

10 Kernfysica

havo

10.1 Radioactieve straling

- 1* Een atoom is opgebouwd uit deeltjes.
- Uit welke deeltjes bestaat de atoomkern.
 - Welke deeltjes bevinden zich in schillen om de atoomkern.
- 2*
- Hoeveel protonen, neutronen en elektronen zijn er aanwezig in ${}^7\text{Li}$?
 - Hoeveel protonen, neutronen en elektronen zijn er aanwezig in ${}^{40}\text{Ar}$?
 - Hoeveel protonen, neutronen en elektronen zijn er aanwezig in ${}^{238}\text{U}$?
- 3*
- De atoomkern van het radioactieve element plutonium (Pu) bevat veel kerndeeltjes.
- Zoek het atoomnummer van Pu op.
 - Leg uit hoeveel protonen er in een Pu kern zitten.
Eén proton heeft een lading van $1,6022 \cdot 10^{-19}$ C.
 - Bereken de lading van een Pu kern.
 - Leg uit hoeveel elektronen een Pu atoom heeft.
 - Bereken het aantal neutronen in een Pu-244 kern.
 - Zoek op welk type straling Pu voornamelijk uitzendt.
- 4*
- Noem de drie verschillende soorten radioactieve straling.
 - 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.

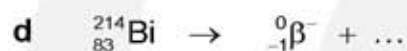
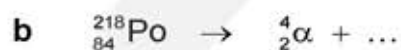
- 7**** Het element neptunium heeft twee isotopen, die beide radioactief zijn.
- a Zoek van ieder isotoop op welke straling hij uitzendt.
 - b Stel voor het verval van beide isotopen de reactievergelijking op.

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.
- Leg uit wat een isomeer is.
 - Leg uit dat krypton-81m niet kan ontstaan uit β^- verval.
 - Leg uit dat krypton-81m ook niet kan ontstaan uit β^+ verval.
 - Geef de vervalvergelijking van krypton-81m.

Herhaling

- 1*** Een atoom is opgebouwd uit deeltjes.
- Uit welke deeltjes bestaat de atoomkern.
 - Welke deeltjes bevinden zich in schillen om de atoomkern.

- 2*** Vul de tabel in.

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	

3* Geef het aantal protonen en noteer het isotoop in de juiste notatie.

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		14		
kalium K		22		
ijzer Fe		33		
zilver Ag		63		
kwik Hg		123		
lood Pb		132		

- 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?

10.2 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?

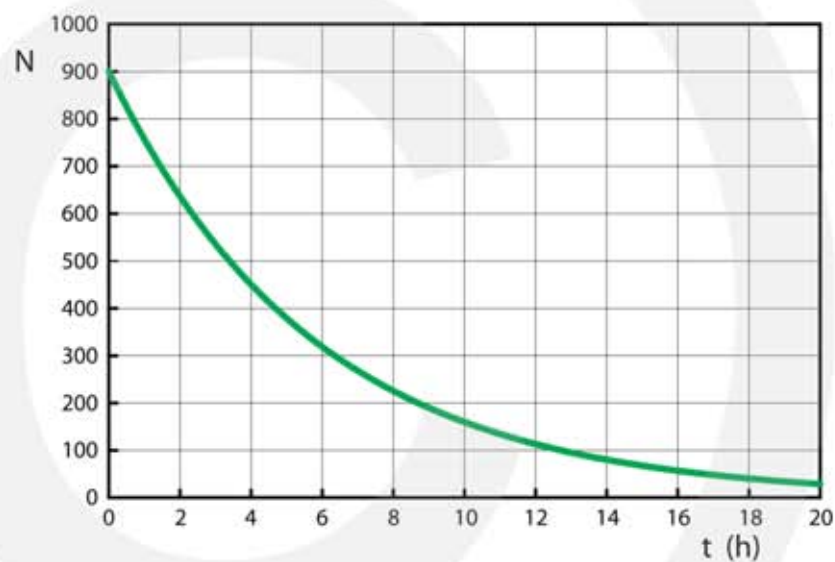
- 5**** De isotoop P-33 wordt kunstmatig gemaakt.
- Zoek de halveringstijd van P-33 op.
 - Na hoeveel tijd is de 75% van het gemaakte P-33 vervallen?
 - Na hoeveel tijd is van het gemaakte P-33 nog 12,5% over?
- 6**** Een archeoloog gebruikt C-14 om de ouderdom van een prehistorische ploeg te bepalen. De hoeveelheid C-14 in de ploeg is een kwart van de hoeveelheid C-14 in vers hout.
- Zoek de halveringstijd van C-14 op.
 - Hoe oud is de ploeg?
- 7**** Een patiënt krijgt ^{131}I (jood-131) toegediend.
- Hoelang duurt het totdat de radioactiviteit in haar lichaam afkomstig van ^{131}I is gedaald tot 25% van de oorspronkelijke hoeveelheid?
 - 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?



- 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?

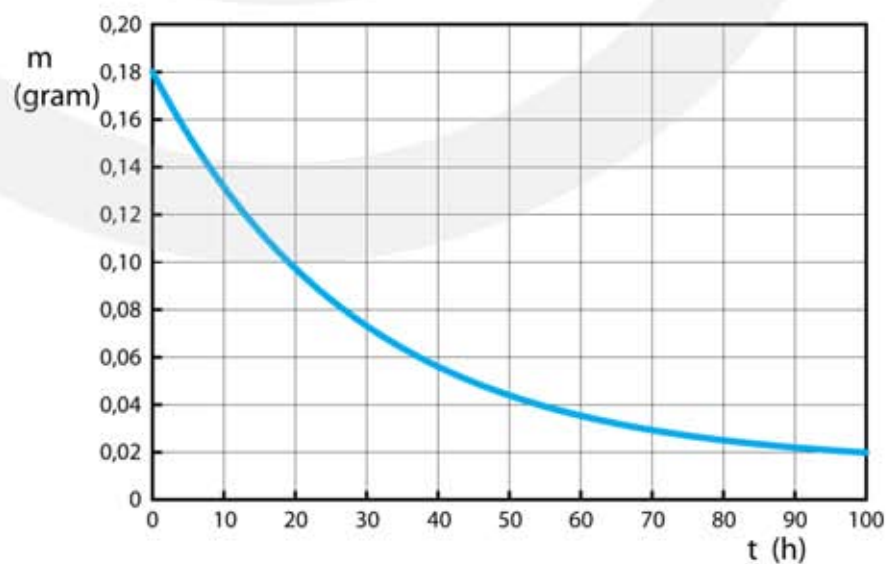
10** De figuur is het (N-t)-diagram van een radioactief isotoop.

