

Uitwerkingen opgaven leerboek

5.1 INTRODUCTIE

Opgave 1

- a Niet waar: Een negatief geladen ion heeft altijd meer elektronen om de kern dan protonen in de kern. Maar een positief ion heeft juist minder elektronen om de kern dan protonen in de kern.
- b Niet waar: Het aantal protonen in de kern is voor veel elementen kleiner dan het aantal neutronen in de kern. Het aantal protonen in de kern is wel altijd gelijk aan het aantal elektronen om de kern.
- c Waar
- d Niet waar: Elektronen kunnen in verschillende banen om de kern bewegen.
- e Waar

Opgave 2

- a Diagnostisch onderzoek is erop gericht om de ziekte of het probleem in het lichaam vast te stellen (een diagnose te stellen).
- b Voorbeelden van diagnostisch onderzoek met straling zijn:
 - 1 röntgenopname van een arm of been na een val, om te zien of er iets gebroken is;
 - 2 röntgenopname van de longen om te zien of die 'schoon' zijn;
 - 3 CT-scan van de buik om structuur en ligging van de organen te bekijken.
- c Therapeutische toepassing is erop gericht om een ziekte te genezen of af te remmen. Hierbij worden de schadelijke cellen gedood.
- d Voorbeelden van therapeutische toepassing met straling zijn:
 - 1 uitwendige of inwendige bestraling van een tumor;
 - 2 Inwendige bestraling bij prostaatkanker, slokdarmkanker of blaaskanker;
 - 3 uitwendige bestraling bij een tumor in het hoofd.

5.2 RÖNTGENSTRALING

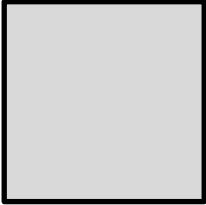
Opgave 3

- a Waar
- b Waar
- c Niet waar: De fotonenergie van ultravioletstraling is kleiner dan de fotonenergie van röntgenstraling.
- d Niet waar: Straling met een gering doordringend vermogen wordt gemakkelijk geabsorbeerd.
- e Waar
- f Niet waar: Bijvoorbeeld zichtbaar licht is ook elektromagnetische straling, net als röntgenstraling, maar de fotonen van zichtbaar licht hebben te weinig energie om schade aan te richten in levende cellen.
- g Waar
- h Niet waar: Een loodplaat met een dikte van tweemaal de halveringsdikte absorbeert 75% van de röntgenstraling. (De plaat laat $50\% \times 50\% = 25\%$ door).
- i Waar
- j Waar

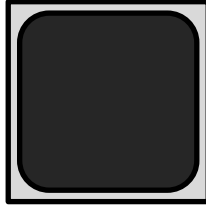
Opgave 4

Het licht en de andere soorten elektromagnetische straling hebben er even lang over gedaan om bij de aarde te komen, dan moeten ze met dezelfde snelheid hebben gereisd. De snelheid is dus voor alle soorten elektromagnetische straling gelijk.

Opgave 5



massief blokje



hol blokje

Opgave 6

Als de halveringsdikte groter is, is er meer materiaal nodig om de helft van de röntgenstraling te absorberen. Materiaal met een kleine halveringsdikte absorbeert meer röntgenstraling per mm en absorbeert de röntgenstraling dus sterker.

Opgave 7

Bot houdt meer straling tegen en heeft dus de kleinste halveringsdikte. Zacht weefsel heeft de grootste halveringsdikte.

Opgave 8

- a Een dikte van tweemaal de halveringsdikte betekent dat de intensiteit twee keer wordt gehalveerd. $0,5 \times 0,5 = 0,25$ dus wordt er 25% van de straling doorgelaten.
- b Als 25% van de straling wordt doorgelaten, wordt de rest geabsorbeerd, dat is $100\% - 25\% = 75\%$.

Opgave 9

Stoffen met een grotere dichtheid bestaan uit zwaardere atomen met meer elektronen per atoom. Dat maakt de kans groter dat röntgenfotonen elektronen treffen en geabsorbeerd worden. Er wordt dan per cm meer röntgenstraling geabsorbeerd, dus is de halveringsdikte kleiner.

Opgave 10

- a Door de grote energie van de fotonen kan röntgenstraling diep in een materiaal doordringen, waarbij een gedeelte van de röntgenfotonen geabsorbeerd wordt. De absorptie van de röntgenstraling is nooit volledig en afhankelijk van de dichtheid en de dikte van het materiaal. Zo zullen botten meer röntgenstraling absorberen dan het omliggende weefsel. Omdat een röntgenfoto zwarter wordt als er meer röntgenstraling op valt, zal het weefsel op de foto donker kleuren en de botten wit.
- b Wapens zijn gemaakt van staal. De dichtheid van staal is relatief groot, dus zullen de wapens bij de bagagecontrole op vliegvelden gedetecteerd kunnen worden op het computerscherm dat verbonden is met de röntgencamera.

Opgave 11

Na elke halveringsdikte is de intensiteit van de invallende straling gehalveerd, dus is er 50% over. Na drie halveringsdiktes is de intensiteit van de doorgelaten straling dus $50\% \times 50\% \times 50\% = 12,5\%$ van de oorspronkelijke intensiteit.

Opgave 12

- a $25\% = 50\% \times 50\%$ dus dat zijn 2 halveringsdiktes.
- b 2 halveringsdiktes = 16 cm dus 1 halveringsdikte = 8 cm.
- c Röntgenstraling met een groter doordringend vermogen heeft meer energie per foton, dus is de frequentie van de straling groter dan eerst.
- d De plaat zal meer dan 25% van de straling doorlaten.
- e Als de plaat meer straling doorlaat, is er een dikkere plaat nodig om 50% te absorberen, dus is de halveringsdikte groter.

Opgave 13

Oriëntatie:

Gebruik de tabel van figuur 12 en vul deze aan met de halveringsdikte van het materiaal:

aantal halveringsdiktes n	0	1	2	3	4	5	...
intensiteit I (%)	100	50	25	12,5	6,25	3,125	...
dikte van het materiaal (cm)	0	$1 \times 3,7$	$2 \times 3,7$	$3 \times 3,7$	$4 \times 3,7$	$5 \times 3,7$...

Uitwerking:

- a 12,5% wordt doorgelaten door 3 halveringsdiktes, dus is de dikte van het weefsel $3 \times 3,7 = 11$ cm.
- b $7,4$ cm = $2 \times 3,7$ cm dus dat zijn 2 halveringsdiktes en die laten 25% van de straling door. Het weefsel laat 25% van de invallende straling door, en absorbeert dus 75% van de invallende straling.
- c $\frac{22,2}{3,7} = 6,0$ dus dat zijn 6 halveringsdiktes en die laten $\frac{3,125}{2} = 1,6\%$ van de straling door.

Opgave 14

- a De loodplaat laat meer dan de helft van de invallende straling door. De plaat is dus dunner dan één halveringsdikte. De dikte is kleiner dan de halveringsdikte van lood voor röntgenstraling.
- b De oorspronkelijke loodplaat laat 80% van de straling door. Een tweemaal zo dikke loodplaat laat $0,80 \times 0,80 = 0,64 = 64\%$ van de straling door. De uitspraak is niet juist. De intensiteit van de doorgelaten straling bij een tweemaal zo dikke plaat wordt alleen tweemaal zo klein, als de oorspronkelijke plaat de intensiteit ook halveert.

Opgave 15

- a De plaat die de meeste straling doorlaat heeft de minste halveringsdiktes. Dat moet dus een dunne plaat zijn met een grote halveringsdikte. Plaat A is 1 cm dik en de halveringsdikte is ook 1 cm, deze plaat halveert de straling dus 1 x. Plaat F heeft wel een grotere halveringsdikte van 1,5 cm maar deze plaat is wel 3 cm dik en halveert de straling dus 2 x. Plaat A laat dus de meeste straling door.
- b Plaat E heeft een halveringsdikte van 0,5 cm en is 2 cm dik. De plaat bestaat dus uit 4 halveringsdiktes. Er is geen andere plaat die ook uit 4 (of meer) halveringsdiktes bestaat, dus laat plaat E de minste straling door.

Opgave 16

Oriëntatie:

Voor de intensiteit I van de doorgelaten straling geldt $I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{d}{d_{1/2}}$ (of gebruik een tabel zoals bij opgave 13).

Uitwerking:

- a $n = \frac{d}{d_{1/2}} = \frac{8,0}{2,0} = 4,0 \rightarrow I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{4,0} = 0,0625 \cdot I_0$; het bot laat 6,3% van de invallende straling door.
- b In werkelijkheid wordt er 7,0% van de invallende straling doorgelaten. Dat is meer dan 6,3%, dus zitten er minder dan 4 halveringsdiktes tussen. Dan moet de halveringsdikte meer dan 2,0 cm zijn.

Opgave 17

Oriëntatie:

Voor de fotonenergie E_f geldt $E_f = h \cdot f$. Voor de eenheid elektronvolt (eV) geldt $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Uitwerking:

- a $E_f = 35 \text{ keV} = 35 \cdot 10^3 \times 1,6 \cdot 10^{-19} = 5,6 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
- b $E_f = h \cdot f \rightarrow f = \frac{E_f}{h} = \frac{5,6 \cdot 10^{-15}}{6,626 \cdot 10^{-34}} = 8,5 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$
- c De energie van het foton is $10 \times$ zo klein, dus is de frequentie ook $10 \times$ zo klein: $f = 8,5 \cdot 10^{17} \text{ Hz}$.

Opgave 18

Oriëntatie:

Zie opgave 17. Het vermogen P van de bundel röntgenstraling is de gezamenlijke energie E van de per seconde uitgezonden röntgenfotonen. Het aantal per seconde uitgezonden röntgenfotonen N kun je dus berekenen door deze energie E te delen door de fotonenergie E_f .

Uitwerking:

a $E_f = h \cdot f = 6,626 \cdot 10^{-34} \times 5,0 \cdot 10^{18} = 3,3 \cdot 10^{-15} \text{ J}$

b De energie E die per seconde wordt uitgezonden is $0,15 \cdot 10^{-3} \text{ J} \rightarrow N = \frac{E}{E_f} = \frac{0,15 \cdot 10^{-3}}{3,3 \cdot 10^{-15}} = 4,5 \cdot 10^{10}$ röntgenfotonen.

Opgave 19

a Volgens Binas: $d_{1/2} = 0,0106 \text{ cm}$

b Er gaan (afgerond op een geheel getal) $\frac{0,055}{0,0106} = 5$ halveringsdiktes in: $I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^5 = 0,031 \cdot I_0$.

