



Uitwerkingen opgaven leerboek

5.1 INTRODUCTIE

Opgave 1

- a Niet waar: Een negatief geladen ion heeft altijd meer elektronen dan het protonen in de kern heeft. Maar een positief ion heeft juist minder elektronen dan het protonen in de kern heeft.
- b Niet waar: In veel atoomkernen is het aantal protonen kleiner dan het aantal neutronen.
- c Waar
- d Niet waar: Elektronen kunnen in verschillende banen rondom de kern bewegen. De banen kunnen ook verschillen in afstand tot de kern.
- e Waar

Opgave 2

- a Diagnostisch onderzoek is erop gericht om vast te stellen welke ziekte of welk disfunctioneren in het lichaam de klachten veroorzaakt (een diagnose te stellen).
- b Voorbeelden van diagnostisch onderzoek met ioniserende straling:
 - 1 röntgenopname van een arm of been na een val, om te zien of er iets gebroken is;
 - 2 röntgenopname van de borstkas om te zien of de longen 'schoon' zijn (zo werd je vroeger 'doorgelicht' op tuberculose);
 - 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 ioniserende straling:
 - 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

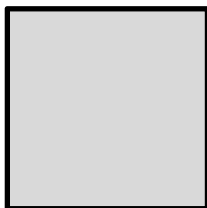
- a Waar
- b Waar
- c Niet waar: De fotonenergie van ultravioletstraling is kleiner dan de fotonenergie van röntgenstraling.
- d Niet waar: Straling met een gering doordringend vermogen wordt gemakkelijk geabsorbeerd.
- e Waar
- f Niet waar: Bijvoorbeeld zichtbaar licht is ook elektromagnetische straling, net als röntgenstraling, maar 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

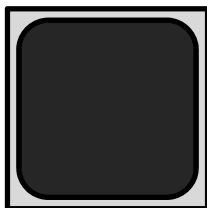
Het licht en de andere soorten elektromagnetische straling hebben er even lang over gedaan om bij de aarde te komen, dan moeten ze met dezelfde snelheid hebben gereisd. De snelheid is dus voor alle soorten elektromagnetische straling gelijk.



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

- a In stoffen met een grotere dichtheid zitten meer elektronen per cm^3 . Dat maakt de kans groter dat de röntgenfotonen elektronen treffen en geabsorbeerd worden. Er gaat dan minder röntgenstraling door een cm stof heen, dus is de halveringsdikte kleiner.
- b Als de fotonenergie groter wordt, zullen de fotonen verder in het materiaal doordringen, dus neemt de halveringsdikte toe.

Opgave 10

Eigen antwoord.

Opgave 11

- a $25\% = 50\% \times 50\%$ dus dat zijn 2 halveringsdiktes.
- b 2 halveringsdiktes = 16 cm dus 1 halveringsdikte = 8 cm.
- c De fotonen van röntgenstraling met een groter doordringend vermogen hebben meer energie, 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 75% te absorberen, dus is de halveringsdikte groter.

Opgave 12

$$a \quad I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow 12,5 = 100 \times \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^n = 0,125 \rightarrow n = \frac{\log(0,125)}{\log(0,5)} = 3,0$$

$$n = \frac{d}{d_{1/2}} \rightarrow d = n \cdot d_{1/2} = 3,0 \times 3,7 = 11 \text{ cm}$$

$$b \quad n = \frac{d}{d_{1/2}} = \frac{7,4}{3,7} = 2,0 \rightarrow I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{2,0} = 0,25 \cdot I_0$$

Het weefsel laat 25% van de invallende straling door, en absorbeert dus 75% van de invallende straling.

$$c \quad n = \frac{d}{d_{1/2}} = \frac{22,2}{3,7} = 6,0 \rightarrow I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{6,0} = 0,0156 \cdot I_0$$

Het weefsel laat 1,6% van de invallende straling door.



Opgave 13

a $E_f = 2,0 \text{ MeV}$

b $I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow 80 = 100 \times \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^n = 0,80 \rightarrow n = \frac{\log(0,80)}{\log(0,5)} = 0,322$

$$n = \frac{d}{d_{1/2}} \rightarrow d = n \cdot d_{1/2} = 0,322 \times 1,34 = 0,43 \text{ cm}$$

- c De oorspronkelijke loodplaat laat 80% van de straling door. Een tweemaal zo dikke loodplaat $0,80 \times 0,80 = 0,64 = 64\%$ 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 14

- a De plaat die de meeste straling doorlaat heeft het minste aantal 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 $\times$. 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 $\times$. 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.
- c Het gaat hier om het aantal halveringsdiktes waaruit de plaat bestaat: plaat A heeft 1 halveringsdikte en absorbeert het minst, plaat E heeft 4 halveringsdiktes en absorbeert het meest. Platen B, D en F hebben allemaal 2 halveringsdiktes terwijl plaat C 3 halveringsdiktes heeft.

	A	B	C	D	E	F
halveringsdikte $d_{1/2}$ (cm)	1	1	1	0,5	0,5	1,5
dikte d (cm)	1	2	3	1	2	3
aantal halveringsdiktes n	1	2	3	2	4	2

De volgorde wordt dan (tussen haakjes staan de platen die evenveel absorberen): A – (B – D – F) – C – E.

Opgave 15

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 dan 6,3% van de invallende straling door.

b $I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow 7,0 = 100 \times \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^n = 0,070 \rightarrow n = \frac{\log(0,070)}{\log(0,5)} = 3,84$

$$n = \frac{d}{d_{1/2}} \rightarrow d_{1/2} = \frac{d}{n} = \frac{8,0}{3,84} = 2,1 \text{ cm}$$

Opgave 16

Oriëntatie:

Voor de foton-energie 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 $E_f = h \cdot f \rightarrow f = \frac{E_f}{h} = \frac{5,6 \cdot 10^{-15}}{6,626 \cdot 10^{-34}} = 8,5 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$



Opgave 17

Oriëntatie:

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 dan 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 $E_f = \frac{3,3 \cdot 10^{-15}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,1 \cdot 10^4 \text{ eV} = 0,021 \text{ MeV}$

c 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 18

- a De halveringsdikte voor bot is kleiner dan voor zacht weefsel, dus het bot absorbeert meer röntgenstraling dan het weefsel. Het doordringend vermogen van röntgenstraling in bot is kleiner dan in zacht weefsel.
- b Doordat het doordringend vermogen van röntgenstraling in bot kleiner is, wordt de film in de 'schaduw' van de botten minder belicht. Op de röntgenfoto zien de botten er dan wit of lichtgrijs uit.
- c Beenmerg absorbeert minder straling dan bot. Er wordt meer straling doorgelaten dan bij bot, maar minder dan bij alleen maar zacht weefsel (omdat er bot rondom het beenmerg zit). Op de foto is het beenmerg dan te zien als een donkere strook in het bot (donkerder dan het bot op de foto, lichter dan het zachte weefsel op de foto).
- d Op de lijn B'B in figuur 15 bevindt zich alleen zacht weefsel en bij een gegeven fotonenergie $E_f = 4,0 \text{ MeV}$ is in het diagram van figuur 14 de halveringsdikte voor zacht weefsel (water) af te lezen: $d_{1/2} = 21 \text{ cm}$. De dikte d van dit weefsel is ruim 2 cm in figuur 15, dus dat is in werkelijkheid $6 \text{ cm} \rightarrow n = \frac{d}{d_{1/2}} = \frac{6}{21} = 0,29 \rightarrow I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{0,29} = 0,8 \cdot I_0$.
Het zachte weefsel laat dus meer dan 50% van de invallende straling door.
- e Lijn A'A is bijna even lang als lijn B'B maar op lijn A'A bevindt zich ook bot. Het bot absorbeert meer straling dan het zachte weefsel, dus is de doorgelaten straling langs de lijn A'A minder dan langs de lijn B'B.