- 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 1024 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.

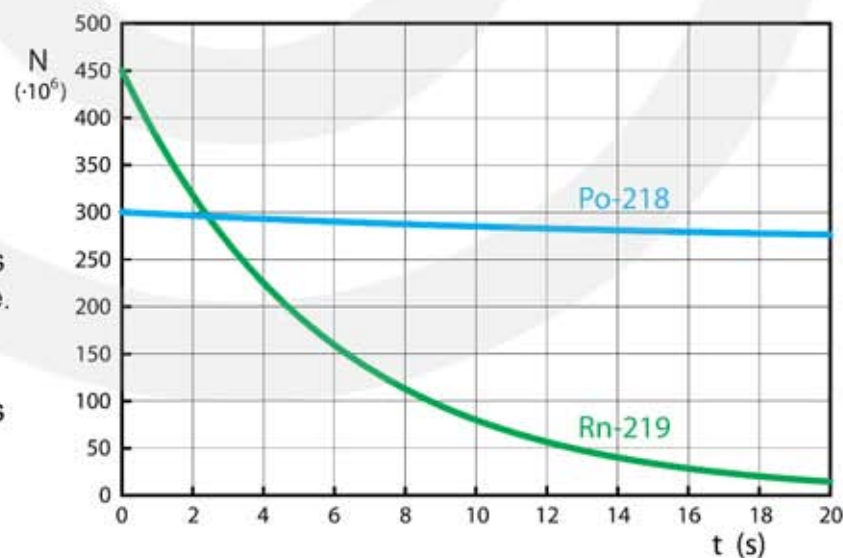
- Zoek de halveringstijden van ^{82}Br en ^{65}Ni op.
- Leg uit welk isotoop de grootste stabiliteit heeft.
- Leg uit welk isotoop de grootste activiteit heeft op $t = 0$.
- Verklaar waarom de activiteit van beide stoffen afneemt in de tijd.
- Leg uit bij welk isotoop de afname het snelst verloopt.

21*** Eén gram $^{131}_{53}\text{I}$ (jood-131) bevat $4,60 \cdot 10^{21}$ atomen

- Bereken de activiteit van 1 gram ^{131}I .
- Bereken de activiteit van 5 gram ^{131}I .
- Bereken na hoeveel tijd er nog 1/64 deel van de activiteit over is.
- Bereken na hoeveel tijd 87,5% van het ^{131}I is vervallen.

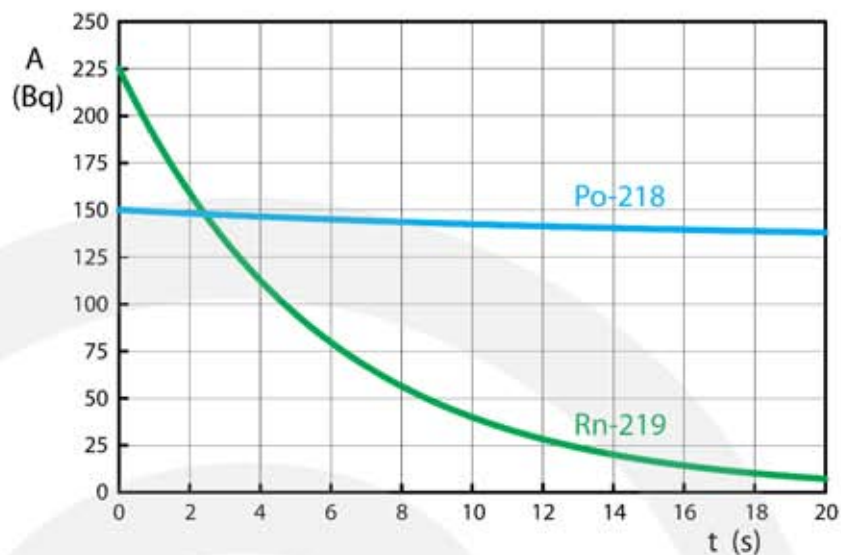
22*** De figuur is het (N, t)-diagram van het verval van Rn-219 (radon) en van Po-218 (polonium).

- Bepaal de activiteit van Rn-219 op $t = 8,0$ s met de raaklijnmethode.
- Bepaal de activiteit van Rn-219 op $t = 8,0$ s met de afleesmethode.
- Bepaal de gemiddelde activiteit van Rn-219 tussen $t = 0$ en $t = 16$ s.
- Bepaal de activiteit van Po-218 op $t = 8,0$ s met de raaklijnmethode.
- Bepaal de activiteit van Po-218 op $t = 8,0$ s met de afleesmethode.
- Bepaal de gemiddelde activiteit van Po-218 tussen $t = 0$ en $t = 20$ s.