Het loodschort laat 3% van de invallende straling door, en houdt dus 97% van de invallende straling tegen.

c Aflezen bij 50% geeft $d_{1/2} = 0,9 \text{ cm}$.

d Het loodschort heeft een dikte van 0,055 cm. Aflezen bij $d = 0,055 \text{ cm}$ geeft $I = 95\% \cdot I_0$. Het loodschort laat 95% van de invallende straling door, en houdt dus 5% van de invallende straling tegen.

e Voor eenzelfde bescherming als in vraag **b** moet het loodschort een dikte hebben van 5 halveringsdiktes:

$$n = \frac{d}{d_{1/2}} \rightarrow d = n \cdot d_{1/2} = 5 \times 0,9 = 4,5 \text{ cm}.$$

f Als het medisch personeel de hele dag met een loodschort van 4,4 cm dik moet lopen, zou dat veel te zwaar zijn. Het personeel kan zich ook beschermen door achter een muur met loodbekleding te gaan staan die dezelfde bescherming biedt.

5.3 KERNSTRALING

Opgave 20

a Niet waar: Uit de kern van een atoom kunnen drie soorten straling komen: α -straling, β -straling en γ -straling. Röntgenstraling wordt gemaakt door een röntgenapparaat.

b Niet waar: Een α -deeltje bestaat uit twee protonen en twee neutronen.

c Niet waar: Het doordringend vermogen van α -straling is kleiner dan van β -straling en veel kleiner dan van γ -straling.

d Waar

e Niet waar: Een activiteit van 5 kBq betekent dat in de radioactieve bron $5 \cdot 10^3$ instabiele atoomkernen per seconde vervallen (en daarbij α - of β -deeltjes of γ -straling uitzenden).

f Niet waar: De activiteit van een radioactieve bron hangt af van het aantal instabiele atoomkernen **en** van de soort radioactieve stof.

g Niet waar: Na twee halveringstijden is de activiteit van een radioactieve bron afgenomen tot 25%.

Opgave 21

a α -straling

b röntgenstraling

c γ -straling

d β -straling

Opgave 22

- Bij radiodiagnostiek moet de straling door (een deel van) het lichaam heen gaan om aan de andere kant (of buitenkant) van het lichaam gedetecteerd te kunnen worden. Hiervoor is röntgen- of γ -straling nodig want deze straling heeft een groot doordringend vermogen.
- Bij de inwendige bestraling van tumoren wordt de radioactieve stof in of dichtbij de tumor geplaatst. Om de tumor effectief te bestralen zonder het omliggende weefsel te veel te beschadigen is een β -straler nodig. De β -straling dringt wel in de tumor door, maar minder diep in het omliggende weefsel dan γ -straling. Ook heeft β -straling een veel groter ioniserend vermogen dan γ -straling. Een α -straler is in veel gevallen niet geschikt doordat deze een te klein doordringend vermogen heeft en door zijn grote ioniserend vermogen te veel schade veroorzaakt direct bij de bron.
- De α - en β -deeltjes raken bij de botsing energie kwijt, waardoor ze na de botsing langzamer zullen gaan.
- Als de straling een groot ioniserend vermogen heeft, vinden er in het materiaal veel ionisaties per mm plaats. Door de vele ionisaties zal de snelheid van de α - en β -deeltjes snel afnemen, waardoor de deeltjes snel tot stilstand komen en dus niet ver in het materiaal kunnen doordringen.

Opgave 23

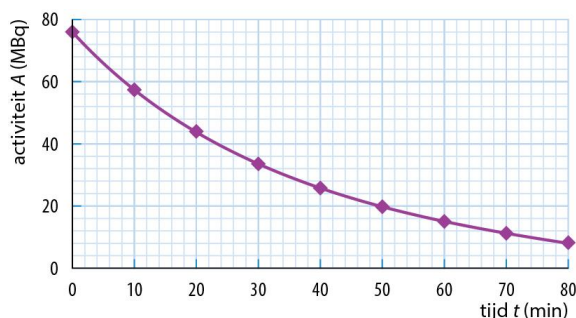
- Voor controle op borstkanker is röntgenstraling het meest geschikt. Er wordt een röntgenfoto van de borst gemaakt. Er wordt weinig schade aangericht en er gaat veel straling door het weefsel heen.
- Bij het gebruik van een tracer is een γ -straler het meest geschikt: de straling is buiten het lichaam meetbaar en richt in het lichaam weinig schade aan.
- Bij het behandelen van een tumor met inwendige bestraling is een β -straler het meest geschikt. Deze bestraling is effectiever dan van een γ -straler door het kleinere doordringende vermogen van β -straling in combinatie met het grotere ioniserend vermogen. Bij gebruik van een γ -straler zou slechts een klein deel van de straling in de tumor worden geabsorbeerd. De straling van een α -straler zou niet ver genoeg in de tumor doordringen.
- Als er een radioactieve bron buiten het lichaam wordt gebruikt, is een γ -straler het meest geschikt. α - en β -straling dringen niet ver genoeg door in het lichaam.
- Bij bestraling van een huidtumor zal β -straling net genoeg de huid binnendringen om de schadelijke cellen te doden.
- Injectiespuiten kunnen het best gesteriliseerd worden met γ -straling, dat gaat goed door het verpakkingsmateriaal heen.

Opgave 24

- Op $t = 0$ s is de activiteit $A = 4,0$ MBq, er vervallen dan $4,0 \cdot 10^6$ kernen per seconde.
- Na 8 dagen is de activiteit $A = 2,0$ MBq. De halveringstijd is dus 8 dagen.
- Na 32 dagen zijn er $n = \frac{32}{8} = 4$ halveringstijden verstreken.
- Na 32 dagen is er nog $\left(\frac{1}{2}\right)^4 \times 100\% = 6,25\%$ van het oorspronkelijke aantal instabiele kernen over.

Opgave 25

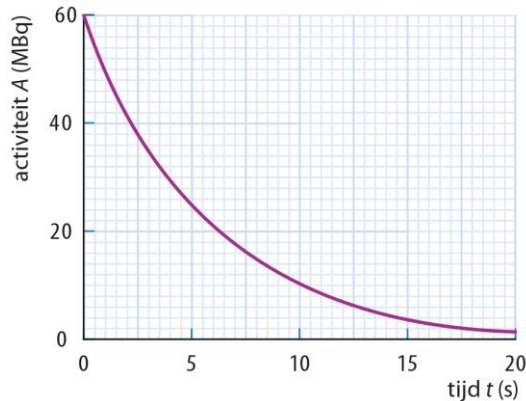
- Zie figuur.



- Aflezten wanneer $A = \frac{1}{2} \times 75,8 = 37,9$ MBq: $t_{1/2} = 25$ min. Of: van 40 naar 20 MBq duurt $(49,5 - 23,5) = 26$ min.
- 5 keer gehalveerd na $5 \times 25 = 125$ min.

Opgave 26

- a Zie figuur.



- b Op $t = 10$ s is $A = 11$ MBq.

Opgave 27

- a Er zijn drie soorten kernstraling: α -, β -, en γ -straling.
- b α -straling: snel bewegende deeltjes die bestaan uit twee protonen en twee neutronen.
 β -straling: snel bewegende elektronen.
 γ -straling: fotonen van elektromagnetische straling.
- c α -, β -, en γ -straling zijn alle drie geschikt voor radiotherapie.
 Bij uitwendige bestraling van oppervlakkige tumoren in de huid wordt α -straling gebruikt. Bij uitwendige bestraling van tumoren in het lichaam wordt γ -straling gebruikt. Door het grote doordringend vermogen van deze straling kan de straling tot de tumor in het lichaam doordringen.
 Bij inwendige bestraling wordt β -straling gebruikt, omdat deze straling een groot ioniserend vermogen heeft met een gering doordringend vermogen, zodat een bepaalde plek in het lichaam goed bestraald kan worden zonder het omliggende weefsel te beschadigen.
- d γ -straling is het meest geschikt voor radiodiagnostiek, omdat deze straling een groot doordringend vermogen heeft en daardoor buiten het lichaam kan worden waargenomen.

Opgave 28

- a Maak een tabel waarin de tijd met stappen van 30 jaar toeneemt en de activiteit na iedere 30 jaar halveert:

verstreken tijd t (jaar)	0	30	60	90	120	150	...
aantal halveringstijden n	0	1	2	3	4	5	...
activiteit A (kBq)	180	90	45	22,5	11,25	5,625	...

Na 150 jaar is $A = 5,6$ kBq.

- b $n = \frac{t}{t_{1/2}} = \frac{150}{30} = 5 \rightarrow A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = 180 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^5 = 5,6$ kBq
- c $\left(\frac{1}{2}\right)^{10} = 0,00098$, dat is minder dan 0,1% (gevonden door te proberen welke macht van 0,5 onder de 0,001 uitkomt).
 Je kunt ook de tabel van figuur 25 verder aanvullen, totdat de activiteit A onder de 0,1% komt:

aantal halveringstijden n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
activiteit A (%)	100	50	25	12,5	6,25	3,13	1,56	0,781	0,391	0,195	0,098

Dat zijn dus 10 halveringstijden $\rightarrow t = 10 \times 30 = 300 = 3 \cdot 10^2$ jaar.

Opgave 29

Oriëntatie:

Voor de activiteit A van een radioactieve bron geldt $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{t}{t_{1/2}}$. Je kunt ook de tabel van figuur 25 gebruiken of zelf een tabel maken zoals bij opgave 28.

Uitwerking:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{5}{40} \times 100\% = 12,5\% \rightarrow n = 3$$

Of: van 40 naar 5 kBq is 3 x gehalveerd (40 → 20 → 10 → 5)

$$n = \frac{t}{t_{1/2}} \rightarrow t = n \cdot t_{1/2} = 3 \times 5,3 = 16 \text{ jaar}$$

Of met een tabel:

verstreken tijd t (jaar)	0	5,3	10,6	15,9	...
aantal halveringstijden n	0	1	2	3	...
activiteit A (kBq)	40	20	10	5	...

De activiteit is tot 5 kBq afgenomen na 16 jaar.

Opgave 30

Oriëntatie:

Voor de activiteit A van een radioactieve bron geldt $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{t}{t_{1/2}}$. Je kunt ook de tabel van figuur 25 gebruiken.