Opgave 19

- a Volgens Binas: $d_{1/2} = 0,0106 \text{ cm}$
- b $n = \frac{d}{d_{1/2}} = \frac{0,055}{0,0106} = 5,2 \rightarrow I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{5,2} = 0,027 \cdot I_0$
Het loodschort laat 2,7% van de invallende straling door.
- c Aflezen bij 50% geeft $d_{1/2} = 0,87 \text{ cm}$.
- 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 5,2 halveringsdiktes:
 $n = \frac{d}{d_{1/2}} \rightarrow d = n \cdot d_{1/2} = 5,2 \times 0,87 = 4,5 \text{ cm}$.
- f Als het medisch personeel de hele dag met een loodschort van 4,5 cm dik moet lopen zou dat veel te zwaar zijn. Het personeel kan zich ook beschermen door achter een speciale muur te gaan staan die dezelfde bescherming biedt. In die muur zijn dikke loodplaten verwerkt.

5.3 KERNSTRALING

Opgave 20

- a Niet waar: Uit de kern van een radioactief atoom kunnen drie soorten straling komen: α -straling, β -straling en γ -straling. Röntgenstraling wordt gemaakt door een röntgenapparaat.
- b Niet waar: Een radioactieve atoomkern stoot bij α - en β -verval een deeltje uit. Het uitgestoten deeltje is zelf niet radioactief. Bij γ -verval wordt een foton uitgezonden.
- c Niet waar: Een α -deeltje bestaat uit twee protonen en twee neutronen.



- d Niet waar: Het doordringend vermogen van α -straling is kleiner dan van β -straling en veel kleiner dan van γ -straling.
- e Waar
- f 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 en/of γ -fotonen uitzenden).
- g Niet waar: De activiteit van een radioactieve bron hangt af van het aantal instabiele atoomkernen **en** van de soort radioactieve stof.
- h Niet waar: Na twee halveringstijden is de activiteit van een radioactieve bron afgenomen tot 25%.

Opgave 21

- a α -straling c γ -straling
- b röntgenstraling d β -straling

Opgave 22

- a Bij radiodiagnostiek moet de straling door het lichaam heen gaan (of door een deel ervan) om aan de andere kant (of de buitenkant) van het lichaam gedetecteerd te kunnen worden. Hiervoor is röntgen- of γ -straling nodig want deze straling heeft een groot doordringend vermogen.
- b Bij de inwendige bestraling van tumoren wordt de radioactieve bron in of dichtbij de tumor geplaatst. Om de tumor effectief te bestralen en het omliggende weefsel zo weinig mogelijk te bestralen is een β -straler nodig. De β -straling dringt minder diep in het weefsel door en het ioniserend vermogen is groter dan van γ -straling. Een α -straler is niet geschikt doordat α -straling niet of nauwelijks doordringt in de tumor.
- c De α - en β -deeltjes raken bij de botsing energie kwijt, waardoor ze na de botsing langzamer zullen gaan.
- d Als de α - of β - straling een groot ioniserend vermogen heeft, vinden er veel ionisaties plaats in het materiaal. Door de vele ionisaties zal de snelheid van de α - en β -deeltjes snel afnemen, waardoor de deeltjes snel stil komen te staan en dus niet ver in het materiaal kunnen doordringen.

Opgave 23

- a Bij controle op borstkanker is röntgenstraling het meest geschikt. Er wordt een röntgenopname van alleen de beide borsten gemaakt. Er wordt weinig schade aangericht en er gaat veel straling door het weefsel heen.
- b Voor het gebruik als tracer is alleen een γ -straler geschikt: de straling is buiten het lichaam meetbaar en richt in het lichaam weinig schade aan.
- c Bij het behandelen van een tumor met inwendige bestraling is een β -straler het meest geschikt. De bestraling is effectief door het kleine doordringende vermogen in combinatie met het grote ioniserende vermogen. Van een α -straler zou de straling niet ver genoeg in de tumor doordringen en bij gebruik van een γ -straler zou slechts een klein deel van de straling in de tumor worden geabsorbeerd.
- d Als er een radioactieve bron buiten het lichaam wordt gebruikt, is een γ -straler het meest geschikt. α - en β -stralers dringen niet of niet ver genoeg door in het lichaam.
- e Bij bestraling van een huidtumor zal de straling van een β -straler net genoeg de huid binnen kunnen dringen om de schadelijke cellen te doden. Van een α -straler zou de straling niet door de dode opperhuid heen komen en dus de tumor niet bereiken.
- f Injectiespuiten kunnen het best gesteriliseerd worden met γ -straling, dat gaat goed door het plastic verpakkingsmateriaal heen. Het geringe ioniserende vermogen is te compenseren door een grote intensiteit van de straling.

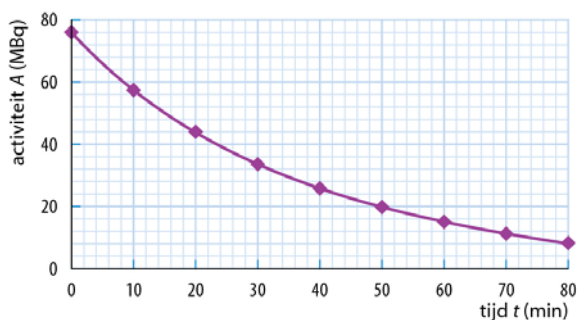
Opgave 24

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



Opgave 25

a Zie figuur.



b Aflezen wanneer $A = \frac{1}{2} \times 75,9 = 37,9$ MBq: $t_{1/2} = 25$ min.

c 5 keer gehalveerd na $5 \times 25 = 125$ min.

Opgave 26

a 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.

b 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.

c De aarde bestaat al miljarden jaren. De stoffen met een korte halveringstijd zijn al lang helemaal vervallen.

Opgave 27

Eigen antwoord.

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 28 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 $\rightarrow t = 10 \times 30 = 300$ jaar.