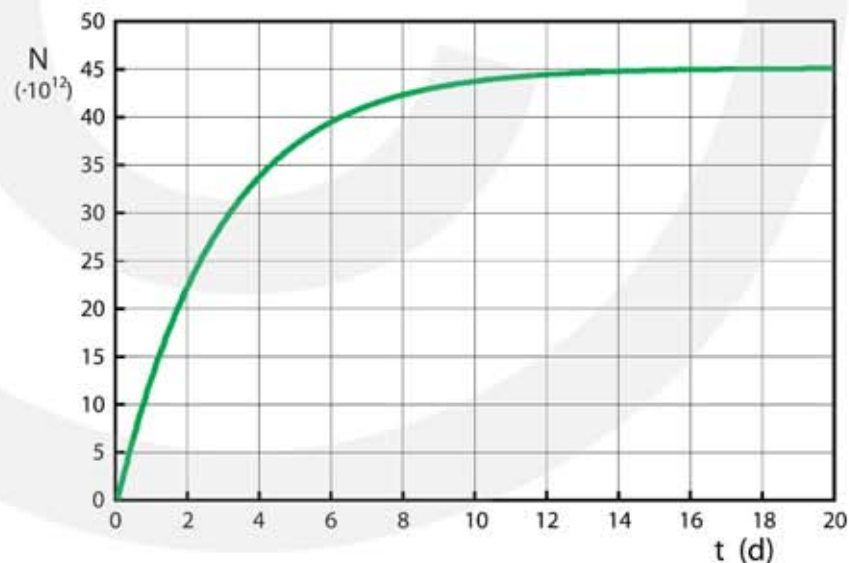
23*** De figuur is het (A, t)-diagram van het verval van Po-218 (polonium) en Rn-219 (radon).

- 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 afleesmethode.
- 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.



Herhaling

1* Bereken de machten van 2 tot aan de 10^e macht:

$$2^1 = 2$$

$$2^6 =$$

$$2^2 = 2 \cdot 2 = 4$$

$$2^7 =$$

$$2^3 = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$$

$$2^8 =$$

$$2^4 =$$

$$2^9 =$$

$$2^5 =$$

$$2^{10} =$$

2* Bereken de machten van $\frac{1}{2}$ tot aan de 10^e macht:

$$\left(\frac{1}{2}\right)^1 = \frac{1}{2}$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^6 =$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^7 =$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^8 =$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^4 =$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^9 =$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^5 =$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{10} =$$

3* Maak berekeningen met: $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$

N	N ₀	n
62,5	$1,0 \cdot 10^3$	4
	$1,0 \cdot 10^3$	6
	$1,0 \cdot 10^6$	12
	$1,28 \cdot 10^6$	7
	$1,28 \cdot 10^6$	8
$6,4 \cdot 10^5$	$5,12 \cdot 10^6$	
$2,0 \cdot 10^4$	$5,12 \cdot 10^6$	

4* Maak berekeningen met $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N$

A	$t_{1/2}$	N
138,6	5 s	1000
	50 s	1000
	5 min	$1,0 \cdot 10^6$
	2,0 uur	$1,0 \cdot 10^6$
	2,0 jaar	$1,0 \cdot 10^6$
	3000 jaar	$1,0 \cdot 10^9$
	$1,0 \cdot 10^9$ jaar	$1,0 \cdot 10^{25}$

5* Maak berekeningen met $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N$

A	$t_{1/2}$	N
138,6	5 s	1000
200		1000
200		$1,0 \cdot 10^6$
2000		$1,0 \cdot 10^6$
$1,0 \cdot 10^4$		$1,0 \cdot 10^6$
$1,0 \cdot 10^5$		$1,0 \cdot 10^6$
$1,0 \cdot 10^6$		$1,0 \cdot 10^6$

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 $^{131}_{53}\text{I}$ (jood-131) en $^{32}_{14}\text{Si}$ (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.



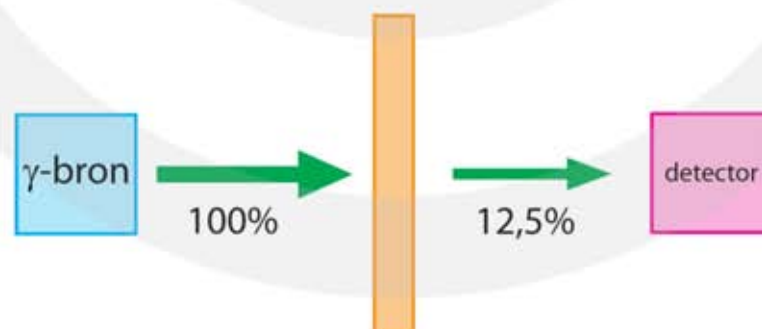
- a Geef de vervalreactie van Am-241.
- b Leg uit of de activiteit van americium-241 na 20 jaar veel of weinig is veranderd.

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 5,0 mm. Een plaatje van deze stof staat voor een γ -bron. Achter het plaatje staat een detector.

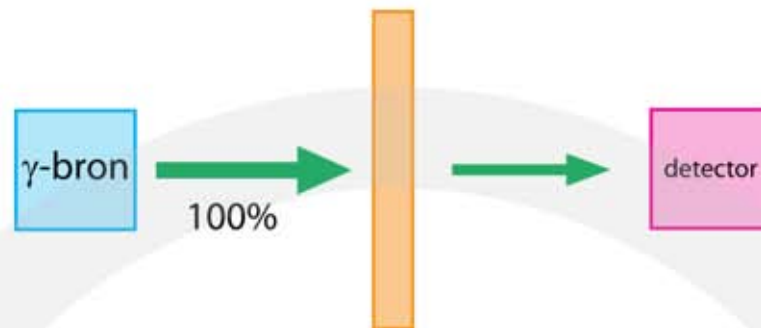


- a Hoe dik is het plaatje als 12,5% van de straling in de detector komt?

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?

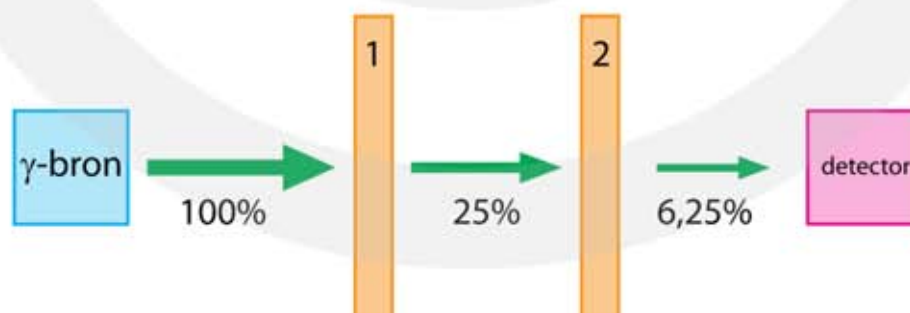
Een plaatje met een andere dikte houdt 87,5% van de straling tegen.

b Hoe dik is dit plaatje?