Uitwerking:

$$\frac{A}{A_0} = \frac{10}{160} \times 100\% = 6,25\% \rightarrow n = 4$$

Of: van 160 naar 10 kBq is 4 x gehalveerd (160 → 80 → 40 → 20 → 10).

$$n = \frac{t}{t_{1/2}} \rightarrow t_{1/2} = \frac{t}{n} = \frac{8}{4} = 2,0 \text{ uur}$$

Opgave 31

- Zoek in Binas het juiste symbool met het juiste massagetal bij elkaar. Zoek uit welk deeltje er uitgezonden wordt.

U-238 zendt α - (en γ -)straling uit.
Th-232 zendt α - (en γ -)straling uit.
K-40 zendt β - (en γ -)straling uit.
- Lees in Binas de halveringstijd af.

U-238 heeft een halveringstijd van: $t_{1/2} = 4,46 \cdot 10^9$ jaar.
Th-232 heeft een halveringstijd van: $t_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$ jaar.
K-40 heeft een halveringstijd van: $t_{1/2} = 1,28 \cdot 10^9$ jaar.
- De aarde bestaat al miljarden jaren. De stoffen met een veel kortere halveringstijd zijn al lang helemaal vervallen.

Opgave 32

- Op $t = 0$ is het aantal instabiele kernen van bron A is tweemaal zo groot als het aantal instabiele kernen van bron B.
- Bron B loopt eigenlijk steeds één halveringstijd 'achter' op bron A. De activiteit van bron A is dus altijd twee keer zo groot als de activiteit van bron B. Zie ook onderstaande tabel.

aantal halveringstijden n	0	1	2	3	4	...
activiteit A (kBq) van bron A	200	100	50	25	12,5	...
activiteit A (kBq) van bron B	100	50	25	12,5	6,25	...

Opgave 33

- a Bij de bron met de kleinste halveringstijd neemt de activiteit het snelste af. Dat is dus bij bron A.
 b Voor stof B duurt het twee keer zo lang totdat de activiteit is gehalveerd, vandaar de lege plekken in onderstaande tabel:

aantal halveringstijden n van bron A	0	1	2	3	4	5	6	...
activiteit A (kBq) van bron A	800	400	200	100	50	25	12,5	...
aantal halveringstijden n van bron B	0		1		2		3	...
activiteit A (kBq) van bron B	100		50		25		12,5	...

Na twee halveringstijden van bron A, is er pas één halveringstijd van bron B verstreken. Omdat bron A met een acht keer zo grote activiteit als bron B is begonnen zijn de activiteiten van bron A en B pas gelijk na zes halveringstijden van bron A (en drie halveringstijden van bron B). De verstreken tijd is dan $6 \times 8,0 = 3 \times 16 = 48$ uur.

Opgave 34

- a Bron A heeft een halveringstijd van 120 s dus na 360 s is de activiteit $3 \times$ gehalveerd: $A = \left(\frac{1}{2}\right)^3 \cdot 10 = 1,25$ kBq.
 b Maak een tabel met beginactiviteit en halveringstijd van elke stof (zie hieronder). Bedenk voor elke stof hoeveel halveringstijden er nodig zijn om de activiteit de laten dalen tot 1,25 kBq (4de rij van de tabel). Reken dan voor elke stof uit hoe lang het duurt totdat die halveringstijden verstreken zijn (laatste rij van de tabel).

	A	B	C	D	E	F
beginactiviteit A_0 (kBq)	10	10	10	5	20	40
halveringstijd $t_{1/2}$ (s)	120	200	60	120	200	60
aantal halveringstijden nodig voor 1,25 kBq	3	3	3	2	4	5
benodigde tijd $t = n \cdot t_{1/2}$ (s)	360	600	180	240	800	300

Opgave 35

- a Zoek in Binas het juiste symbool met het juiste massagetal bij elkaar. Zoek uit welk deeltje er uitgezonden wordt:
 Co-60 zendt β - en γ -straling uit.
 Tc-99m zendt γ -straling uit.
 I-131 zendt β - en γ -straling uit.
- b Lees in Binas de halveringstijd af.
 Co-60 heeft een halveringstijd van: $t_{1/2} = 5,27$ jaar.
 Tc-99m heeft een halveringstijd van: $t_{1/2} = 6,0$ uur.
 I-131 heeft een halveringstijd van: $t_{1/2} = 8,0$ dagen.
- Voor het gebruik als tracer heb je een γ -straler nodig, omdat de straling buiten het lichaam gedetecteerd moet kunnen worden. Bovendien moet de halveringstijd klein zijn, zodat na enkele dagen al het radioactieve materiaal vervallen zal zijn. Dus Tc-99m.
 - Om de straling in het lichaam te laten doordringen is weer een γ -straler nodig, en alle drie de radioactieve stoffen doen dat. Doordat de bron zich buiten het lichaam bevindt, kan ongewenste β -straling 'uitgefilterd' worden door bijvoorbeeld een plaat aluminium. Bij gebruik is een dergelijke bron helemaal afgeschermd met veel lood, waardoor de bestralingstijd precies gedoseerd kan worden. Een bron met een lange halveringstijd heeft bij uitwendige bestraling de voorkeur, omdat er dan lang met dezelfde bron gewerkt kan worden. Co-60 dus.
 - Voor het bestralen van een tumor in het lichaam is het benodigde doordringend vermogen niet zo hoog. Dit kan goed met een β -straler. Wel is het belangrijk dat de radioactieve bron niet nog jarenlang straling blijft uitzenden. Dus is I-131 het meest geschikt.

Opgave 36

- a Vanuit het lichaam is alleen γ -straling meetbaar buiten het lichaam, α - en β -straling worden in het lichaam al helemaal geabsorbeerd.
- b $\frac{A}{A_0} = 12,5\% \rightarrow n = 3; n = \frac{t}{t_{1/2}} \rightarrow t = n \cdot t_{1/2} = 3 \times 13,2 = 40$ uur

5.4 RADIOACTIEF VERVAL

Opgave 37

- a Niet waar: In een radioactieve bron zitten instabiele isotopen van de stof, en ook de stabiele vervalproducten van die instabiele isotoop. Soms bevat een radioactieve bron ook nog stabiele isotopen van hetzelfde element. En vaak bestaat een bron ook uit verbindingen van de instabiele isotopen met andere (stabiele) elementen.
- b Waar bij α - en β -verval, niet waar bij γ -verval.
- c Niet waar: Het atoomnummer geeft het aantal protonen in een atoomkern.
- d Waar, het massagetel geeft het totaal aantal kerndeeltjes aan.
- e Niet waar: Isotopen zijn atomen met kernen met hetzelfde aantal protonen en een verschillend aantal neutronen.
- f Waar

Opgave 38

- a Helium heeft atoomnummer 2 en lithium heeft atoomnummer 3.
- b Het aantal protonen in een uraniumkern is 92.
- c De kern van lithium-8 heeft 3 protonen en 5 neutronen.
- d Van zuurstof komen drie isotopen in de natuur voor: zuurstof-16, zuurstof-17 en zuurstof-18.
- e De isotopen koolstof-12 en koolstof-13 zijn niet radioactief.
- f Het atoomnummer is bij alle isotopen van stikstof hetzelfde.
- g Helium-6 is radioactief en zendt β -straling uit.
- h Neon-24 is radioactief en zendt β - en γ -straling uit.

Opgave 39

- a Het atoomnummer is het aantal protonen in de kern en geeft de atoomsoort aan.
- b aantal neutronen = massagetel – atoomnummer

Opgave 40

- a Een α -deeltje is een heliumkern. Die kern heeft 2 protonen en 2 neutronen, dus is het atoomnummer 2 en het massagetel 4.
- b Een β -deeltje is een elektron, dat heeft lading -1 en 0 kerndeeltjes. Omdat het atoomnummer ook de lading van het deeltje aangeeft, is het atoomnummer van een β -deeltje -1 en het massagetel 0.
- c Een γ -foton heeft geen lading en geen massa. Zowel atoomnummer als massagetel is dan 0 dus het heeft geen zin om bij een γ -foton het atoomnummer en massagetel op te schrijven.

Opgave 41

- a Een uraniumkern heeft 92 protonen.
- b Bij α -verval neemt het atoomnummer af met 2.
- c Uranium-235 heeft $235 - 92 = 143$ neutronen.
- d Bij α -verval neemt het massagetel af met 4.
- e ${}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{231}\text{Th} + {}_2^4\alpha$

Opgave 42

- a Stikstof-16 heeft atoomnummer 7 en massagetal 16.
- b De atoomkern van stikstof-16 heeft $16 - 7 = 9$ neutronen.
- c De massa van een β -deeltje (een elektron) is veel kleiner dan de massa van een proton of een neutron, dus heeft een β -deeltje massagetal 0. Het massagetal zal daarom bij β -verval niet veranderen.
- d Het atoomnummer zal bij β -verval stijgen met +1 want het 'atoomnummer' van een β -deeltje is -1 .
- e ${}^1_7\text{N} \rightarrow {}^1_8\text{O} + {}_{-1}^0\beta$

Opgave 43

- a Pu-240 zendt bij verval α -straling uit.
- b ${}^{240}_{94}\text{Pu} \rightarrow {}^{236}_{92}\text{U} + {}^4_2\alpha$, na radioactief verval ontstaat uranium-236.
- c Uranium-236 is ook radioactief en zendt bij verval α -straling uit (en γ -straling).

Opgave 44

- a Sr-90 zendt bij verval β -straling uit.
- b ${}^{90}_{38}\text{Sr} \rightarrow {}^{90}_{39}\text{Y} + {}_{-1}^0\beta$, na radioactief verval ontstaat een yttriumisotoop: Y-90.
- c Y-90 is ook radioactief en zendt bij verval β -straling uit (en γ -straling).

Opgave 45

- a H-3 heeft maar drie kerndeeltjes. Voor een α -deeltje zijn vier kerndeeltjes nodig, dus tritium kan geen α -deeltje uitzenden.
- b H-3 zendt bij radioactief verval β -straling uit.
- c ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}_{-1}^0\beta$, na radioactief verval ontstaat een heliumisotoop: He-3.
- d He-3 is niet radioactief.