Opgave 29

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow 3 = 40 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^n = 0,075 \rightarrow n = \frac{\log(0,075)}{\log(0,5)} = 3,7; n = \frac{t}{t_{1/2}} \rightarrow t = n \cdot t_{1/2} = 3,7 \times 5,3 = 20 \text{ jaar}$$

De activiteit is tot 5 kBq afgenomen na 20 jaar.

Opgave 30

$$a \quad A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow 15 = 160 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^n = 0,094 \rightarrow n = \frac{\log(0,094)}{\log(0,5)} = 3,4$$

$$n = \frac{t}{t_{1/2}} \rightarrow t_{1/2} = \frac{t}{n} = \frac{8}{3,4} = 2,3 \text{ uur}$$

$$\text{Na 15 uur is } n = \frac{15}{2,3} = 6,4 \text{ dus is de activiteit } A = 160 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{6,4} = 1,9 \text{ kBq}$$

$$b \quad A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow 0,11 = 160 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^n = 0,00069 \rightarrow n = \frac{\log(0,00069)}{\log(0,5)} = 10,5$$

$$t = n \cdot t_{1/2} = 10,5 \times 2,3 = 24 \text{ uur}$$

Opgave 31

- a De activiteit van een bron is evenredig met het aantal instabiele kernen van de radioactieve stof in die bron. Dus het aantal instabiele kernen van bron A is op $t = 0$ s tweemaal zo groot als het aantal instabiele kernen van bron B.
- b Bron B loopt eigenlijk steeds één halveringstijd 'achter' op bron A. De activiteit van bron A blijft dus steeds twee keer zo groot als de activiteit van bron B. Zie 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 32

- 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 halveringstijd van bron B). De verstreken tijd is dan $6 \times 8,0 = 3 \times 16 = 48$ uur.

Opgave 33

$$a \quad \text{Na 10 s is } n = \frac{10}{4,0} = 2,5 \text{ dus is de activiteit } A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = 2,0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{2,5} = 0,35 \text{ MBq}$$

- b Het aantal kernen dat is vervallen tussen $t = 0$ en $t = 10$ s is te bepalen door een grafiek van het verloop van de activiteit tekenen en de 'oppervlakte onder de grafiek' tussen $t = 0$ en $t = 10$ s te bepalen.

- c Met behulp van de gemiddelde activiteit tussen $t = 0$ en $t = 10$ s kunnen we een schatting maken:

$$A_{\text{gem}} = \frac{2,0 + 0,35}{2} = 1,18 \text{ MBq waarmee het aantal vervallen kernen } N = A_{\text{gem}} \cdot \Delta t = 1,18 \cdot 10^6 \times 10 = 1,2 \cdot 10^7 \text{ zou zijn.}$$

De verstreken tijd is $2,5 \times$ zo groot als de halveringstijd dus de grafiek is bij benadering geen rechte lijn tussen $t = 0$ en $t = 10$ s. Doordat de grafiek hol is, ligt het werkelijke aantal dus flink lager dan de berekende waarde. De schatting is maximaal ongeveer $1,0 \cdot 10^7$ kernen.



Opgave 34

Voor A, B en C duurt het afnemen tot 1,25 Bq drie halveringstijden, dus duurt het bij B het langst. Maar bij E is de beginactiviteit 2 x zo groot als bij B dus daar duurt het nog langer. Bij F is de beginactiviteit nog 2 x zo groot als bij E maar de halveringstijd is 140 s korter dus blijft E de winnaar met de langste tijd tot de activiteit gedaald is tot 1,25 Bq. Voor de verdere volgorde is het handiger om een tabel te maken (zie hieronder). Bedenk voor elke stof hoeveel halveringstijden er nodig zijn om de activiteit te laten afnemen 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).

De volgorde van langste tijd naar kortste tijd is nu: E – B – A – F – D – C.

	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

- 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.
- Lees 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. β -straling wil je daar niet bij hebben, omdat die niet buiten het lichaam is te detecteren maar wel lokaal in het lichaam veel schade kan toebrengen. Bovendien moet de halveringstijd klein zijn, zodat na enkele uren of 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 moet het doordringend vermogen betrekkelijk klein zijn om omliggend weefsel zo veel mogelijk te sparen. 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

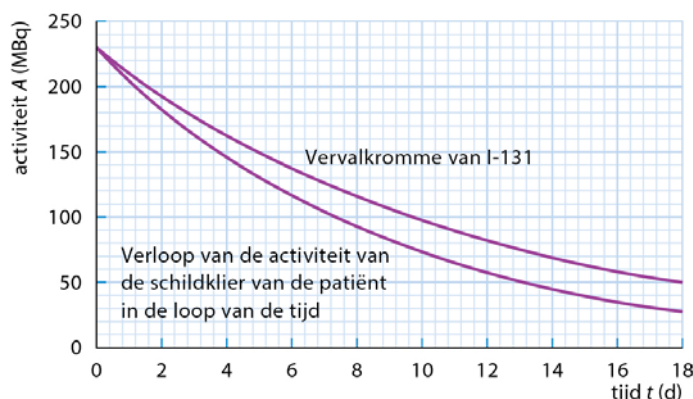
- Alleen γ -straling is meetbaar buiten het lichaam, α - en β -straling worden in het lichaam al helemaal geabsorbeerd.
- Binas: de halveringstijd van I-123 is 13,3 uur. $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow \frac{1}{6} = \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow n = \frac{\log(1/6)}{\log(0,5)} = 2,58 \rightarrow t = n \cdot t_{1/2} = 2,58 \times 13,3 = 34$ uur.

Opgave 37

- I-131 zendt β^- - en γ -straling uit.
- $t_{1/2} = 8,0$ dagen
- De β -straling heeft dichtbij een groot ioniserend vermogen, dus deze straling is vooral verantwoordelijk voor de beschadiging van de cellen.



d Zie figuur.



- e Omdat het radioactieve I-131 niet alleen verdwijnt door radioactief verval, maar ook doordat een overmaat aan jodium door het lichaam zelf wordt afgevoerd, neemt het aantal radioactieve deeltjes in het lichaam sneller af dan verwacht.
- f Aflezen op welk tijdstip de activiteit 115 MBq is geworden: $t_{1/2} = 6$ dagen.

5.4 RADIOACTIEF VERVAL

Opgave 38

- a Niet waar: In een radioactieve bron zitten behalve instabiele isotopen, en de vervalproducten meestal ook stabiele isotopen.
- b Waar voor verval met uitzending van α - of β -deeltjes, niet waar voor γ -straling.
- c Niet waar: Het atoomnummer geeft het aantal protonen in een atoomkern.
- d Waar
- e Niet waar: Isotopen zijn atomen met hetzelfde aantal protonen in de kern maar een verschillend aantal neutronen.
- f Waar
- g Waar
- h Waar
- i Niet waar: Voor α -verval zijn twee protonen en vier neutronen nodig. Tritium heeft maar drie kerndeeltjes en kan dus geen α -deeltje uitzenden bij verval. (Tritium zendt een β -deeltje uit.)