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



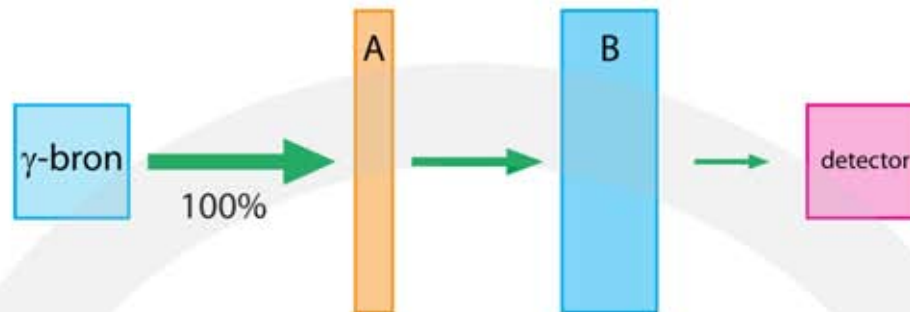
Na het eerste plaatje is nog 25% van de straling aanwezig.

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 2,0 mm. Stof B heeft een halveringsdikte van 5,0 mm.



Plaatje A heeft een dikte van 4,0 mm en plaatje B heeft een dikte van 15 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 25 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 0,079 cm.

De röntgenstraling waarmee wordt gewerkt, heeft een energie van 0,05 MeV.

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



Herhaling

1* Maak berekeningen met $I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$

I	I_0	n
62,5	500	3
	$1,0 \cdot 10^3$	2
	$1,0 \cdot 10^6$	5
	$1,28 \cdot 10^6$	7
$2,0 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^4$	
$6,4 \cdot 10^5$	$5,12 \cdot 10^6$	
$2,0 \cdot 10^4$	$5,12 \cdot 10^6$	

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 geiger-müllerteller (GM-teller) mee.

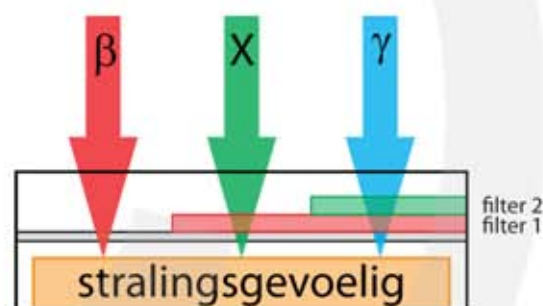
b Leg uit waarom dit niet nodig is.

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.

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** **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 de dosisequivalent die de monteur na 1 uur werken ontvangt.

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

b Bereken de dosisequivalent die 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 loodschoort. 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 stralingsweefactor is 1.

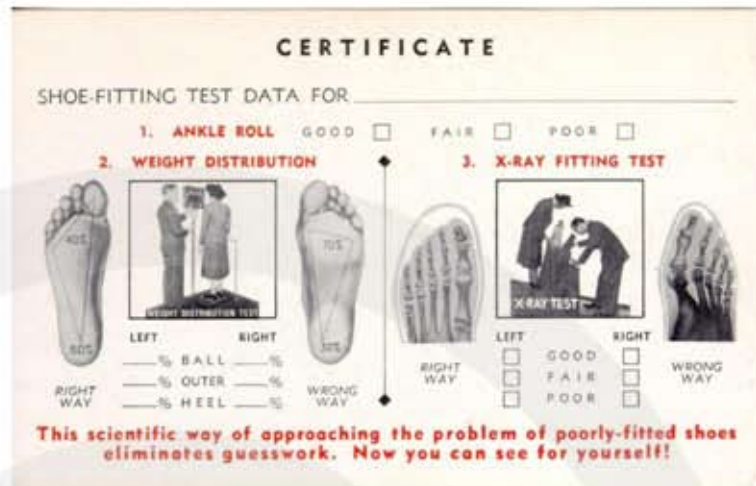
b Bereken hoeveel uur een stewardess per week gemiddeld moet vliegen om de stralingsnorm te overschrijden.



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.



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.

Volgens de Nederlandse regelgeving mag het 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.

Herhaling

1* Maak berekeningen met: $D = \frac{E_{\text{abs}}}{m}$ | $1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

D	E_{abs}	m
$5,0 \cdot 10^{-4} \text{ Gy}$	$1,0 \cdot 10^{-6} \text{ J}$	20 kg
	$1,5 \cdot 10^{-6} \text{ J}$	5 kg
	25 mJ	5 kg
	35 μJ	15 gram
	400 MeV	0,50 gram
	560 MeV	0,20 mg
	850 MeV	1,7 μg

2* Maak berekeningen met: $D = \frac{E_{\text{abs}}}{m}$ | $1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