Opgave 46

- a ${}^{99}_{42}\text{Mo} \rightarrow {}^{99m}_{43}\text{Tc} + {}_{-1}^0\beta$
- b ${}^{99m}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma$

Opgave 47

- a Bij het uitzenden van α -straling verdwijnen er twee protonen en twee neutronen uit de kern. Het atoomnummer van de kern neemt dan met 2 af en het massagetal met 4.
- b Bij het uitzenden van β -straling verandert een neutron in een proton en een elektron. Het gevormde proton blijft in de kern en het gevormde elektron wordt uitgestoten. Doordat er zo een proton bij komt in de kern, neemt het atoomnummer toe met 1. Het aantal neutronen neemt juist af met 1 zodat het massagetal gelijk blijft.
- c De massa van 1 atoom in kg bereken je door het massagetal te vermenigvuldigen met de atomaire massa-eenheid u waarbij $1 u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg:

Opgave 48

Je kunt niet voorspellen op welk moment een instabiele kern vervalft. Bij een zeer groot aantal instabiele kernen ontstaat toch een duidelijk regelmaat. Na elke halveringstijd zal de helft van die kernen zijn vervallen. Vergelijk het met gooien met een dobbelsteen. Voor één worp kun je niet voorspellen of je bijvoorbeeld 6 gooit, maar na 6 000 000 keer gooien zul je toch ongeveer $1,0 \cdot 10^6$ keer 6 hebben gegooid.

Opgave 49

- a Na één halveringstijd is nog de helft van de instabiele kernen over. Na twee halveringstijden de helft van de helft, dat is een kwart, van de instabiele atoomkernen. En na drie halveringstijden is de helft van een kwart, dat is een achtste van de instabiele atoomkernen over.
- b Bij α - en β -verval verandert de instabiele atoomkern in een andere atoomkern. Er verdwijnen dus geen hele atoomkernen. De massa is dan ook niet achtmaal zo klein geworden. De massa is wel een klein beetje afgenomen, doordat er α - of β -deeltjes door de instabiele atoomkernen zijn uitgezonden. α -deeltjes hebben een relatief kleine massa en de massa van β -deeltjes is praktisch verwaarloosbaar ten opzichte van de rest. Bovendien bevat een radioactieve bron meestal ook veel niet-radioactieve isotopen.
- c Als het aantal instabiele kernen achtmaal zo klein is geworden, is ook het aantal instabiele atoomkernen dat per seconde vervalft achtmaal zo klein geworden. De activiteit is het aantal instabiele atoomkernen dat per seconde vervalft, dus is de activiteit dan ook achtmaal zo klein geworden.

Opgave 50

Oriëntatie:

De atoommassa's van de isotopen staan in Binas en $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.

Uitwerking

- a Maak de vervalvergelijking kloppend: ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + 4\alpha$. Er wordt α -straling uitgezonden.
- b Van één atoom Po-210 is de massa: $m_a = 210 u$ en $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg dus is
 $m_a = 210 \times 1,66 \cdot 10^{-27} = 3,49 \cdot 10^{-25}$ kg
 Er zijn $4,0 \cdot 10^8$ Po-210 kernen dus is de totale massa van de kernen:
 $m = 4,0 \cdot 10^8 \times 3,49 \cdot 10^{-25} = 1,4 \cdot 10^{-16}$ kg
- c Na drie halveringstijden is het aantal Po-210 atoomkernen $3 \times$ gehalveerd, dus $8 \times$ zo klein geworden:
 $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 = 4,0 \cdot 10^8 \times \frac{1}{8} = 5,0 \cdot 10^7$
- d Elke Po-210 atoomkern die vervalft, verandert in een Pb-206 atoomkern. Na drie halveringstijden zijn er $4,0 \cdot 10^8 - 5,0 \cdot 10^7 = 3,5 \cdot 10^8$ Po-210 kernen vervallen. Dan zijn er dus ook $3,5 \cdot 10^8$ Pb-206 kernen ontstaan. De bron bevat dan $3,5 \cdot 10^8$ Pb-206 kernen.

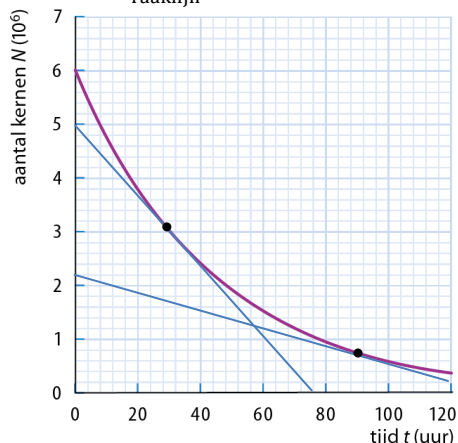
Opgave 51

Oriëntatie:

De activiteit A van een radioactieve bron op een tijdstip t is het hellingsgetal van de raaklijn aan de grafiek in het N, t -diagram op dat tijdstip: $A = -\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_{\text{raaklijn}}$. Voor de gemiddelde activiteit A_{gem} in een periode Δt geldt: $A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$.

Uitwerking:

- a Het aantal kernen is aanvankelijk $6 \cdot 10^6 \rightarrow$ Aflezen bij $n = 3 \cdot 10^6$ geeft de halveringstijd $t_{1/2} = 30$ uur.
- b $A = -\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_{\text{raaklijn}} = \frac{5,0 \cdot 10^6 - 0}{76 \times 3600} = 18$ Bq



c $A = -\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_{\text{raakklijn}} = \frac{(2,2 - 0,2) \cdot 10^6}{120 \times 3600} = 4,6 \text{ Bq}$

d De halveringstijd is 30 uur, dus van 30 naar 90 uur is 2 halveringstijden later. Het aantal actieve kernen is viermaal zo klein na 2 halveringstijden, dan is de activiteit ook viermaal zo klein.

e $A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{(6,0 - 0,4) \cdot 10^6}{120 \times 3600} = 13 \text{ Bq}$

Opgave 52

Oriëntatie:

Voor de gemiddelde activiteit A_{gem} in een periode Δt geldt: $A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$.

Uitwerking:

a $A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{8,2 \cdot 10^5}{3600} = 2,3 \cdot 10^2 \text{ Bq} = 0,23 \text{ kBq}$

b Uit Binas blijkt dat de halveringstijd van Po-210 138 dagen is. Dan zal de activiteit in één uur vrijwel constant zijn.

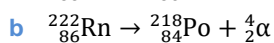
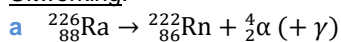
Opgave 53

Oriëntatie:

Het aantal instabiele atoomkernen N kun je berekenen met de in de opgave gegeven nieuwe formule voor de activiteit A .

Opmerking: je hoeft deze formule niet te kennen, maar je moet er wel mee kunnen rekenen.

Uitwerking:



c Zie Binas voor de halveringstijd van Rn-222: 3,825 dag.

$$A = 0,69 \cdot \frac{N}{t_{1/2}} \rightarrow N = \frac{A \cdot t_{1/2}}{0,69} = \frac{3,0 \times 3,825 \times 24 \times 3600}{0,69} = 1,44 \cdot 10^6$$

Het gemiddeld aantal atomen Rn-222 per m^3 buitenlucht is dus $1,4 \cdot 10^6$.

d De atoommassa van Rn-222 is 222. De massa m_a van een atoom Rn-222 bereken je met de atomaire massa-eenheid:

$$m_a = 222 \text{ u} = 222 \times 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,69 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$$

De massa m van het Rn-222 per m^3 buitenlucht volgt uit N en m_a (het aantal atomen en de massa van een atoom):

$$m = N \cdot m_a = 1,44 \cdot 10^6 \times 3,69 \cdot 10^{-25} = 5,3 \cdot 10^{-19} \text{ kg}$$

Opgave 54

Oriëntatie:

Voor de gemiddelde activiteit A_{gem} in een periode Δt geldt: $A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$.

Uitwerking:

a De atoommassa van lood-209 is 209 u.

b $m_a = 209 \times 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 3,47 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$

c Het lood-209 in de bron heeft een massa van 0,0083 kg. Dan bevat de bron $N = \frac{m}{m_a} = \frac{0,0083}{3,47 \cdot 10^{-25}} = 2,4 \cdot 10^{22}$

atoomkernen lood-209.

d Het atoomnummer van lood is 82 en Pb-209 zendt bij radioactief verval β -straling uit: ${}^{209}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^{209}_{83}\text{Bi} + {}^0_{-1}\beta$

e Er is 12,5% van de oorspronkelijke hoeveelheid over na drie halveringstijden en de halveringstijd van Pb-209 is 3,3 uur, dus is er nog 12,5% van de oorspronkelijke hoeveelheid lood over na $3 \times 3,3 = 9,9 \text{ h}$.

f Er is in 9,9 uur 87,5% van de oorspronkelijke hoeveelheid lood vervallen dus

$$\Delta N = -0,875 \times 2,4 \cdot 10^{22} = -2,1 \cdot 10^{22} \text{ kernen en } A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{2,1 \cdot 10^{22}}{9,9 \times 3600} = 5,9 \cdot 10^{17} \text{ Bq.}$$

5.5 STRALINGSBELASTING

Opgave 55

- a Waar
- b Waar
- c Waar
- d Waar
- e Waar
- f Niet waar: Röntgen- en γ -straling kunnen nooit volledig door een materiaal worden geabsorbeerd. α - en β -straling kunnen wel volledig door een materiaal worden geabsorbeerd, als dat materiaal maar dik genoeg is.
- g Waar
- h Niet waar: Fotonen 'bewegen' altijd met de lichtsnelheid en geven alle fotonenergie ineens af bij ionisatie. α - en β -straling geven hun energie geleidelijk af door botsingen met atomen. Daardoor neemt hun snelheid af.
- i Waar
- j Waar
- k Niet waar: Bij uitwendige bestraling is vooral γ -straling gevaarlijk.
- l Niet waar: Bij inwendige bestraling is vooral α -straling gevaarlijk.

Opgave 56

- a Dracht is de afstand die α - en β -deeltjes maximaal afleggen in een materiaal. Bij de absorptie van deze deeltjes botsen ze tegen atomen, waarbij de snelheid van de deeltjes steeds meer afneemt, tot ze uiteindelijk stil staan en in het materiaal zijn opgenomen.
- b Halveringsdikte is de dikte van het materiaal waarna de helft van het aantal röntgen- of γ -fotonen is geabsorbeerd. De fotonen 'bewegen' altijd met de lichtsnelheid. Bij een 'treffen' met een atoom in het materiaal wordt de fotonenergie geabsorbeerd. Het atoom wordt dan geïoniseerd en het foton is niet meer. De absorptie is nooit volledig: er zijn altijd fotonen die door het materiaal heen gaan.

Opgave 57

Bij het maken van een röntgenfoto wordt je doorstraald met ioniserende straling. De röntgenfoto is niet radioactief en je wordt zelf ook niet radioactief. Er wordt hooguit wat stralingsschade aangericht.