Opgave 39

Het atoomnummer Z geeft het aantal protonen aan, en daarmee ook de lading van de kern. Het massagetal A geeft aan hoeveel kerndeeltjes er zijn, dat is de som van de protonen en de neutronen.

Een proton heeft een lading $+1$ en 1 kerndeeltje $\rightarrow Z = 1$ en $A = 1 \rightarrow {}^1_1\text{p}$ of ${}^1_1\text{H}$.

Een neutron heeft lading 0 en 1 kerndeeltje $\rightarrow Z = 0$ en $A = 1 \rightarrow {}^1_0\text{n}$.

Een α -deeltje is een heliumkern met 2 protonen en 2 neutronen $\rightarrow Z = 2$ en $A = 4 \rightarrow {}^4_2\alpha$ of ${}^4_2\text{He}$.

Een β -deeltje is een elektron met lading -1 en 0 kerndeeltjes $\rightarrow Z = -1$ en $A = 0 \rightarrow {}^0_{-1}\beta$ of ${}^0_{-1}\text{e}$.

Een β^+ -deeltje is een positron met lading $+1$ en 0 kerndeeltjes $\rightarrow Z = +1$ en $A = 0 \rightarrow {}^0_{+1}\beta$ of ${}^0_{+1}\text{e}$.



Opgave 40

- a Vul eerst de tabel aan met behulp van: $Z + N = A$, zoek vervolgens de naam van de isotoop en het soort straling in Binas, zie onderstaande tabel.
- b Zie onderstaande tabel.
- c Bij β^- -verval gaat het atoomnummer 1 omhoog en blijft het massagetal gelijk en bij β^+ -verval gaat het atoomnummer 1 omlaag en blijft het massagetal gelijk. Zie onderstaande tabel voor de isotoop die dan ontstaat.
- d ${}^{64}_{29}\text{Cu} \rightarrow {}^{64}_{30}\text{Zn} + {}^0_{-1}\beta$ of ${}^{64}_{29}\text{Cu} \rightarrow {}^{64}_{28}\text{Ni} + {}^0_{+1}\beta$
 ${}^{16}_7\text{N} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + {}^0_{-1}\beta$
 ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^0_{+1}\beta$
- e Alle ontstane isotopen zijn stabiel, dus niet radioactief.

isotoop	Z	N	A	naam	symbool	soort straling	vervalproduct(en)
P	29	35	64	koper	Cu-64	β^- en β^+ (en γ)	Zn-64 en Ni-64
Q	7	9	16	stikstof	N-16	β^- (en γ)	O-16
R	6	5	11	koolstof	C-11	β^+	B-11

Opgave 41

- a Zoek het atoomnummer Z op in Binas en vervolgens het vervalproduct, zie 4^{de} en 5^{de} kolom in de tabel bij d.
- b Bij β^- -verval gaat het atoomnummer 1 omhoog en blijft het massagetal gelijk. Bij β^+ -verval gaat het atoomnummer 1 omlaag en blijft het massagetal gelijk. Bij α -verval gaat het atoomnummer 2 omlaag en het massagetal 4 omlaag. Zie kolom 6 t/m 9 in de tabel bij d.
- c ${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^0_{-1}\beta$
 ${}^{12}_7\text{N} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^0_{+1}\beta$
 ${}^{90}_{38}\text{Sr} \rightarrow {}^{90}_{39}\text{Y} + {}^0_{-1}\beta$
 ${}^{240}_{94}\text{Pu} \rightarrow {}^{236}_{92}\text{U} + {}^4_2\alpha$
- d Zie kolom 10 in onderstaande tabel.

radioactieve isotoop					vervalproduct				
atoomsoort	isotoop	Z	A	soort straling	Z	A	naam	symbool	radioactief?
waterstof	H-3	1	3	β^-	2	3	helium	He-3	nee
stikstof	N-12	7	12	β^+	6	12	koper	C-12	nee
strontium	Sr-90	38	90	β^-	39	90	yttrium	Y-90	ja
plutonium	Pu-240	94	240	α	92	236	uranium	U-236	ja

Opgave 42

- a ${}^{99}_{42}\text{Mo} \rightarrow {}^{99m}_{43}\text{Tc} + {}^0_{-1}\beta$
- b ${}^{99m}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma$
- c ${}^{100}_{42}\text{Mo} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{101}_{43}\text{Tc} \rightarrow {}^{99}_{42}\text{Mo} + {}^1_1\text{p} + {}^1_0\text{n}$

Opgave 43

- a ${}^1_0\text{n} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e}$ en ${}^1_1\text{p} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^0_{+1}\text{e}$
- b β^- -verval treedt alleen op bij isotopen die zich rechtsonder de stabiele lijn met zwarte blokjes bevinden. Bij β^- -verval neemt het aantal neutronen met 1 af en het aantal protonen met 1 toe, waardoor het atoom één plaats naar links en één plaats naar boven schuift en meer in de buurt van de zwarte blokjes komt: het atoom wordt stabiel(er). Kennelijk hebben de instabiele isotopen rechts van de stabiele isotopen te veel neutronen ten opzichte van het aantal protonen.
- c β^+ -verval treedt alleen op bij isotopen die zich linksboven de stabiele lijn met zwarte blokjes bevinden. Bij β^+ -verval neemt het aantal neutronen met 1 toe en het aantal protonen met 1 af, waardoor het atoom één plaats naar rechts en één plaats naar onder schuift en meer in de buurt van de zwarte blokjes komt: het atoom wordt stabiel(er). Kennelijk hebben de instabiele isotopen links van de stabiele isotopen te weinig neutronen ten opzichte van het aantal protonen.



Opgave 44

- a ${}^{203}_{81}\text{Tl} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{204}_{81}\text{Tl}$
 b ${}^{204}_{81}\text{Tl} \rightarrow {}^{204}_{82}\text{Pb} + {}^0_{-1}\beta$

Opgave 45

Eigen antwoord.

Opgave 46

$A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N$: de halveringstijd van bron A is 8 × zo groot, dus is bij een gelijk aantal instabiele atoomkernen N de activiteit A van bron A 8 × zo klein.

Opgave 47

- a Na drie halveringstijden is $\left(\frac{1}{2}\right)^3$ dus een achtste van het aantal instabiele atoomkernen over, er is dus $\frac{7}{8}$ ste vervallen.
 b De activiteit van de bron is na drie halveringstijden ook nog maar een achtste van de aanvankelijke activiteit. De activiteit is immers evenredig met het aantal instabiele kernen.
 c Bij α- of 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 kleiner geworden, doordat er α- of β-deeltjes zijn uitgezonden en de bron hebben kunnen verlaten. Maar alle α-deeltjes samen hebben een heel kleine massa ten opzichte van de hele bron en de massa van ontsnapte β-deeltjes is praktisch te verwaarlozen.
 d Om de massa van de bron te berekenen heb je het aantal atoomkernen N nodig en de atoommassa m_a van het atoom in de eenheid u waarbij $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg. Je berekent de massa van de bron in kg dan met $m = N \cdot m_a \cdot u$.