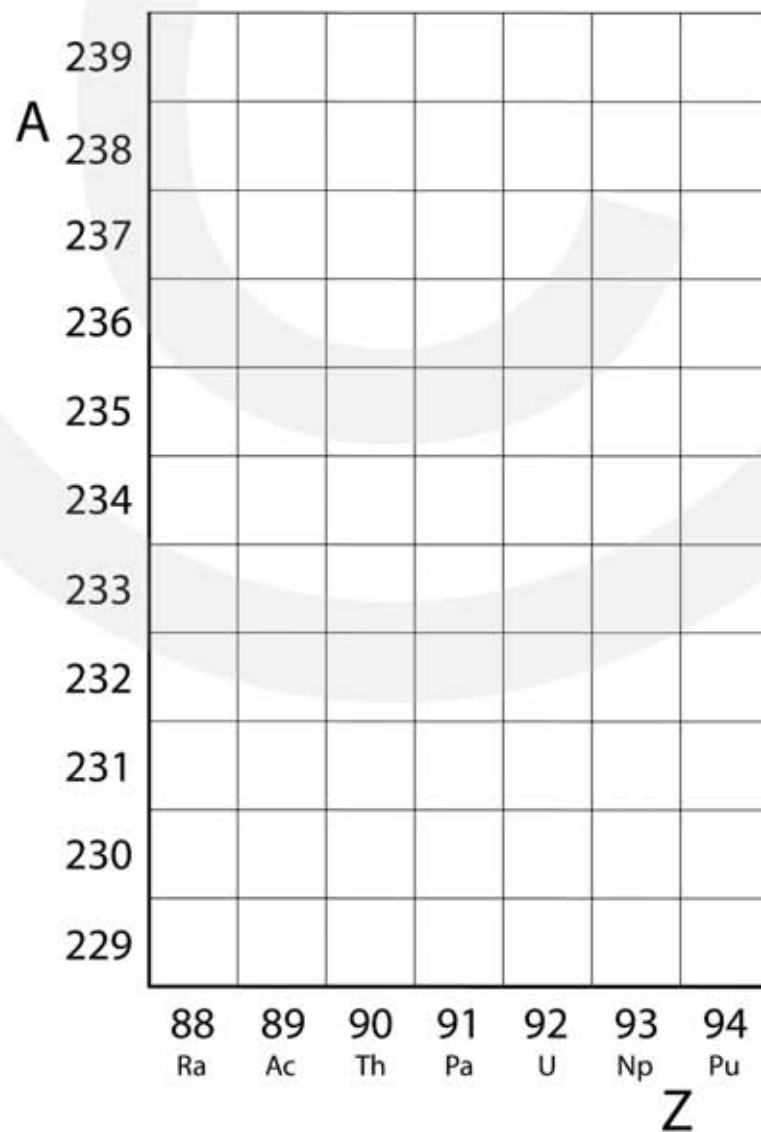
D	E_{abs}	m
$5,0 \cdot 10^{-4} \text{ Gy}$	$1,0 \cdot 10^{-2} \text{ J}$	20 kg
$5,0 \cdot 10^{-4} \text{ Gy}$		5 kg
$2,0 \cdot 10^{-2} \text{ Gy}$		15 kg
$4,5 \cdot 10^{-3} \text{ Gy}$		15 gram
$7,5 \cdot 10^{-5} \text{ Gy}$	$1,0 \cdot 10^{-6} \text{ J}$	
$3,1 \cdot 10^{-5} \text{ Gy}$	6,2 μJ	
$4,25 \cdot 10^{-10} \text{ Gy}$	$8,5 \cdot 10^{-14} \text{ J}$	
$8,0 \cdot 10^{-5} \text{ Gy}$	600 MeV	

10.6 Kernreacties

Vervalketen

1*** ${}_{92}^{238}\text{U}$ vervalt spontaan in vier stappen naar ${}_{90}^{230}\text{Th}$.

- 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.

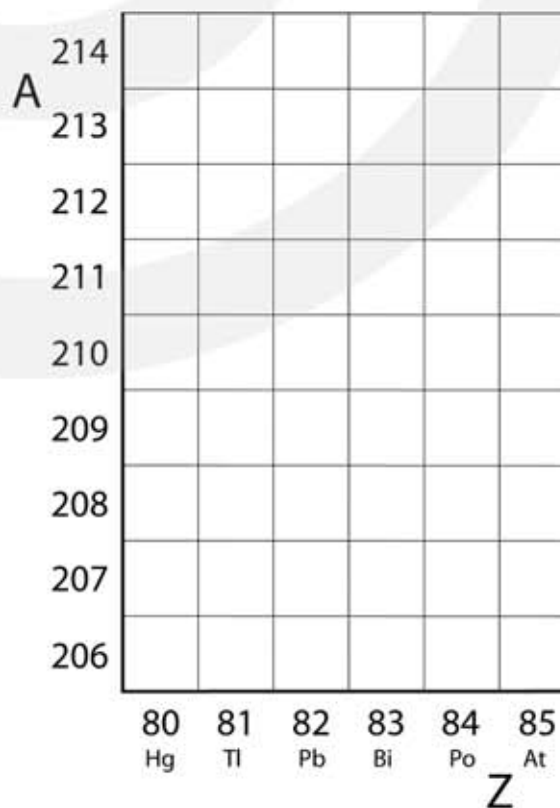


2*** Uranium-238 vervalt in een aantal stappen tot lood-206. Bij het verval worden zowel α -deeltjes als β^- -deeltjes uitgezonden.

- Leg uit of de verandering van het massagetal wordt veroorzaakt door het uitzenden van α -deeltjes of door het uitzenden van β^- -deeltjes.
- Bereken bij hoeveel stappen in de vervalreeks er een α -deeltje wordt uitgezonden.
- Bereken bij hoeveel stappen in de vervalreeks er een β^- -deeltje wordt uitgezonden.

3*** ${}_{83}^{212}\text{Bi}$ vervalt in twee stappen naar ${}_{82}^{208}\text{Pb}$. Bij het verval worden zowel α -deeltjes als β^- -deeltjes uitgezonden.

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

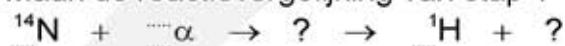


Gestimuleerde reacties

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: $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ?$

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.

10.7 Massa en energie

1*** Maak de reactievergelijkingen af. Zet op de stippellijnen 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 verbrandingswarmte 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**** 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.

Bij het verval van één Po-210 kern verdwijnt er $5,82 \cdot 10^{-3} \text{ u}$ ($= 9,66 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$)

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

4*** 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.

- Bepaal met welke deeltjes het beryllium is beschoten.
- Leg uit of bij deze kernreactie sprake is van massatoename of van massa-afname.
- Bereken het massadefect. Gebruik: $1 \text{ u} = 931,494 \text{ MeV}$.

Kernreactor

5**** 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 ${}_{55}\text{Cs}$.

