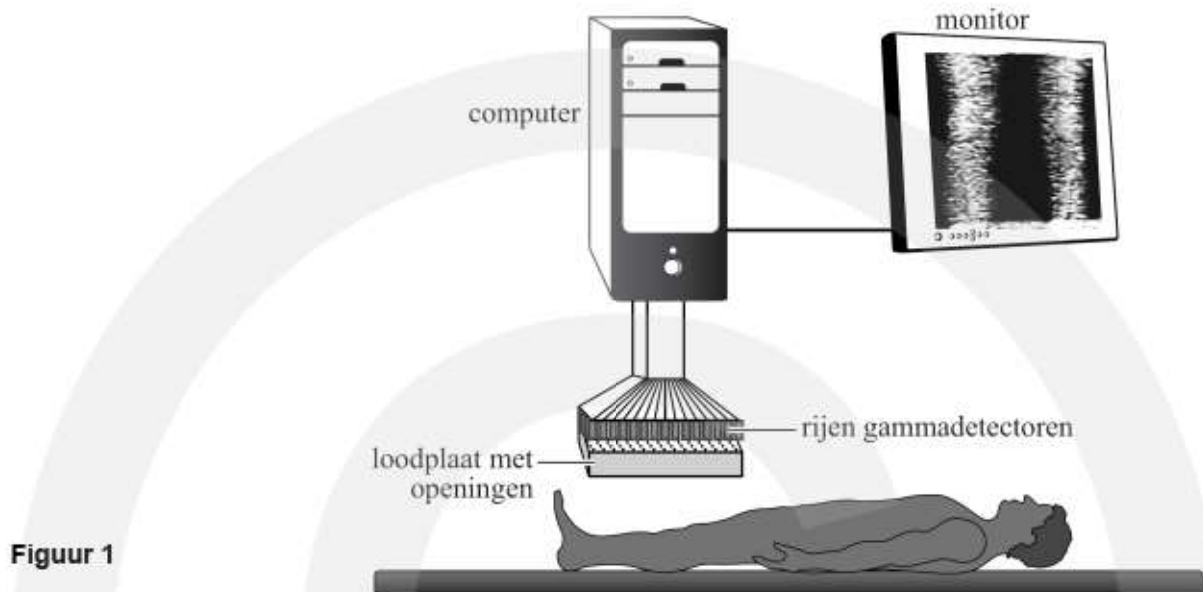
Bij In deze opgave bekijken we een patiënt waarbij de botten in de benen worden onderzocht. Hierbij gebruikt men calcium omdat dit gemakkelijk door het lichaam opgenomen en getransporteerd wordt naar de botten. De patiënt krijgt een hoeveelheid van de instabiele isotoop calcium-47 toegediend, die bij verval een bèta-min-deeltje en gammastraling uitzendt:



De gammastraling kan buiten het lichaam gedetecteerd worden. De arts kan zo zien of er met de botten iets bijzonders aan de hand is. Bij het begin van het onderzoek krijgt de patiënt een hoeveelheid calcium-47 toegediend met een activiteit van 2,5 MBq.

- 4p **a** Bereken de massa in kg van het calcium-47.

De benen van de patiënt worden onder een apparaat gelegd dat gammastraling meet. Zie figuur 1.



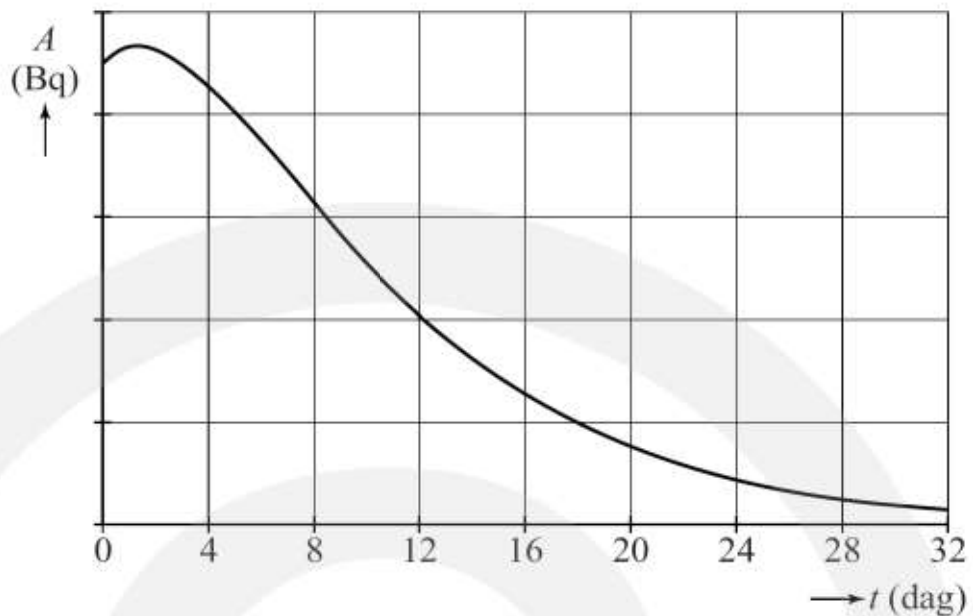
In het apparaat zijn honderden gammadetectoren in rijen naast elkaar geplaatst. Onder de gammadetectoren bevindt zich een dikke loden plaat. Onder elke gammadetector zit in de plaat een smal gat. Elke gammadetector registreert alleen de straling die uit het deel van het been recht onder de detector komt.