Opgave 48

- a Maak de vervalvergelijking kloppend: ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\alpha$. 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 $40 \cdot 10^8$ Po-210 kernen dus is de totale massa van de kernen:
 $m = 40 \cdot 10^8 \times 3,49 \cdot 10^{-25} = 1,4 \cdot 10^{-15}$ kg
 c Na drie halveringstijden is het aantal Po-210 atoomkernen 3 × gehalveerd, dus 8 × zo klein geworden:
 $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 = 40 \cdot 10^8 \times \frac{1}{8} = 5,0 \cdot 10^8$
 d Elke Po-210 atoomkern die vervalt, verandert in een Pb-206 atoomkern. Na drie halveringstijden zijn er $40 \cdot 10^8 - 5,0 \cdot 10^8 = 35 \cdot 10^8$ Po-210 kernen vervallen. Dan zijn er dus ook $35 \cdot 10^8$ Pb-206 kernen ontstaan. De bron bevat dan $35 \cdot 10^8$ Pb-206 kernen.



Opgave 49

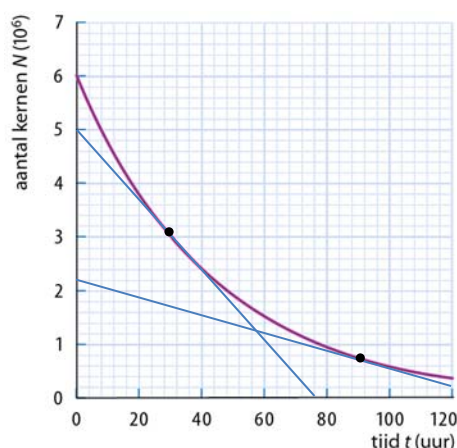
Oriëntatie:

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

Uitwerking:

a Aflezen bij $n = 3 \cdot 10^6$ geeft $t_{1/2} = 30$ uur.

b $A = -\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_{\text{raaklijn}} = \frac{(5,0 - 0) \cdot 10^6}{76 \times 3600} = 18 \text{ Bq}$



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

d Het aantal actieve kernen is $4 \times$ zo klein na twee halveringstijden, dan is de activiteit ook $4 \times$ zo klein.

e Op $t = 30$ uur zijn er $3,0 \cdot 10^6$ actieve kernen, dus is $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N = \frac{\ln 2}{30 \times 3600} \times 3,0 \cdot 10^6 = 19 \text{ Bq}$, dat komt vrijwel overeen met het antwoord op vraag b.

f Op $t = 0$ uur zijn er $6,0 \cdot 10^6$ actieve kernen, dus is $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N = \frac{\ln 2}{30 \times 3600} \times 6,0 \cdot 10^6 = 39 \text{ Bq}$

g Je kunt de helling van de raaklijn op $t = 0$ uur bepalen in het diagram, die moet hetzelfde zijn als het antwoord op vraag f.

Opgave 50

Oriëntatie:

Voor de gemiddelde activiteit A_{gem} in een periode Δt geldt: $A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$, voor de relatie tussen de activiteit A en het aantal actieve kernen N geldt: $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N$ en de massa van de bron is te berekenen met $m = N \cdot m_a \cdot u$.

Uitwerking:

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

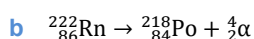
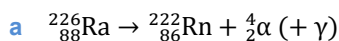
b Uit Binas blijkt dat de halveringstijd van Po-210 138 dagen is. Dan zal de activiteit in één uur vrijwel constant zijn.

c $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N \rightarrow N = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot A = \frac{138 \times 24 \times 3600}{\ln 2} \times 2,3 \cdot 10^2 = 3,9 \cdot 10^9 \rightarrow$

$$m = N \cdot m_a \cdot u = 3,9 \cdot 10^9 \times 210 \times 1,66 \cdot 10^{-27} = 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ kg}$$



Opgave 51



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

$$A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N \rightarrow N = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot A = \frac{3,825 \times 24 \times 3600}{\ln 2} \times 3,0 = 1,43 \cdot 10^6$$

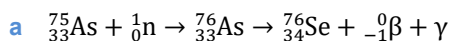
Het gemiddeld aantal atomen Rn-222 per m³ buitenlucht is dus $1,4 \cdot 10^6$.

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

De massa m van het Rn-222 per m³ buitenlucht volgt uit N en m_a (het aantal atomen en de massa van een atoom):

$$m = N \cdot m_a = 1,43 \cdot 10^6 \times 3,69 \cdot 10^{-25} = 5,3 \cdot 10^{-19} \text{ kg}$$

Opgave 52



b Achtergrondstraling is 24 cpm, dus " A_0 " = 164 – 24 = 140 cpm en " A " = 59 – 24 = 35 cpm $\rightarrow \frac{A}{A_0} = \frac{35}{140} = 0,25$.

Dus de activiteit is 2 × gehalveerd $\rightarrow 2 \cdot t_{1/2} = 53,6 \text{ uur} \rightarrow t_{1/2} = 26,8 \text{ uur} = 1,11 \text{ dag}$. Volgens Binas is de halveringstijd van As-76 1,08 dag dus deze haar zou arseen kunnen bevatten.

c $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N \rightarrow N = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot A = \frac{1,08 \times 24 \times 3600}{\ln 2} \times 12 = 1,62 \cdot 10^6$

$$m_a = 76 \text{ u} = 76 \times 1,66 \cdot 10^{-27} = 1,26 \cdot 10^{-25} \text{ kg} \rightarrow$$

$$m = N \cdot m_a = 1,62 \cdot 10^6 \times 1,26 \cdot 10^{-25} = 2,0 \cdot 10^{-19} \text{ kg}$$

5.5 STRALINGSBELASTING

Opgave 53

a Niet waar: Röntgen- en γ -straling kunnen nooit volledig door een materiaal worden geabsorbeerd.

b Waar: De dikte van een materiaal moet dan groter zijn dan de dracht.

c Niet waar: Bij het berekenen van de equivalente dosis wordt rekening gehouden met het soort straling.

d Niet waar: α - en β -straling geven hun energie geleidelijk af door botsingen met atomen. Daardoor neemt hun snelheid af. De fotonen van röntgen- en γ -straling geven al hun energie in één keer af bij ionisatie, en bestaan daarna niet meer.

e Waar

f Waar

g Niet waar: Bij uitwendige bestraling is vooral γ -straling gevaarlijk. Bij uitwendige bestraling is α -straling niet gevaarlijk, deze straling dringt niet door de dode laag van de huid heen. (α -straling is vooral gevaarlijk bij inwendige bestraling van bijvoorbeeld longweefsel.)