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

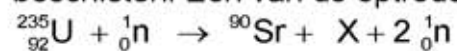
De gevormde middelgrote kernen zijn beide radioactief. Beide kernen sturen achter elkaar drie β -deeltjes uit waarbij uiteindelijk stabiele kernen ontstaan.

- Ga na welke stabiele kernen er uiteindelijk worden gevormd.

6*** 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.

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

7**** 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.

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

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 vervalt 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.

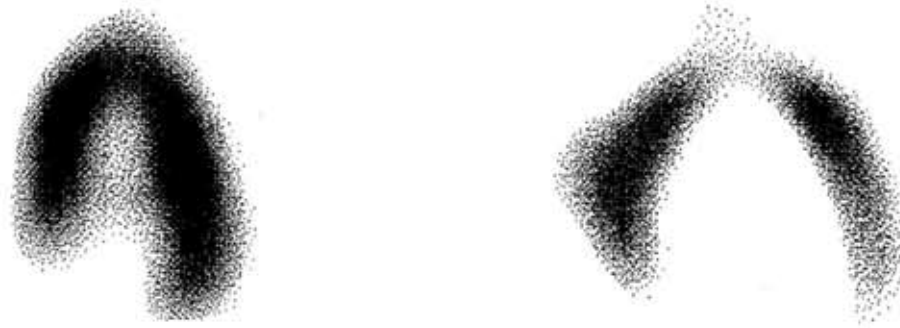
Iemand heeft gemiddeld 4,0 liter lucht in zijn longen. Die lucht bevat radongas waardoor het longweefsel aan straling bloot staat. Neem aan dat de gemiddelde activiteit van radon-222 gelijk is aan 29 Bq per m^3 lucht. De massa van het bestraalde longweefsel is 200 gram.

- 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.

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.

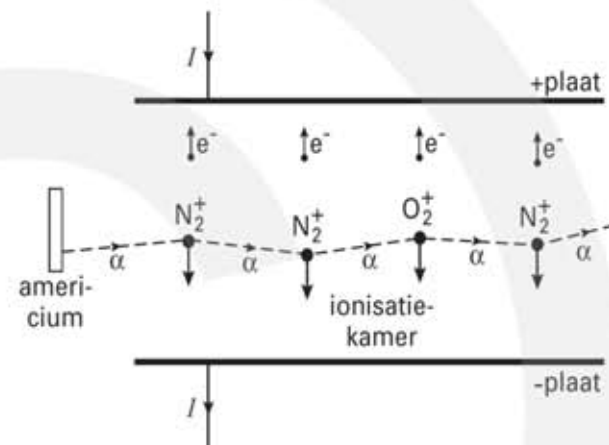
De uitgezonden α -deeltjes hebben elk een energie van 5,6 MeV.

- 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.

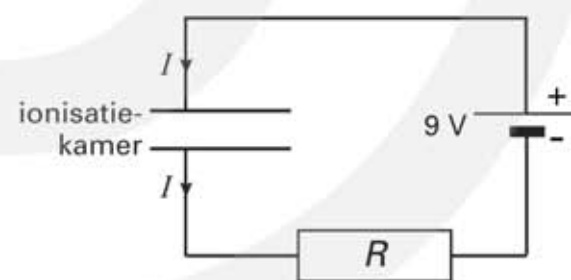
In figuur 2 is ook te zien dat het americium voor een opening in de ionisatiekamer is aangebracht.

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



Figuur 2

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.

Technetium-99

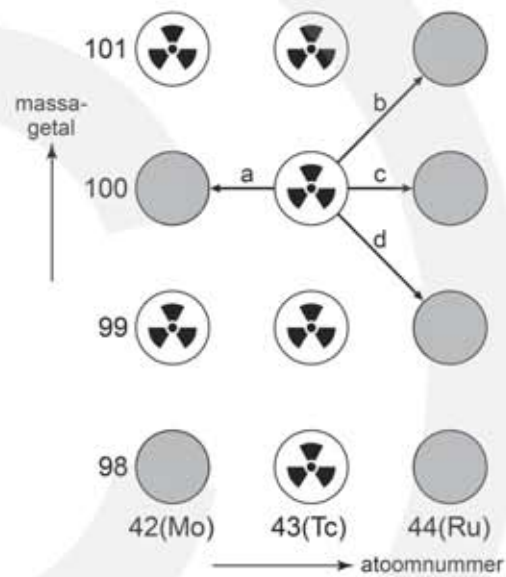
Radioactief afval van kerncentrales bevat een grote verscheidenheid aan radioactieve stoffen. Een van die stoffen is technetium-99 (Tc-99) dat een zeer lange halveringstijd heeft.

- 4p **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 vervalft. 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^- -vervalf voor van technetium-100.