Opgave 58

- a Bronnen van achtergrondstraling zijn kosmische straling, straling afkomstig van radioactieve stoffen op aarde (bijvoorbeeld uranium en radongas) en straling afkomstig van radioactieve stoffen in je lichaam (bijvoorbeeld jodium).
- b Die stoffen krijgen we binnen via ons voedsel, het water wat we drinken en inademing van de lucht.
- c Figuur 38: de equivalente dosis van één röntgenfoto van je gebit is 0,01 mSv. Figuur 40: de gemiddelde jaarlijkse equivalente dosis achtergrondstraling in Nederland is 1,8 mSv per persoon. Dus een equivalente dosis van 180 röntgenfoto's van je gebit is gelijk aan de jaarlijkse equivalente dosis achtergrondstraling.
- d Figuur 38: de equivalente dosis van één CT-scan is 10 mSv en de gemiddelde jaarlijkse equivalente dosis achtergrondstraling in Nederland is 1,8 mSv per persoon. De equivalente dosis van een CT-scan is $\frac{10}{1,8} = 5,6 \times$ zo groot als de jaarlijkse dosis achtergrondstraling.

Opgave 59

- a α - en β -straling zijn hiervoor heel geschikt, want van α - en β -straling is de dracht heel klein, dus wordt alle straling in een klein gebied geabsorbeerd.
- b γ -straling is hiervoor geschikt, want deze straling wordt nooit volledig geabsorbeerd, er gaat altijd een groot gedeelte door het lichaam heen. Voor röntgenstraling geldt dat ook, maar een röntgenbuis kun je niet inslikken of inspuiten.
- c Röntgenstraling komt niet uit een radioactieve bron, maar wordt met een apparaat opgewekt. Besmetting vindt alleen plaats als je een kleine radioactieve bron op of in je lichaam hebt. Dat kan dus niet bij röntgenstraling.

Opgave 60

- a Besmetting vindt plaats als je radioactief materiaal (dus atomen met instabiele kernen) op of in je lichaam krijgt. Bij bestraling absorbeert je lichaam (een gedeelte van) de energie van de ioniserende straling die van het radioactieve materiaal komt. Besmetting duurt totdat de bron uit of van je lichaam is. Bestraling duurt veel korter: zolang je in de buurt van het radioactieve materiaal bent.
- b Bij uitwendige bestraling bevindt de radioactieve bron zich buiten je lichaam. Bij inwendige bestraling bevindt de radioactieve bron zich in je lichaam.
- c Als er sprake is van uitwendige besmetting, kun je dit bestrijden door je grondig te wassen en het wegwerpen of wassen van de besmette kleding.
- d Bij een kernexplosie worden de β -stralers Cs-137 en Sr-90 in de lucht geblazen. Deze worden met de wind meegevoerd en vallen ergens anders weer op de grond. Mensen (en dieren) krijgen deze stoffen via voedsel binnen en het lichaam slaat de stoffen op in bot en in spierweefsel. Hier kan het nog heel lang blijven zitten en je van binnenuit bestralen. In tabaksrook zit de α -straler polonium-210. De longen van een roker worden dus bestraald door het radioactieve polonium.

Opgave 61

Antwoord **A** is juist. Er is sprake van besmetting als er zich op of in het lichaam radioactieve deeltjes bevinden. Het gevolg ervan is dat er straling op de huid of in het lichaam komt. Uiteindelijk kan de equivalente dosis van de ontvangen straling zo hoog worden dat er stralingsziekte optreedt.

Opgave 62

- a C-14 is een β -straler, Ra-226 zendt α - en γ -straling uit en Rn-222 is een α -straler.
- b α -stralers zijn gevaarlijker in het lichaam dan β -stralers. Daarmee zouden Ra-226 en Rn-222 allebei het gevaarlijkst zijn. Maar als je naar de halveringstijden van de isotopen kijkt, blijft Ra-226 veel langer radioactief. De halveringstijd van Rn-222 is maar 3,835 dagen, terwijl de halveringstijd van Ra-226 veel langer is: $1,6 \cdot 10^3$ jaar. De dosis hangt natuurlijk ook af van de hoeveelheid radioactief materiaal die je binnenkrijgt.

Opgave 63

's Avonds, als de schoonmakers bezig zijn, zal de röntgenapparatuur uit staan. Er is op dat moment geen röntgenstraling in de afdeling, dus een loodschort is niet nodig.

Opgave 64

Als de tumor vanuit verschillende richtingen wordt bestraald, wordt het omliggende weefsel telkens maar kort bestraald en daarmee wordt de schade aan het omliggende weefsel beperkt.

Opgave 65

- a α - en β -stralers dringen niet ver genoeg door in het voedsel of komen zelfs al niet door de verpakking heen.
- b Bij het doorstralen komen er geen radioactieve deeltjes op of in het voedsel. Het voedsel wordt niet besmet en wordt dus ook niet zelf radioactief.

Opgave 66

- a Absorptie van röntgen- of kernstraling betekent absorptie van stralingsenergie. Daarbij kan er schade aan het weefsel optreden. Een maat voor het mogelijke effect van ioniserende straling op het menselijk lichaam die rekening houdt met de soort straling, is de equivalente dosis H . Het absorberen van een hoge equivalente dosis veroorzaakt op korte termijn stralingsziekte: cellen en organen raken beschadigd en de afloop is vaak dodelijk. Van het absorberen van een lage equivalente dosis merk je op korte termijn niets: de weinige getroffen cellen repareren de beschadigingen vaak zelf of worden vervangen door nieuwe. Maar er kan wel ongecontroleerde celdeling ontstaan, hierdoor is er kans op tumorvorming op lange termijn.

- b Tegen uitwendige bestraling kun je je beschermen door de blootstellingstijd zo kort mogelijk te maken, afstand tot de bron te nemen en door jezelf af te schermen. Als je een radioactieve stof op je lichaam krijgt, moet je deze zo snel mogelijk verwijderen door goed te wassen en besmette kleding uit te doen en te wassen. Bij inwendige besmetting is er weinig aan te doen. De betreffende persoon moet geïsoleerd worden, totdat de activiteit in het lichaam voldoende is afgenomen.

Opgave 67

- a De dosis D is de hoeveelheid geabsorbeerde stralingsenergie per kilogram materiaal. Bij de equivalente dosis H wordt er rekening gehouden met de soort straling, vanwege het verschil in ioniserend vermogen. De equivalente dosis is daarmee een soort maat voor de mogelijke schade door ioniserende straling in het menselijk lichaam. De wettelijk vastgestelde dosislimieten geven een maximaal toegestane stralingsbelasting. In Binas vind je dit als effectieve totale lichaamsdosis. Dit is een dosislimiet die niet specifiek voor een bepaald orgaan geldt en bij bestraling van het gehele lichaam gelijk is aan de equivalente dosis.
- b De stralingsweegfactor is het grootst bij α -straling (namelijk 20).
- c Bij β - en γ -straling is de stralingsweegfactor 1, dus is de dosis (in gray) even groot als de equivalente dosis (in sievert).
- d De jaarlijkse stralingsbelasting mag voor iemand die niet beroepsmatig met straling bezig is maximaal 1 mSv zijn (effectieve totale lichaamsdosis).

Opgave 68

Oriëntatie:

Voor de dosis D geldt $D = \frac{E_{\text{str}}}{m}$. Hierin is E_{str} de geabsorbeerde stralingsenergie.

Uitwerking:

- a γ -straling heeft een groot doordringend vermogen, en gaat dus voor een deel ongehinderd door het water heen. De energie van de doorgelaten straling wordt niet door het water geabsorbeerd.
- b $D = \frac{E_{\text{str}}}{m} = \frac{12}{5,0} = 2,4 \text{ Gy}$

Opgave 69

Oriëntatie:

Voor de equivalente dosis H geldt $H = w_R \cdot D$ met $D = \frac{E_{\text{str}}}{m}$. Hierin is E_{str} de geabsorbeerde stralingsenergie en w_R de stralingsweegfactor, in dit geval die voor α -straling.

Uitwerking:

$$D = \frac{E_{\text{str}}}{m} = \frac{0,15}{70} = 2,14 \cdot 10^{-3} \text{ Gy}$$

$$H = w_R \cdot D = 20 \times 2,14 \cdot 10^{-3} = 4,3 \cdot 10^{-2} \text{ Sv} = 43 \text{ mSv}$$

Opgave 70

Oriëntatie:

Voor de equivalente dosis H geldt $H = w_R \cdot D$ met $D = \frac{E_{\text{str}}}{m}$. Hierin is E_{str} de geabsorbeerde stralingsenergie en w_R de stralingsweegfactor, in dit geval die voor röntgenstraling. De geabsorbeerde stralingsenergie E_{str} volgt uit het stralingsvermogen P_{str} , de blootstellingstijd Δt en het absorptiepercentage.

Uitwerking:

$$E_{\text{str}} = 0,73 \cdot P_{\text{str}} \cdot \Delta t = 0,73 \times 0,15 \cdot 10^{-6} \times 25 = 2,74 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

$$D = \frac{E_{\text{str}}}{m} = \frac{2,74 \cdot 10^{-6}}{70} = 3,91 \cdot 10^{-8} \text{ Gy}$$

$$H = w_R \cdot D = 1 \times 3,91 \cdot 10^{-8} = 3,9 \cdot 10^{-8} \text{ Sv} = 0,039 \mu\text{Sv}$$

Opgave 71

Vooral weefsels waarin veel celdelingen optreden zijn gevoelig voor het ontstaan van ongecontroleerde celdeling en (dus) het ontstaan van een tumor. Voor jongeren in de groei, waarbij in het lichaam nog relatief veel celdelingen optreden, is de dosislimiet daarom lager.

Opgave 72

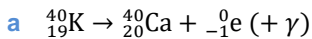
Oriëntatie:

Voor de equivalente dosis H geldt $H = w_R \cdot D$ met $D = \frac{E_{\text{str}}}{m}$. Hierin is E_{str} de geabsorbeerde stralingsenergie en w_R de stralingsweefactor, in dit geval die voor β -straling.

Uit de (vrijwel constante) activiteit A en de energie E_β van het bij verval uitgezonden β -deeltje volgt het vermogen van de uitgezonden straling: $P_{\text{str}} = A \cdot E_\beta$. De activiteit A geeft namelijk het aantal per seconde vervallende kernen K-40, en dus ook het aantal per seconde uitgezonden β -deeltjes. De geabsorbeerde stralingsenergie E_{str} volgt uit het stralingsvermogen P_{str} , de blootstellingstijd Δt en het absorptiepercentage (hier 100%).