- 1p **b** Waarom is het gewenst dat die alleen van recht onder komt?

Voor het maken van het beeld van het bot worden de gegevens door de computer verwerkt. Voor verschillende delen van de benen verschilt de absorptie van gammastraling in het spierweefsel en in de lucht tussen de detector en het been. Om de metingen van het been te kunnen vergelijken, moet voor die absorptie gecorrigeerd worden. Daarvoor vermenigvuldigt de computer de meetwaarde van elke detector met een correctiefactor. Als er geen absorptie optreedt, levert dat een correctiefactor 1. Neem aan dat zich tussen een gammadetector en het bot 10 cm lucht en 4,5 cm spierweefsel bevindt. De absorptie in spierweefsel is gelijk aan die in water. Ga uit van een gamma-foton met een energie van 1,0 MeV.

- 5p **c** Bereken de grootte van de correctiefactor voor die detector.

Een nadeel van deze onderzoeksmethode is de stralingsbelasting van het bot. Deze ontstaat voornamelijk door absorptie van bèta-min-deeltjes. Deze zijn niet alleen afkomstig van calcium-47 maar ook van scandium-47 (dat ontstaat bij het verval van calcium-47). Figuur 2 toont het verloop van de gezamenlijke activiteit van beide isotopen in het bot van het bovenbeen.



Figuur 2

- 3p **d** Beredeneer aan de hand van het verloop van figuur 2 of de halveringstijd van scandium-47 groter of kleiner is dan de halveringstijd van calcium-47.

De nucleaire diagnostiek zoals die hierboven beschreven is, laat plaatsen van het bot zien waar iets bijzonders aan de hand is. Die informatie kan niet worden verkregen met behulp van echoscopie of een MRI-scan.

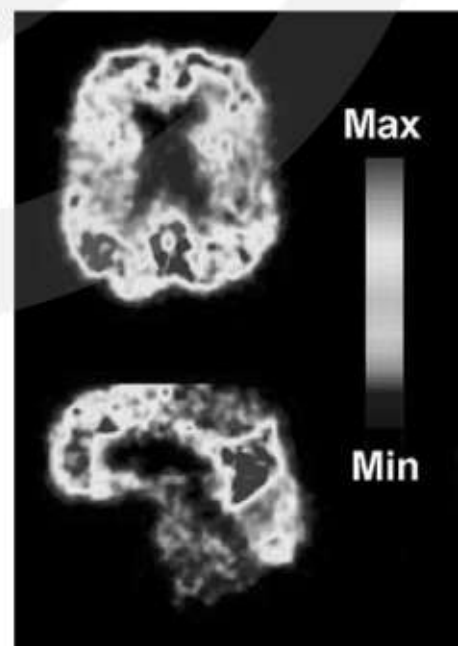
- 2p **e** Beargumenteer dit voor deze beide technieken.

PET-scan

Bij onderzoek naar de ziekte van Alzheimer wordt de PET-scan gebruikt. Daarbij spuit men bij de patiënt een speciale stof in die het C-11-isotoop bevat. Deze stof bindt het C-11-isotoop aan plaatsen in de hersenen waar de oorzaak van de ziekte van Alzheimer zit. Figuur 1 toont een voorbeeld van zo'n PET-scan.

Het C-11-isotoop verkrijgt men door versnelde protonen op N-14 te schieten.

- 2p **a** Geef de kernreactievergelijking van de productie van het C-11-isotoop uit N-14.