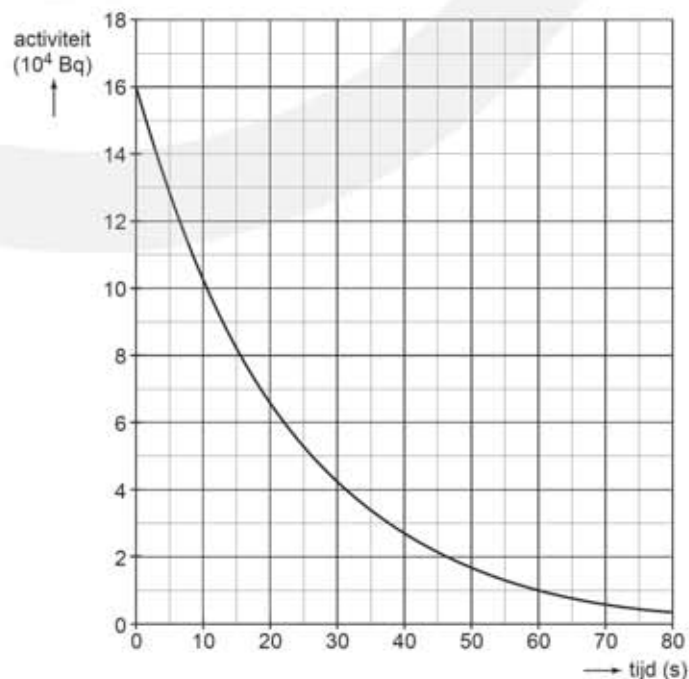


Figuur 1

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

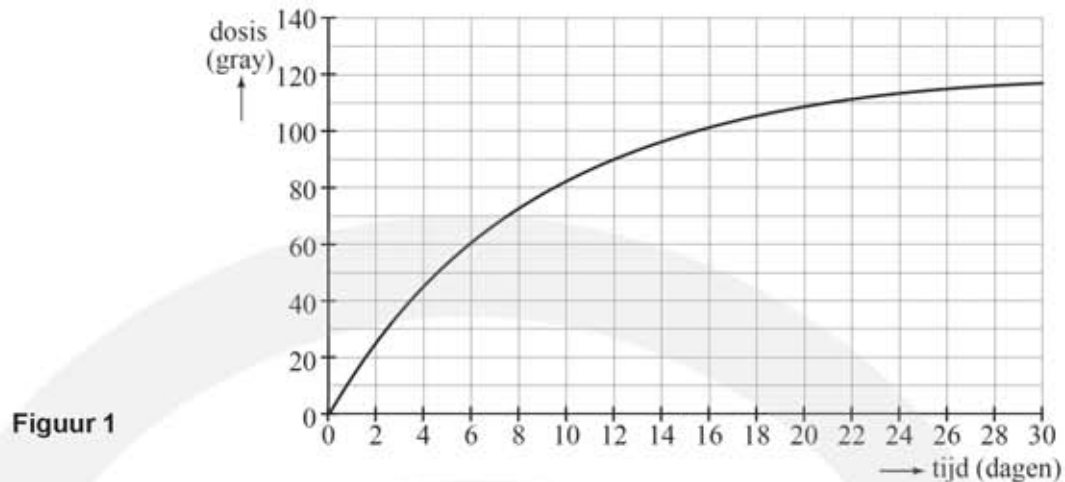
De straling beschadigt de schildkliercellen die het hardst werken.

- 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.



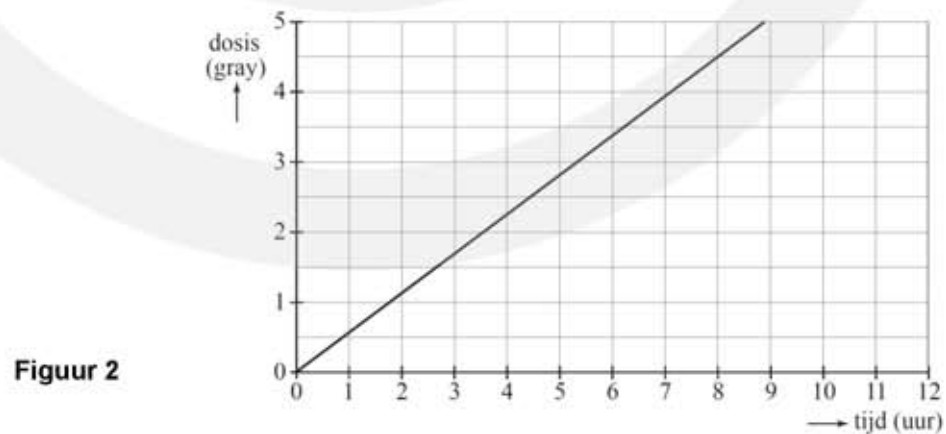
Op het tijdstip $t = 20$ d is de activiteit van het I-131 in de schildklier lager dan op het tijdstip $t = 2$ d.

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.



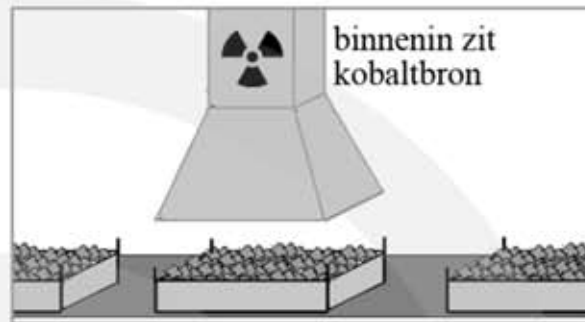
Per verval van een I-131-kern wordt $3,0 \cdot 10^{-14}$ J aan stralingsenergie door de schildklier geabsorbeerd. De massa van de schildklier is 45 gram.

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.



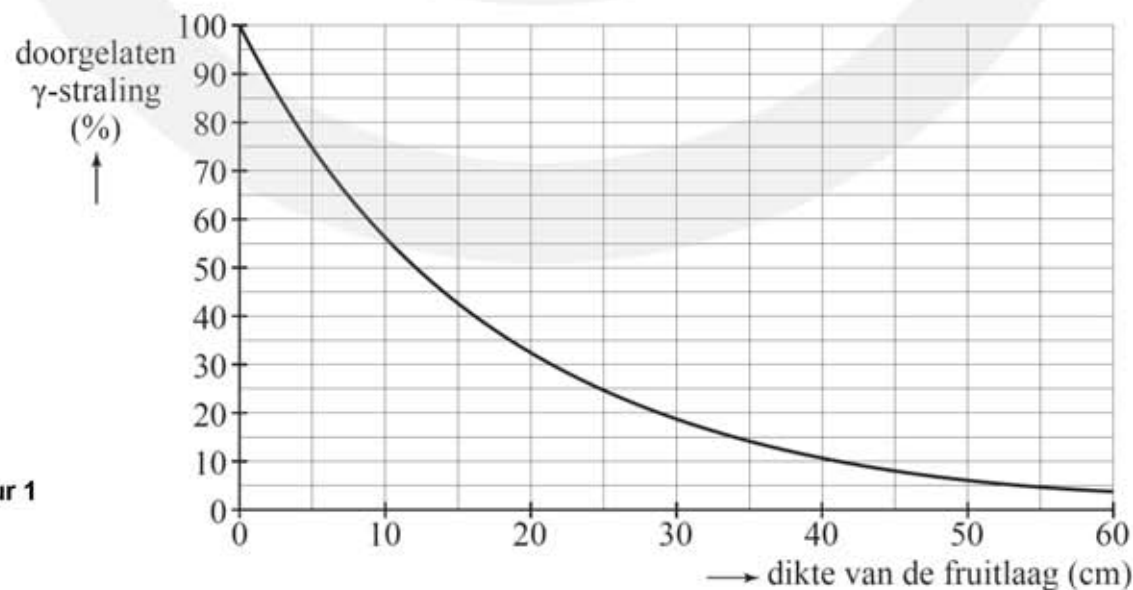
Als stralingsbron wordt ^{60}Co (kobalt-60) gebruikt dat bij verval β - en γ -straling uitzendt. De kistjes fruit komen via een lopende band onder de bestraler. Dan stopt de band even en wordt het fruit enige tijd doorstraald. Daarna schuift het volgende kistje onder de bestraler.