De energie van het deeltje en de halveringstijd kun je opzoeken in Binas.

Uitwerking:



b $E_\beta = 1,33 \text{ MeV} = 1,33 \times 1,60 \cdot 10^{-13} = 2,13 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

c De halveringstijd van K-40 is $1,28 \cdot 10^9$ jaar. Vanwege deze zeer lange halveringstijd zal de activiteit van K-40 gedurende een jaar vrijwel constant zijn.

d De bij het verval van K-40 uitgezonden β -straling heeft in het lichaam een dracht van enkele mm en zal dus voor het overgrote deel door het spierweefsel zelf worden geabsorbeerd

e $P_{\text{str}} = A \cdot E_\beta = 8,2 \cdot 10^2 \times 2,13 \cdot 10^{-13} = 1,74 \cdot 10^{-10} \text{ W}$

$$E_{\text{str}} = P_{\text{str}} \cdot \Delta t = 1,74 \cdot 10^{-10} \times 365 \times 24 \times 3600 = 5,50 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

$$D = \frac{E_{\text{str}}}{m} = \frac{5,50 \cdot 10^{-3}}{28} = 1,97 \cdot 10^{-4} \text{ Gy}$$

$$H = w_R \cdot D = 1 \times 1,97 \cdot 10^{-4} = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ Sv} = 0,20 \text{ mSv}$$

Opgave 73

- a De γ -straling die het K-43 uitzendt wordt zichtbaar op de foto als zwarte plekken. In de linkeropname is veel meer zwart te zien, daar is dus meer K-43 opgenomen door de goed werkende hartspieren. De rechteropname is de slecht werkende hartspier.
- b Een voordeel van Tl-201 is dat het geen β -straling uitzendt, die zorgt namelijk voor inwendige bestraling van de hartspier en geeft geen bijdrage aan het scintigram. Een nadeel van Tl-201 is de grotere halveringstijd. De patiënt moet langer in het ziekenhuis blijven wachten tot hij minder straling uitzendt.

5.6 BEELDVORMING

Opgave 74

- a Waar
- b Waar
- c Niet waar: Bij nucleaire diagnostiek wordt een radioactieve stof in het lichaam van de patiënt gebracht. De uitgezonden γ -straling wordt buiten het lichaam gedetecteerd.
- d Niet waar: Voor het maken van een scintigram worden γ -actieve tracers gebruikt.
- e Niet waar: Een echogram wordt gemaakt met behulp van het terugkaatsen van geluidsgolven.

Opgave 75

- a Een overeenkomst tussen een röntgenopname en een CT-scan is dat er voor beide beeldvormingstechnieken röntgenstraling wordt gebruikt. Een verschil is dat een röntgenopname 2-dimensionaal is en uit één enkele opname bestaat, en een CT-scan 3-dimensionaal is en opgebouwd is uit een reeks opnamen.
- b Voor een gebitscontrole is het maken van een röntgenopname een geschikte beeldvormingstechniek: de opname is snel gemaakt, de stralingsbelasting is laag en tanden, wortels en kaakbot zijn goed zichtbaar op het beeld. Ook is met een röntgenopname snel te zien of er ergens een botbreuk zit.
- c
 - 1 Voor het in beeld brengen van een gecompliceerde botbreuk is een CT-scan geschikt. Het bot is dan van alle kanten te bekijken.
 - 2 Een CT-scan van de kransslagaders toont een dwarsdoorsnede van het hart. Op deze manier kan de arts eventuele afwijkingen van de kransslagaders opsporen.
- d Een röntgenopname is veel goedkoper en de stralingsbelasting van de patiënt is een stuk lager dan bij een CT-scan.

Opgave 76

- a
 - 1 Met een scintigram kun je goed de doorbloeding van bijvoorbeeld de hartspier in beeld brengen. Je kunt dan goed bekijken hoe het hart functioneert, dus terwijl het klopt.
 - 2 Met skeletscintigrafie (botscan) kan botkanker opgespoord worden.
 - 3 Bij een scintigram van de schildklier wordt gekeken of er afwijkingen in de schildklier zitten en hoe groot deze afwijkingen zijn.
- b
 - 1 Bij een zwangerschapscontrole kun je met een echogram de ligging van de foetus goed in beeld brengen. Deze beeldvormingstechniek is snel, goedkoop en niet schadelijk voor de foetus en de moeder.
 - 2 Bij een echo-endoscopie wordt een slang in de darmen gebracht. Op het uiteinde van de slang zit een echo-apparaat waarmee de arts informatie krijgt over de diepere lagen van de darmwand en de organen om de darm heen.

Opgave 77

- a Bij een CT-scan moet de patiënt worden vastgemaakt aan een tafel en schuift hij een soort koker in, dat kan beangstigend zijn.
Bij nucleaire diagnostiek krijgt de patiënt een radioactieve vloeistof ingespoten, moet eventueel een tijdje in quarantaine en mag pas weer het ziekenhuis uit als de radioactiviteit van de tracer voldoende is afgenomen.
- b De beste methode om stress te voorkomen is een goede voorlichting voorafgaande aan het onderzoek.

Opgave 78

techniek	natuurkundige achtergrond
röntgenfotografie	absorptie, transmissie
computertomografie (CT-scan)	absorptie, transmissie
nucleaire diagnostiek (scintigram)	halveringsdikte van menselijke weefsels tracer
echografie (echogram)	ultrasone geluidsgolf geluidssnelheid in menselijke weefsels terugkaatsing

Opgave 79

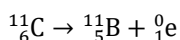
		Röntgenopname	CT-scan	Nucleaire diagnostiek	Echografie
a	maakt gebruik van röntgenstraling	X	X		
b	maakt gebruik van radioactieve stoffen			X	
c	gebruikt geen ioniserende straling				X
d	brengt zachte weefsels goed in beeld		X	(X)	X
e	brengt harde weefsels goed in beeld	X	X		
f	driedimensionaal beeld		X		

Opgave 80

- A** Nucleaire diagnostiek: de patiënt krijgt het radioactieve Tc-99m toegediend. Dit concentreert zich in de tumor(en), waardoor er op het scintigram een donkere plek ontstaat.
- B** Echografie: met geluidsgolven is de foetus goed in beeld te brengen en ook het kloppende hartje is goed te zien. Het is niet schadelijk voor de foetus.
- C** Röntgenfotografie: op een röntgenopname is goed te zien of de longen gevuld zijn met lucht of met vocht.
- D** Nucleaire diagnostiek: de patiënt krijgt het radioactieve Cr-51 toegediend. Dit hecht zich aan de rode bloedlichaampjes, waardoor op het scintigram de bloedstroom door het hart zichtbaar wordt.
- E** CT-scan: als er een tumor is kan met het driedimensionale beeld de plaats en de grootte bepaald worden.
- F** Röntgenfotografie, digital subtraction angiografie (DSA): de bloedvaten worden op de röntgenopname goed zichtbaar na aftrek van opnames met en zonder absorberende contrastvloeistof.
- G** Nucleaire diagnostiek: de patiënt krijgt het radioactieve I-123 toegediend. Dit hoopt zich op in de schildklier, waardoor de werking van de schildklier goed te zien is op het scintigram.
- H** Röntgenopname: de kunstheup en botten zijn goed te zien op een röntgenopname.
- I** Röntgenopname: op het beeld is goed te zien of de bijholten vol zitten.

5.7 VERDIEPING

Opgave 81



Opgave 82

- a** Als beide detectoren precies gelijktijdig getroffen worden, zijn de twee γ -fotonen midden tussen de detectoren ontstaan.
- b** De γ -fotonen bewegen zich met de lichtsnelheid dus het verschil in afgelegde afstand tussen de fotonen is $\Delta x = c \cdot \Delta t = 3,0 \cdot 10^8 \times 1,0 \cdot 10^{-10} = 0,030 \text{ m} = 3,0 \text{ cm}$. Dat betekent dat het ontstaanspunt van de γ -fotonen zich 1,5 cm uit het midden tussen beide detectoren bevindt, zodat de afstand tot de ene detector 48,5 cm is en de afstand tot de andere detector 51,5 cm.

Opgave 83

De patiënt heeft een radioactieve stof in zijn lichaam gekregen, is dus besmet en is daarmee een eventueel risico voor zijn omgeving. Omdat de radioactieve stof wordt uitgescheiden in de urine en ontlasting van de patiënt, moet de patiënt gebruik maken van een apart toilet. Maar de radioactieve stof zal ook vervallen. Na een aantal uur zal de patiënt veel minder straling uitzenden en mag dan naar huis.

Opgave 84

- a De CT-scan en de MRI-scan kunnen allebei gebruikt worden bij hersenonderzoek. Omdat de MRI-scan geen stralingsbelasting geeft, heeft deze beeldvormingstechniek de voorkeur.
- b Een MRI-scan is de duurste beeldvormingstechniek en daarmee 'te duur' voor de gewone sporter.
- c Bij een MRI-scan ligt de patiënt in een sterk magnetisch veld, waardoor ijzer, kobalt of nikkel bevattende voorwerpen uit het lichaam getrokken kunnen worden.

5.8 AFSLUITING

Opgave 85

- a Door de grote energie van röntgenfotonen kan deze straling diep in een materiaal doordringen. De absorptie van de röntgenstraling is groter voor botten dan voor zacht weefsel. Dat maakt röntgenstraling geschikt voor het maken van röntgenopnames waarop botten duidelijk zichtbaar zijn en andere weefsels minder goed zichtbaar. Een CT-scan is een driedimensionaal beeld dat is opgebouwd uit heel veel röntgenopnames.
Ook γ -straling is geschikt om in het lichaam te 'kijken'. Dat gebeurt bij nucleaire diagnostiek. Na het toedienen van een γ -straler als tracer, hoopt deze stof zich op in een bepaald deel van het lichaam. Dit is dan zichtbaar te maken met behulp van een gammacamera.
Kernstraling wordt ook gebruikt om tumoren in het lichaam te bestrijden. Dit kan door de tumor van buitenaf te bestralen met een γ -bron, of door de tumor inwendig te bestralen met een α - of een β -straler.
De risico's worden beperkt door de blootstellingsduur van het gezonde weefsel zo kort mogelijk te houden en door het gezonde weefsel (en het personeel) af te schermen voor de radioactieve straling.
- b De alternatieven voor het gebruik van ioniserende straling bij beeldvorming zijn de echografie en de MRI-scan. Bij echografie wordt gebruikgemaakt van geluidsgolven, die weerkaatsen op grensvlakken tussen verschillende weefsels, waarna de geluidsgolven gedetecteerd worden door de ontvanger. Bij een MRI-scan worden de waterstofkernen in een heel sterk magneetveld gericht en met radiogolven in trilling gebracht, waarna de waterstofkernen zelf radiogolven uitzenden die worden opgevangen door de antenne in de MRI-scanner.