Opgave 54

a Dracht is de afstand die α - en β -deeltjes afleggen in een materiaal. Bij de absorptie van α - en β -straling botsen deze deeltjes en de elektronen tegen atomen, waarbij ze die atomen ioniseren en waardoor 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 waarbij de helft van het aantal röntgen- of γ -fotonen wordt geabsorbeerd. De fotonen bewegen altijd met de lichtsnelheid en kunnen niet worden afgeremd. Bij een treffen met een atoom in het materiaal wordt de fotonenergie geabsorbeerd: het atoom wordt geïoniseerd en het foton bestaat niet meer. De absorptie is nooit volledig: er zijn altijd fotonen die door het materiaal heen gaan.



Opgave 55

- a Bij het maken van een röntgenopname wordt je doorstraald met ioniserende straling. De röntgenfoto is niet radioactief en je wordt ook niet radioactief besmet.
- b 's Avonds, als de schoonmakers komen, zal de röntgenapparatuur uit staan. Er is dan geen sprake van röntgenstraling, dus een loodschort is niet nodig.

Opgave 56

- a De radioactieve stoffen in je lichaam krijg je binnen via je voedsel, het water dat je drinkt en inademing van de lucht.
- b Figuur 47: de equivalente dosis van één röntgenfoto van je gebit is 0,01 mSv. Figuur 49: de equivalente dosis achtergrondstraling is in Nederland 1,8 mSv per jaar. Dus is de equivalente dosis van 180 röntgenfoto's van je gebit gelijk aan de jaarlijkse equivalente dosis achtergrondstraling.
- c Figuur 47: de equivalente dosis van één CT-scan is 10 mSv en de equivalente dosis achtergrondstraling per jaar is in Nederland 1,8 mSv. De equivalente dosis van een CT-scan is $\frac{10}{1,8} = 5,6 \times$ zo groot als de jaarlijkse dosis achtergrondstraling.

Opgave 57

- 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 Alleen γ -straling is hiervoor geschikt, want van deze straling wordt in het lichaam maar voor een deel geabsorbeerd. Buiten het lichaam is daardoor de γ -straling te meten (met een speciale gammacamera).
- c Röntgenstraling komt niet uit een radioactieve bron, maar wordt met een apparaat opgewekt. Besmetting vindt alleen plaats als je een radioactieve bron op of in je lichaam hebt. Dat kan dus niet bij röntgenstraling.

Opgave 58

- 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 ioniserende straling die van het radioactieve materiaal komt. Besmetting duurt totdat de bron uit of van je lichaam is, of praktisch geheel vervallen. Bestraling duurt veel korter: zolang je in de buurt van het radioactieve materiaal bent.
- b 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.
- c Bij een kernexplosie worden de β -stralers Cs-137 en Sr-90 de lucht in 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 59

- a C-14 is een β -straler, Rn-222 is een α -straler en Ra-226 zendt α - en γ -straling uit.
- b α -stralers zijn gevaarlijker in het lichaam dan β -stralers, γ -straling is het minst gevaarlijk in het lichaam. Daarmee zouden Ra-226 en Rn-222 allebei het gevaarlijkst zijn. Maar als je naar de halveringstijden van de isotopen kijkt, is Rn-222 gevaarlijker dan Ra-226 omdat de halveringstijd van Rn-222 maar 3,835 dagen is terwijl de halveringstijd van Ra-226 veel langer is: $1,6 \cdot 10^3$ jaar. Dus zal de activiteit van Rn-222 veel hoger zijn.

Opgave 60

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



Opgave 61

- a α - en β -stralers dringen niet door de verpakking heen en in het voedsel door en zullen dus niet al het voedsel desinfecteren.
- 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 62

Eigen antwoord.

Opgave 63

- 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 wat betreft de biologische effecten. De equivalente dosis is daarmee een maat voor het mogelijke effect van ioniserende straling op het menselijk lichaam. De wettelijk vastgestelde dosislimieten geven de (maximale) stralingsbelasting van het menselijk lichaam in de vorm van de effectieve totale lichaamsdosis (zie Binas). Bij bestraling van het gehele lichaam is de effectieve totale lichaamsdosis gelijk 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).
- e De jaarlijkse effectieve totale lichaamsdosis is te vergelijken met het totaal aan equivalente dosissen dat je in een jaar oploopt door bijvoorbeeld röntgenopnamen, CT-scans, enzovoort. Je kunt dan nagaan of de limiet overschreden wordt.
- f Vooral weefsels waarin veel celdelingen optreden, zijn gevoelig voor het ontstaan van ongecontroleerde celdeling en (dus) het ontstaan van een tumor. Voor jongeren, waarbij in het lichaam nog relatief veel celdelingen optreden, is de dosislimiet daarom lager.

Opgave 64

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, die is 20 voor α -straling en 1 voor β - en γ -straling. De geabsorbeerde stralingsenergie E_{str} volgt uit het stralingsvermogen P_{str} , de blootstellingstijd Δt en het absorptiepercentage.

Uitwerking:

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

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

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

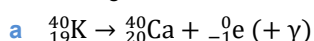
Opgave 65

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 β -straling. Het vermogen van de uitzonden straling bereken je met: $P_{\text{str}} = A \cdot E_{\beta}$.

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%).

Uitwerking:



$$\text{b } E_{\beta} = 1,33 \text{ MeV} = 1,33 \cdot 10^6 \times 1,60 \cdot 10^{-19} = 2,13 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

- 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 66

- a De γ -straling die het K-43 uitzendt wordt zichtbaar op de foto als zwarte plekken. In de linker opname 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 TI-201 is dat het geen β -straling uitzendt, dit zou namelijk voor inwendige bestraling van de hartspier zorgen. Een nadeel van TI-201 is de grotere halveringstijd. De patiënt moet langer in het ziekenhuis blijven wachten tot hij minder straling uitzendt.

Opgave 67

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 uitgezonden straling geldt: $P_{\text{str}} = A \cdot E_{\alpha}$ waarbij A de activiteit is en E_{α} 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%).

Uitwerking:

- a ${}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po} + {}^4_2\text{He}$
- 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 $E_{\text{str}} = P_{\text{str}} \cdot \Delta t = 5,3 \cdot 10^{-14} \times 365 \times 24 \times 3600 = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ J} \rightarrow D = \frac{E_{\text{str}}}{m} = \frac{1,67 \cdot 10^{-6}}{1,0} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ Gy}$
 $H = w_R \cdot D = 20 \times 1,67 \cdot 10^{-6} = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ Sv} = 0,033 \text{ mSv}$
- 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.

Opgave 68

- a De dosis is de geabsorbeerde stralingsenergie per kg. Beide voorwerpen absorberen evenveel stralingsenergie, maar de massa van voorwerp B is tweemaal zo klein, dus zal de dosis van voorwerp B tweemaal zo groot zijn.
- b Voorwerp A wordt bestraald met α -straling en dat heeft een twintig maal zo grote stralingsweegfactor als de β -straling waarmee voorwerp B wordt bestraald. Zouden de voorwerpen dezelfde dosis ontvangen, dan zou de equivalente dosis van voorwerp A twintig maal zo groot zijn als de equivalente dosis van voorwerp B. Maar in dit geval is de dosis van voorwerp A tweemaal zo klein als die van voorwerp B, dus is de equivalente dosis van voorwerp A tien maal zo groot als de equivalente dosis van voorwerp B.