- 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.



Figuur 1

- 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?

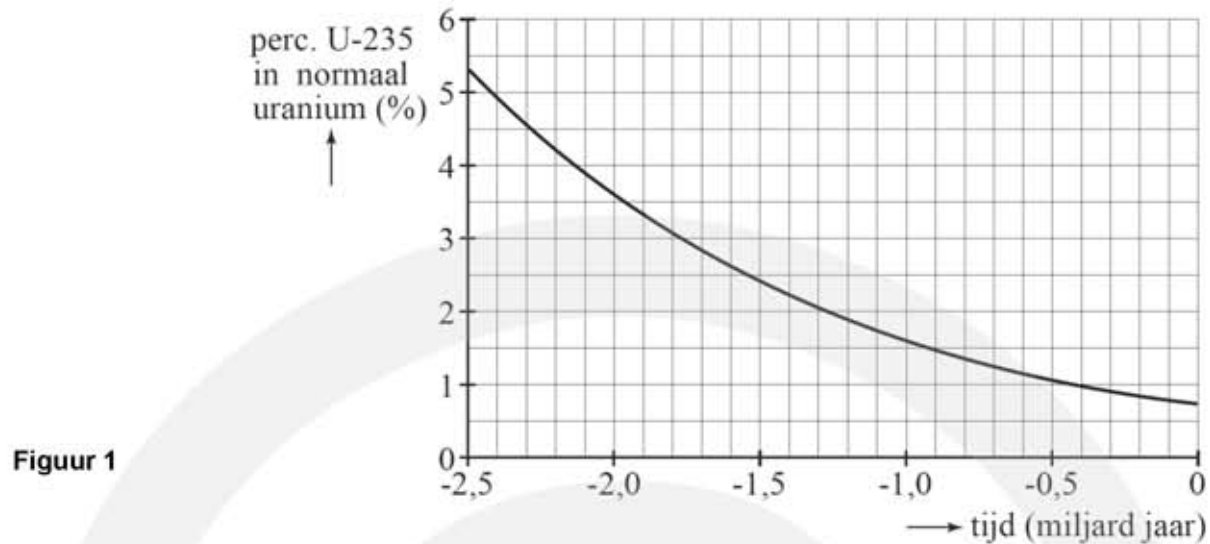
De natuurlijke kernreactor van Oklo

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.

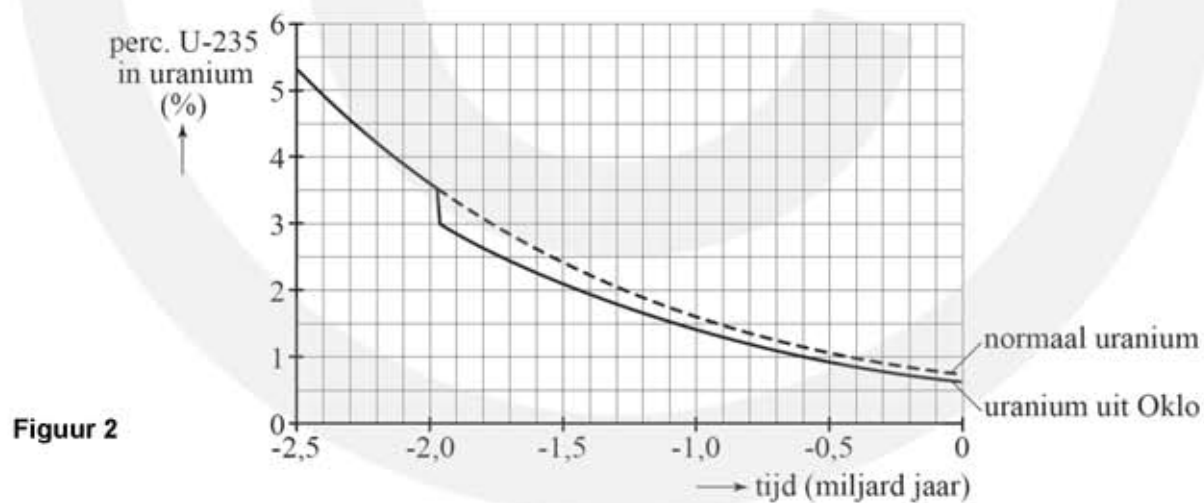
Normaal uranium bestaat voor 0,7% uit de radioactieve isotoop U-235 en voor 99,3% uit de radioactieve isotoop U-238. Men kan uitrekenen hoe het percentage U-235 in uranium in de loop van de tijd is veranderd. Zie figuur 1.



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.



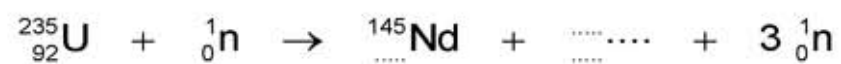
Ongeveer twee miljard jaar geleden moet er plotseling U-235 verdwenen zijn door kernsplijting. Men schat de hoeveelheid verdwenen U-235 op $1,1 \cdot 10^4$ kg.

- 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 stippelijntjes in te vullen.
(Nd-145 en het andere splijttingsproduct staan niet in tabel 25 van Binas)