Opgave 86

- a De fotonenergie E_f (in J) hangt af van de frequentie f (in Hz) van de elektromagnetische straling volgens: $E_f = h \cdot f$. Hierbij is h de constante van Planck: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.
- b Röntgenstraling is een vorm van elektromagnetische straling, die bestaat uit energie die zich als een stroom fotonen met de lichtsnelheid voortplant. Door de grote energie van de röntgenfotonen kan röntgenstraling diep in een materiaal doordringen en atomen ioniseren.
- c Kernstraling komt uit de atoomkern. Dat kunnen α - of β -deeltjes zijn of γ -fotonen. Kernstraling heeft een doordringend en een ioniserend vermogen. Vanwege het grote doordringend vermogen van γ -straling is deze geschikt voor het maken van allerlei soorten afbeeldingen van het inwendige van het lichaam, waarna een diagnose gesteld kan worden. Het ioniserend vermogen van alle drie soorten kernstraling wordt bij radiotherapie gebruikt voor het bestrijden van tumoren.
- d Kernstraling wordt uitgezonden door de atoomkernen van een radioactieve isotoop. In een radioactieve stof zijn de atoomkernen instabiel: op een willekeurig moment zendt zo'n instabiele atoomkern een α - of β -deeltje uit, en verandert daarbij in een atoomkern van een andere stof of het zendt een γ -foton uit en blijft dezelfde isotoop. Dit verschijnsel heet radioactief verval.
- e De activiteit A (in Bq) van een radioactieve stof is het aantal instabiele atoomkernen dat per seconde vervalft. Een activiteit van 1 Bq betekent dat er gemiddeld per seconde één atoomkern vervalft.
- f De halveringstijd $t_{1/2}$ is de tijd waarin de activiteit van een radioactieve stof telkens tweemaal zo klein wordt. Deze is per radioactieve stof verschillend.
- g Bij radioactief verval wordt de activiteit van een radioactieve stof in de loop van de tijd weergegeven door $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{t}{t_{1/2}}$.
- h Het atoomnummer Z is het aantal protonen in de kern. Het massagetal A is het aantal kerndeeltjes (protonen én neutronen) in de kern.

- i** Isotopen zijn atomen van dezelfde atoomsoort maar met een verschillend aantal neutronen in de kern. Het atoomnummer van isotopen is gelijk, maar het massagetal verschilt.
- j** Bij α -verval (${}^4_2\alpha$ of ${}^4_2\text{He}$) verdwijnen er twee protonen en twee neutronen uit de atoomkern.
Bij β -verval (${}^0_{-1}\beta$ of ${}^0_{-1}e$) verandert een neutron in een proton en komt er een elektron uit de kern.
Als bij radioactief verval een instabiele atoomkern een γ -foton uitzendt, verandert de samenstelling van de atoomkern niet.
- k** Met een vervalvergelijking geef je weer wat er bij het radioactief verval van een atoomkern gebeurt. Links van de pijl komt het symbool van de radioactieve isotoop, rechts het symbool van de nieuwe kern die ontstaat en het stralingsdeeltje. Het totale aantal kerndeeltjes en de totale elektrische lading moeten links en rechts van de pijl aan elkaar gelijk zijn.
- l** Voor het aantal instabiele atoomkernen N na n halveringstijden geldt: $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{t}{t_{1/2}}$.
- m** In een N, t -diagram kun je de activiteit A op een tijdstip t bepalen met een raaklijn aan de grafiek. Voor de activiteit A op een tijdstip t geldt: $A = -\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_{\text{raaklijn}}$.
- n** De formule voor de gemiddelde activiteit van een radioactieve stof is: $A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$.
- o** Als de atoommassa van een radioactieve isotoop is gegeven, is de massa van één atoom te berekenen met $m_a = \text{atoommassa} \cdot u$ waarbij u de atomaire massa-eenheid is: $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.
Is de massa m van de radioactieve stof in een bron bekend, dan is het aantal instabiele atoomkernen N te berekenen met $N = \frac{m}{m_a}$.
- p** De dracht is de afstand die α - en β -deeltjes afleggen in een materiaal. Bij absorptie van deze deeltjes botsen ze tegen atomen, waarbij de snelheid van de deeltjes steeds meer daalt, tot ze uiteindelijk stil staan en in het materiaal zijn opgenomen.
- q** De halveringsdikte is de dikte van de laag materiaal waarin de helft van het aantal röntgen- of γ -fotonen wordt geabsorbeerd. De fotonen gaan altijd met de lichtsnelheid. Bij absorptie van de fotonenergie door een atoom in het materiaal wordt het atoom geïoniseerd en verdwijnt het foton. De absorptie van de straling is nooit volledig: er zijn altijd fotonen die niet geabsorbeerd worden en door het materiaal heen dringen.
- r** De intensiteit I van röntgen- of γ -straling die een absorberend materiaal doorlaat hangt af van de dikte d van het materiaal volgens: $I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ waarbij $n = \frac{d}{d_{1/2}}$ en $d_{1/2}$ de halveringsdikte is.
- s** Niet alle elektromagnetische straling is schadelijk voor het menselijk lichaam. Alleen elektromagnetische straling met een frequentie die hoort bij UV-straling en hogere frequenties kan schade aanrichten in het lichaam. Deze straling is ioniserend. De mogelijk aangerichte schade hangt af van de dosis en van de soort straling: de ene soort straling kan meer schade aanrichten dan de andere. Iemand die langdurig aan UV-straling wordt blootgesteld kan op den duur huidkanker ontwikkelen. Als de straling meer energie bevat, zoals bij röntgenstraling of gammastraling, treden op korte termijn geen effecten op. Op langere termijn kunnen zich tumoren in het lichaam ontwikkelen.
Is de straling erg sterk en wordt door de patiënt een hoge dosis ontvangen, dan is het effect van de ioniserende straling op het lichaam direct merkbaar doordat organen beschadigd raken of het lichaam als geheel ziek wordt.
- t** Achtergrondstraling is de kosmische straling en de straling afkomstig van radioactieve stoffen op aarde en in het lichaam. Deze straling is overal op aarde aanwezig.
- u** Als een stralingsbron zich buiten het lichaam bevindt, zorgt dat voor uitwendige bestraling van het lichaam. Als een radioactieve stof zich op of in het lichaam bevindt, is er sprake van besmetting. Radioactieve stoffen in het lichaam zorgen voor inwendige bestraling.
- v** De dosis D (in Gy) is de hoeveelheid stralingsenergie E_{str} (in J) die per kg van het bestraalde weefsel of voorwerp is geabsorbeerd: $D = \frac{E_{\text{str}}}{m}$.
Bij de equivalente dosis H (in Sv) wordt rekening gehouden met het grotere ioniserend vermogen van α -straling: $H = w_R \cdot D$. Hierbij is w_R de stralingsweegfactor, deze is 20 voor α -straling en 1 voor de andere soorten straling.
- w** De effectieve totale lichaamsdosis is de equivalente dosis bij bestraling van het lichaam als geheel.

- x** Bij uitwendige bestraling kun je je op drie manieren beschermen:
- Zorg dat de blootstellingstijd zo kort mogelijk is.
 - Houd voldoende afstand tot de bron.
 - Scherm jezelf af met absorberend materiaal zoals lood of beton.
- y** **Röntgenfotografie:** De absorptie van röntgenstraling door de botten in het lichaam is groter dan de absorptie door de zachte weefsels. De röntgencamera wordt in de 'schaduw' van de botten niet of minder 'belicht' waardoor de botten duidelijk zichtbaar worden.
- Voordelen: Gemakkelijk, snel en goedkoop.
- Nadelen: Zachte weefsels niet goed zichtbaar, structuren vallen over elkaar heen en de patiënt loopt een (kleine) stralingsdosis op.
- Computertomografie (CT):** De röntgenbuis en de detector draaien rond het lichaam van de liggende patiënt, die langzaam in horizontale richting door de scanner beweegt. Uit heel veel digitale opnamen wordt een driedimensionaal beeld opgebouwd.
- Voordelen: Elke gewenste dwarsdoorsnede is mogelijk, goed beeld met goed contrast.
- Nadelen: Veel duurder dan een enkele röntgenopname en de patiënt loopt een veel grotere stralingsdosis op.
- Nucleaire diagnostiek met γ -of β^+ -straling:** Een geschikte radioactieve stof (de tracer) wordt in het lichaam van de patiënt gebracht. De van of bij de tracer afkomstige γ -straling wordt buiten het lichaam gedetecteerd met een of twee γ -camera's en weergegeven in de vorm van een tweedimensionaal scintigram of een 3D-beeld (PET en SPECT). Bij een PET-scan wordt gebruikgemaakt van een β^+ -vervallende tracer. De positronen die ontstaan bij verval annihileren snel met een elektron waarbij twee γ -fotonen worden uitgezonden in tegengestelde richtingen. Die γ -fotonen kunnen door detectoren rondom het lichaam geregistreerd worden. Daarmee wordt berekend waar de vervallen kern van de tracer zich bevindt. Uit alle metingen wordt dan een (driedimensionaal) beeld gemaakt van de concentraties van de tracer.
- Voordelen: Sommige processen of afwijkingen in organen zijn zichtbaar te maken.
- Nadelen: Duur en een stralingsdosis die tussen de röntgenfoto en de CT-scan in zit.
- Echografie:** Er worden ultrasone geluidsgolven het lichaam in gezonden. Deze geluidsgolven worden op de grensvlakken tussen verschillende weefsels voor een deel teruggekaatst. Uit het tijdsverschil tussen zenden en ontvangen van de echo's berekent de computer de 'diepte' van de grensvlakken en construeert daarmee een beeld.
- Voordelen: Gemakkelijk, snel, goedkoop en de patiënt loopt geen stralingsdosis op.
- Nadelen: Beelden zijn niet altijd duidelijk en vragen ervaring om ze te beoordelen. Longen en botten zijn hiermee niet te onderzoeken omdat het geluid hierop vrijwel volledig terugkaatst.