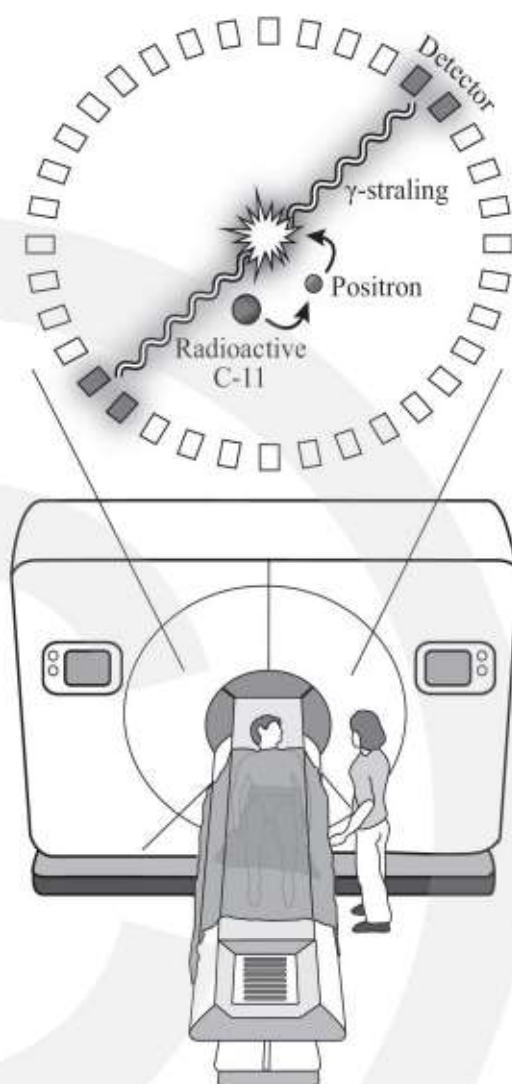


Figuur 1

Het C-11-isotoop vervalst onder uitzending van een positron. Het positron dat ontstaat remt in het hersenweefsel af tot (bijna) stilstand, en annihileert dan met een elektron. Daarbij worden twee gammafotonen met dezelfde frequentie in tegengestelde richting uitgezonden. Zie figuur 2.

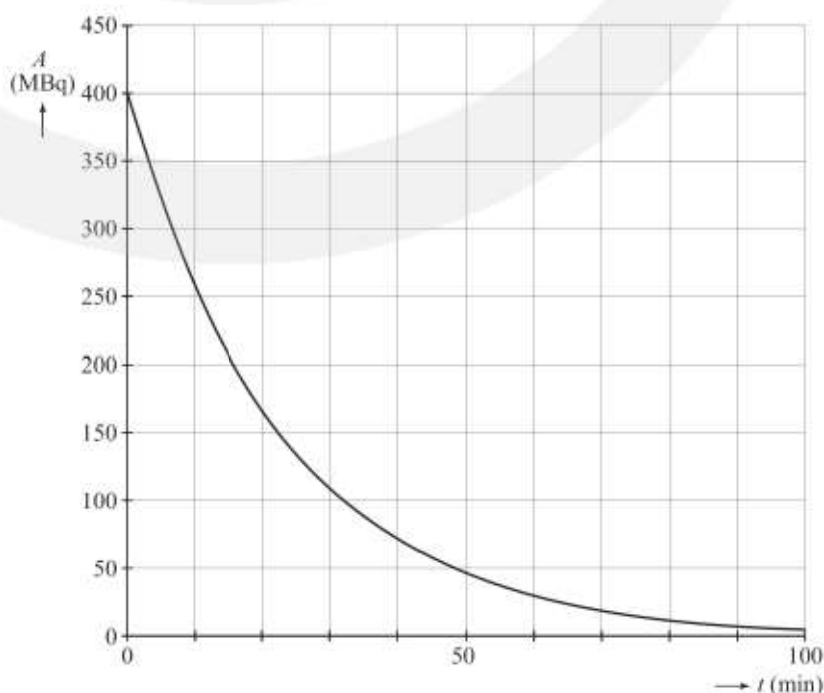
Als twee gamma-fotonen binnen een tijdsduur Δt de ringvormige detector bereiken, neemt men aan dat ze afkomstig zijn van dezelfde annihilatie. Een computer verwerkt de gegevens tot een plaatje zoals in figuur 1.

- 3p **b** Bereken de orde van grootte van de tijdsduur Δt . Maak daarbij gebruik van een schatting en neem aan dat de fotonen overal bewegen met de lichtsnelheid in vacuüm.



Figuur 2

De stralingsbelasting bij een PET-scan voor de patiënt is het gevolg van het afremmen van de positronen. De stralingsbelasting ten gevolge van de gammastraling is te verwaarlozen. In figuur 3 staat de grootte van de activiteit van de ingespoten stof in de hersenen uit tegen de tijd.



Figuur 3

De massa van de hersenen is 1,5 kg. De gemiddelde energie die een positron door het afremmen aan het hersenweefsel afgeeft, bedraagt 0,4 MeV.

- 4p **c** Bepaal de stralingsdosis die de hersenen ontvangen.

Voor het vaststellen van de ziekte van Alzheimer zijn een röntgenfoto of echografie niet geschikt.

- 2p **d** Geef hiervoor, voor beide genoemde technieken, een reden. Gebruik de informatie in Binas tabel 29.