Opgave 69

- a Voordelen van protonenbestraling zijn: bij de tumor komt de hoogste dosis terecht en de schade aan het weefsel dat minder diep ligt dan de tumor is veel kleiner.
- b $D = \frac{E_{\text{str}}}{m} \rightarrow E_{\text{str}} = D \cdot m = 60 \times 4,2 \cdot 10^{-6} = 2,52 \cdot 10^{-4} \text{ J}$ over 30 bestralingen dus de energie per bestraling moet zijn:
- $$E_{\text{str}} = \frac{2,52 \cdot 10^{-4}}{30} = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$
- $E_{\text{proton}} = 70 \text{ MeV} = 70 \times 1,60 \cdot 10^{-13} = 1,12 \cdot 10^{-11} \text{ J}$ dus het vermogen van de straling is:
- $$P_{\text{str}} = 0,80 \times 7,8 \cdot 10^3 \times 1,12 \cdot 10^{-11} = 7,0 \cdot 10^{-8} \text{ W}$$
- $$E_{\text{str}} = P_{\text{str}} \cdot \Delta t \rightarrow \Delta t = \frac{E_{\text{str}}}{P_{\text{str}}} = \frac{8,4 \cdot 10^{-6}}{7,0 \cdot 10^{-8}} = 120 \text{ s} = 2,0 \text{ min}$$

5.6 BEELDVORMING

Opgave 70

- a Waar
- b Waar
- c Niet waar: Bij nucleaire diagnostiek wordt een radioactieve stof als tracer in het lichaam van de patiënt gebracht. De uitgezonden γ -straling wordt buiten het lichaam gedetecteerd.
- d Bijna waar: De tracer zendt bij elke vervalreactie een positron uit dat binnen de kortste keren annihileert met een elektron, waarbij een γ -fotonpaar ontstaat.
- e Niet waar: Een echogram wordt gemaakt met behulp van het terugkaatsen van geluidsgolven.
- f Niet waar: Bij een MRI-scan loopt de patiënt geen stralingsdosis op.

Opgave 71

- 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 gebitscontrole is het maken van een röntgenopname een geschikte beeldvormingstechniek: de opname is snel gemaakt en kan direct worden bekeken, de stralingsbelasting is laag en tanden, kiezen, wortels en kaakbot zijn goed zichtbaar. 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 72

- a 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.
- b Bij dit radioactief verval komt een positron vrij. Dit positron annihileert vrijwel meteen met een elektron, waarbij twee γ -fotonen in precies tegengestelde richting worden uitgezonden.



- c Een γ -fotonenpaar wordt buiten het lichaam gedetecteerd door twee tegenover elkaar liggende γ -detectoren. Uit het verschil in looptijd van beide gedetecteerde γ -fotonen wordt berekend vanaf welke plaats op de lijn tussen beide detectoren ze werden uitgezonden, dus waar de vervallen kern van de tracer zich in het lichaam bevindt. De computer kan zo een 3D-beeld berekenen en de concentratie van de tracer weergeven in elke gewenste doorsnede van het gescande gebied van het menselijk lichaam.
- d Doordat er bij een SPECT-scan bij het radioactief verval maar één γ -foton vrijkomt, is de richting waar het foton vandaan komt minder goed te bepalen dan wanneer twee fotonen op precies tegenoverliggende posities gedetecteerd worden. Daardoor is bij de computerberekening van het 3D-beeld de positie van de plek waar de tracer zich bevindt minder goed te bepalen. En een beeld van de concentratie van de tracer in een doorsnede, zoals de PET-scan direct geeft, moet met SPECT achteraf berekend worden uit het 3D-beeld..

Opgave 73

- a Zowel bij een CT-scan als bij een MRI-scan krijg je een gedetailleerd 3-dimensionaal beeld, zodat je elke gewenste doorsnede kunt bekijken. De apparaten lijken uiterlijk erg op elkaar: de patiënt moet op een tafel liggen en wordt dan een tunnel in geschoven. Het verschil is dat de patiënt bij een MRI-scan geen stralingsdosis oploopt, maar bij een CT-scan juist een hoge equivalente dosis röntgenstraling ontvangt.
- b De CT-scan en de MRI-scan kunnen allebei gebruikt worden bij hersenonderzoek. Omdat de MRI-scan geen stralingsbelasting geeft, heeft deze de voorkeur als het gaat om puur hersenonderzoek. Voor onderzoek naar eventuele afwijkingen in (het bot van) de schedel wordt een CT-scan gemaakt.
- c Een MRI-scan is een dure beeldvormingstechniek en daarmee 'te duur' voor de gewone sporter. Bovendien zijn er te weinig MRI apparaten om alle sportblessures te kunnen bekijken. Er zijn lange wachtlijsten voor MRI-scans die niet acuut nodig zijn.

Opgave 74

		Röntgen- fotografie	CT- scan	Nucleaire diagnostiek: Scintigrafie SPECT- en PET- scan		Echo- grafie	MRI- scan
a	maakt gebruik van röntgenstraling	X	X				
b	maakt gebruik van radioactieve stoffen			X	X		
c	gebruikt geen ioniserende straling					X	X
d	brenkt zachte weefsels goed in beeld		X	(X)	(X)	X	X
e	brenkt harde weefsels goed in beeld	X	X				
f	driedimensionaal beeld		X		X		X
g	duurste techniek						X
h	makkelijkst toepasbaar					X	

Opgave 75

- a Bij een MRI-scan en een CT-scan moet de patiënt worden vastgemaakt aan een tafel en schuift hij een soort koker in, dat kan beangstigend zijn. Bij een MRI-scan klinken er ook nog harde geluiden en een MRI-scan duurt langer dan een CT-scan.
Bij nucleaire diagnostiek krijgt de patiënt een radioactieve vloeistof ingespoten, en mag de patiënt pas weer het ziekenhuis uit als de radioactiviteit van de tracer voldoende is afgenomen, of als de tracer het lichaam heeft verlaten.
- b De beste methode om stress te voorkomen is een goede voorlichting voorafgaande aan het onderzoek.