Opgave 87

- a** ${}_{53}^{131}\text{I} \rightarrow {}_{54}^{131}\text{Xe} + {}_{-1}^0\text{e} + \gamma$
- b** De schildkliercellen die het hardst werken nemen het meeste jodium-131 op. β -straling dringt veel minder ver door in een lichaam dan γ -straling. Dus wordt de β -straling alleen door de omliggende schildkliercellen geabsorbeerd en zal de schildkliercellen beschadigen, terwijl de γ -straling gewoon door de schildklier heen gaat.
- c** Omdat de γ -straling in geringe mate door het lichaam van de behandelde patiënt wordt geabsorbeerd, kan deze vanaf de patiënt naar de baby stralen en de baby schade toebrengen.
- d** De helling van de grafiek neemt af, dus wordt er per tijdseenheid minder straling geabsorbeerd en moet de activiteit wel afnemen.
- e** **Oriëntatie:**
De activiteit is het aantal kernen I-131 dat per seconde verval. Bij het verval van één kern wordt $3,0 \cdot 10^{-14}$ J geabsorbeerd en dus ook uitgezonden. In één uur wordt 25 mJ stralingsenergie uitgezonden, dus is te berekenen hoeveel kernen er vervallen in dat uur. Door vervolgens dat aantal te delen door 3600 s is de activiteit A te berekenen.
- Uitwerking:**
Er vervallen $\frac{25 \cdot 10^{-3}}{3,0 \cdot 10^{-14}} = 8,33 \cdot 10^{11}$ kernen per uur, dus $A = \frac{8,33 \cdot 10^{11}}{3600} = 2,3 \cdot 10^8$ Bq.

f Oriëntatie:

Voor de dosis D geldt $D = \frac{E_{\text{str}}}{m}$. Hiermee is de geabsorbeerde stralingsenergie E_{str} te berekenen. Met deze E_{str} en de geabsorbeerde energie per vervallen kern ($3,0 \cdot 10^{-14}$ J) is vervolgens te berekenen hoeveel kernen N er totaal zijn vervallen en dus opgenomen door de schilkklier. De massa hiervan is te berekenen met $m = N \cdot m_a \cdot u$ waarbij m_a de atomaire massa is van een I-131 atoom en u de atomaire massa-eenheid: $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg.

Uitwerking:

$$E_{\text{str}} = D \cdot m = 120 \times 0,045 = 5,4 \text{ J dus } N = \frac{5,4}{3,0 \cdot 10^{-14}} = 1,8 \cdot 10^{14}.$$

$$m = 1,8 \cdot 10^{14} \times 131 \times 1,66 \cdot 10^{-27} = 3,9 \cdot 10^{-11} \text{ kg} = 3,9 \cdot 10^{-8} \text{ g} = 0,039 \mu\text{g}$$

Opgave 88

a Oriëntatie:

Voor de activiteit A van een radioactieve bron geldt $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{t}{t_{1/2}}$.

Uitwerking:

Binas: voor Co-60 is $t_{1/2} = 5,27$ jaar

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow \frac{6,9 \cdot 10^{15}}{1,1 \cdot 10^{17}} = 0,0627 = 6,3\% \rightarrow n = 4 \text{ (keer gehalveerd: } 100\% \rightarrow 50\% \rightarrow 25\% \rightarrow 12,5\% \rightarrow 6,3\%)$$

$$t = n \cdot t_{1/2} = 4 \times 5,27 = 21 \text{ jaar}$$

De bron moet na 21 jaar worden vervangen.

b Oriëntatie:

De halveringsdikte $d_{1/2}$ voor γ -straling van 1 MeV in beton is op te zoeken in Binas. De hoeveelheid geabsorbeerde energie is te berekenen met $I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ waarbij $n = \frac{d}{d_{1/2}}$.

Uitwerking:

$$d_{1/2} = 4,6 \text{ cm geeft } n = \frac{d}{d_{1/2}} = \frac{32}{4,6} = 7,0 \text{ dus } \frac{I}{I_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{7,0} = 0,0078 = 0,78\%$$

c Oriëntatie:

Voor de equivalente dosis H geldt $H = w_R \cdot D$. Hierin is w_R de stralingsweegfactor, in dit geval die voor γ -straling. Voor de dosis D geldt $D = \frac{E_{\text{str}}}{m}$. Hierin is E_{str} de geabsorbeerde stralingsenergie. De maximale blootstellingstijd volgt uit de geabsorbeerde stralingsenergie E_{str} en het stralingsvermogen P_{str} .

Uitwerking:

$$D = \frac{H}{w_R} = \frac{2,0 \cdot 10^{-3}}{1} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Gy} \rightarrow E_{\text{str}} = D \cdot m = 2,0 \cdot 10^{-3} \times 70 = 0,14 \text{ J}$$

$$\Delta t = \frac{E_{\text{str}}}{P_{\text{str}}} = \frac{0,14}{2,54 \cdot 10^{-9}} = 5,51 \cdot 10^7 \text{ s} = 1,53 \cdot 10^4 \text{ uur}$$

De maximale blootstellingstijd is dus $1,5 \cdot 10^4$ uur (1,7 jaar).

Opgave 89

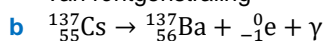
Oriëntatie:

Voor het controleren van de werking van de badges moet de badge bestraald worden met de soort straling waarvoor de badge gevoelig is.

Uitwerking:

a Een overeenkomst tussen röntgen- en γ -straling is dat ze beide een vorm van elektromagnetische straling zijn waarvan de fotonen veel meer energie hebben dan van zichtbaar licht.

Een verschil tussen röntgen- en γ -straling is de energie van de fotonen: de fotonenergie van γ -straling is groter dan die van röntgenstraling



- c Po-209 is een α -straler, en dus ongeschikt voor het testen van de badges op β -straling. Cs-137 en Sr-90 zijn beide β -stralers, maar Cs-137 zendt behalve β -straling ook γ -straling uit. Voor het testen van de badges op β -straling is dus Sr-90 het meest geschikt, omdat deze isotoop alleen β -straling uitzendt.

Opgave 90

a Oriëntatie:

Voor het aantal instabiele atoomkernen N in een radioactieve bron geldt $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{t}{t_{1/2}}$.

Uitwerking:

Zie Binas voor de halveringstijd van Tc-99: $2,1 \cdot 10^5$ jaar.

$$n = \frac{t}{t_{1/2}} = \frac{1,1 \cdot 10^6}{2,1 \cdot 10^5} = 5,2 \rightarrow N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{5,2} = 0,026 \cdot N_0$$

Na 1,1 miljoen jaar is dus nog 2,6% van het Tc-99 over.

- b Een Tc-99 kern bestaat uit 43 protonen en $99 - 43 = 56$ neutronen. Een Tc-100 kern bevat dus 57 neutronen.
 c Bij β -verval blijft het massagetal van de kern gelijk en neemt het atoomnummer met 1 toe: pijl c.
 d Zie grafiek: in 60 s is de activiteit gedaald van $16 \cdot 10^4$ Bq naar $1 \cdot 10^4$ Bq dus $4 \cdot t_{1/2} = 60 \text{ s} \rightarrow t_{1/2} = 15 \text{ s}$.

e Oriëntatie:

Het aantal instabiele atoomkernen ΔN dat in een periode Δt vervalt, bereken je uit de gemiddelde activiteit: $A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$.

Uitwerking:

Tussen $t = 0$ en $t = 10 \text{ s}$ is de gemiddelde activiteit $13 \cdot 10^4$ Bq:

$$A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t} \rightarrow \Delta N = -A_{\text{gem}} \cdot \Delta t = -13 \cdot 10^4 \times 10 = -1,3 \cdot 10^6$$

Er zijn in de eerste 10 s dus $1,3 \cdot 10^6$ kernen Tc-100 vervallen.

- f Het langlevende Tc-99 (halveringstijd $2,2 \cdot 10^5$ jaar) wordt door de bestraling met neutronen omgezet in het kortlevende Tc-100 (halveringstijd 15 s), waardoor de activiteit zeer snel afneemt tot vrijwel nul.
 Bij het verval van Tc-100 ontstaat Ru-100, een isotoop die volgens figuur 68 stabiel is en dus geen kernstraling uitzendt. (Tc-99 zendt bij verval β -straling uit, het vervalproduct is dus Ru-99 en dat is ook stabiel, alleen duurt dit veel langer.)

Opgave 91

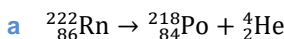
Oriëntatie:

Voor de equivalente dosis H geldt $H = w_R \cdot D$ met $D = \frac{E_{\text{str}}}{m}$. Hierin is E_{str} de geabsorbeerde stralingsenergie en w_R de stralingsweegfactor, in dit geval die voor α -straling.

Voor het vermogen van de uitzonden straling geldt: $P_{\text{str}} = A \cdot E_\beta$ waarbij A de activiteit is en E_β de energie van het bij verval uitgezonden α -deeltje. De geabsorbeerde stralingsenergie E_{str} volgt uit het stralingsvermogen P_{str} , de blootstellingstijd Δt en het absorptiepercentage (hier 100%).

De energie van het deeltje en de halveringstijd zijn op te zoeken in binas.

Uitwerking:



b Zie Binas: $E_\alpha = 5,486 \text{ MeV} = 5,486 \times 1,60 \cdot 10^{-13} = 8,78 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

c $P_{\text{str}} = A \cdot E_\alpha \rightarrow A = \frac{P_{\text{str}}}{E_\alpha} = \frac{5,3 \cdot 10^{-14}}{8,78 \cdot 10^{-13}} = 6,0 \cdot 10^{-2} \text{ Bq}$

d $E_{\text{str}} = P_{\text{str}} \cdot \Delta t = 5,3 \cdot 10^{-14} \times 365 \times 24 \times 3600 = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ J} \rightarrow D = \frac{E_{\text{str}}}{m} = \frac{1,67 \cdot 10^{-6}}{1,0} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ Gy} \rightarrow$
 $H = w_R \cdot D = 20 \times 1,67 \cdot 10^{-6} = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ Sv} = 0,033 \text{ mSv}$

- e Bij de berekening van de equivalente dosis (met 0,033 mSv als resultaat bij vraag d) is uitgegaan van de gemiddelde concentratie radongas in de buitenlucht. In de binnenlucht (in woningen, scholen, kantoren enzovoort) is de radonconcentratie meestal hoger, zodat ook de equivalente jaardosis hoger uitvalt. Daarnaast ontstaat bij het verval van Rn-222 de radioactieve poloniumisotoop Po-218 (een α -straler) en daaruit de radioactieve loodisotoop Pb-214 (een β -straler) enzovoort. Ook deze isotopen leveren een bijdrage aan de equivalente jaardosis als gevolg van de aanwezigheid van Rn-222 in de longen.