Opgave 76

techniek	natuurkundige achtergrond
röntgenfotografie	absorptie, transmissie, halveringsdikte van menselijke weefsels
computertomografie (CT-scan)	absorptie, transmissie, halveringsdikte van menselijke weefsels
nucleaire diagnostiek (PET-scan en SPECT-scan)	lokalisatie van radioactieve tracer met gammastraling
echografie (echogram)	ultrasone geluidsgolf geluidssnelheid in menselijke weefsels terugkaatsing
magnetic resonance imaging (MRI-scan)	sterk magnetisch veld en resonantie van protonen met radiogolven

Opgave 77

- 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.
- 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.
- Röntgenopname: hierop is goed te zien of de longen gevuld zijn met alleen lucht of dat er ook vocht in zit.
- 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.
- MRI-scan: daarmee kan de knie van alle kanten en van binnen goed bekeken worden.
- CT-scan: als er een tumor is kan met het driedimensionale beeld de precieze plaats en de grootte bepaald worden
- Röntgenopname, digital subtraction angiografie (DSA): de bloedvaten worden op de röntgenopname zichtbaar gemaakt door van een opname met absorberende contrastvloeistof in het bloed een normale opname af te trekken.
- Nucleaire diagnostiek: de patiënt krijgt het radioactieve I-123 toegediend. Dit hoopt zich op in de schildklier, waardoor de activiteit in de schildklier goed te zien is op het scintigram.
- Röntgenopname: de kunstheup en botten zijn dan goed te zien.
- Röntgenopname: op het beeld is goed te zien of de bijholten vol zitten.

5.7 VERDIEPING

Opgave 78

- Aflesen in figuur 76 bij $0,55 \cdot 10^{-10} \%$ geeft inderdaad een ouderdom van 4800 jaar.
- $1,0\%$ van $1 \cdot 10^{-10} \%$ is $0,01 \cdot 10^{-10} \%$ en dat is niet af te lezen in figuur 76. Gebruik de formule $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{t}{t_{1/2}}$ waarbij de activiteit nog maar 1% van de oorspronkelijke activiteit is:

$$1,0 = 100 \times \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow \left(\frac{1}{2}\right)^n = 0,010 \rightarrow n = \frac{\log(0,010)}{\log(0,5)} = 6,64$$

$$t = n \cdot t_{1/2} = 6,64 \times 5730 = 3,8 \cdot 10^4 \text{ jaar}$$
- Metalen sieraden, potscherven, kleitabletten en munten bevatten geen organisch materiaal en dus ook geen C-14.
- Papyrus is gemaakt van een plant, dus is organisch materiaal en bevat C-14.
- Als een voorwerp 50 000 jaar oud is, zijn er $n = \frac{t}{t_{1/2}} = \frac{50000}{5730} = 8,7$ halveringstijden verstreken. De activiteit is dan gedaald tot $\left(\frac{1}{2}\right)^{8,7} = 0,24\%$ van de oorspronkelijke activiteit en dat is niet meer goed te meten.



Opgave 79

- a $0,50 \cdot 10^{-10}$ % is 50% van de oorspronkelijke hoeveelheid, dus zijn er 5730 jaar verstreken (zie figuur 76). De correctie die je uit figuur 78 kunt aflezen bij 5730 jaar is iets meer dan 1000 jaar, dus zal het weefsel ongeveer 7000 jaar oud zijn.
- b Aflezen in figuur 76 bij $0,77 \cdot 10^{-10}$ % geeft een ouderdom van 2000 jaar. In figuur 78 is de correctie af te lezen, die is 220 jaar, dus zal het linnen ongeveer 2200 jaar zijn.

Opgave 80

- a Eigen startwaarden.
- b Als je het N, t -diagram van een grotere startwaarde voor N vergelijkt met het oorspronkelijke N, t -diagram zul je zien dat de kromme op een hoger punt begint en sneller daalt, doordat de activiteit op elk tijdstip groter zal zijn dan in de oorspronkelijke situatie.
- c Als je het N, t -diagram van een grotere waarde voor λ (of kleinere $t_{1/2}$) vergelijkt met het oorspronkelijke N, t -diagram zul je zien dat de kromme op hetzelfde punt begint en sneller daalt. Dit komt doordat bij een kleinere halveringstijd de activiteit op elk tijdstip hoger zal zijn dan in de oorspronkelijke situatie.

5.8 AFSLUITING

Opgave 81

- a Eigen antwoord.
- b De alternatieven voor het gebruik van ioniserende straling bij beeldvorming zijn de echografie en de MRI-scan. Bij echografie wordt gebruikgemaakt van ultrasone geluidsgolven, die weerkaatsen op grensvlakken tussen verschillende weefsels, waarna ze gedetecteerd worden door de zender/ontvanger. Bij een MRI-scan worden de waterstofkernen (protonen) in een heel sterk magneetveld gericht en met radiogolven in trilling gebracht, waarna de waterstofkernen zelf deze radiogolven uitzenden die worden opgevangen door de antenne in de MRI-scanner.

Opgave 82

- 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 fotonen kan röntgenstraling diep in een materiaal doordringen en atomen ioniseren.
- c Bij kernstraling komt er een deeltje of een foton uit de atoomkern. Dat kan een α - of β -, deeltje zijn of een γ -foton. Kernstraling heeft een doordringend en een ioniserend vermogen. Vanwege het doordringend vermogen is γ -straling geschikt voor het maken van verschillende soorten scans (PET en SPECT) van het inwendige van het lichaam, waarna een diagnose gesteld kan worden. Het ioniserend vermogen van kernstraling wordt gebruikt voor het bestrijden van tumoren, wat radiotherapie wordt genoemd.
- d Kernstraling wordt uitgezonden door de atoomkernen van een radioactieve stof. 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 verandert niet, maar verliest daarmee energie. Dit verschijnsel noemen we radioactief verval.
- e De activiteit A (in Bq) van een radioactieve stof is het aantal instabiele atoomkernen dat per seconde verval. Een activiteit van 1 Bq betekent dat er gemiddeld per seconde één atoomkern verval.
- f De halveringstijd $t_{1/2}$ is de tijd waarin de activiteit van een radioactieve bron telkens tweemaal zo klein wordt. Deze is per radioactieve isotoop 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 ${}^0_{-1}\text{e}$) verandert een neutron in een proton en komt er een elektron uit de kern.
 Bij β^+ -verval (${}^0_{+1}\beta$ of ${}^0_{+1}\text{e}$) verandert een proton in een neutron en komt er een positron 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 ook het deeltje en/of het foton. 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** Voor de activiteit A op een tijdstip t geldt: $A = -\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_{\text{raaklijn}} = -\frac{dN}{dt}$.
- o** Het verband tussen de activiteit en het aantal instabiele atoomkernen is $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N = \frac{0,693}{t_{1/2}} \cdot N$.
- p** Als de atoommassa van een radioactieve stof is gegeven, is de massa van één atoom te berekenen met $m_a = \text{atoommassa} \cdot u$ waarbij u de atomaire massa-eenheid is: $u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.
 Is de massa m van de radioactieve stof in een bron bekend, dan is het aantal instabiele atoomkernen N te berekenen met $N = \frac{m}{m_a}$.
- q** De dracht is de afstand die α - en β -deeltjes 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.
- r** De halveringsdikte is de dikte van de laag materiaal waarbij de helft van het aantal röntgen- of γ -fotonen wordt geabsorbeerd. De fotonen bewegen altijd met de lichtsnelheid en kunnen niet worden afgeremd. Bij een treffen met een atoom in het materiaal kan het foton geabsorbeerd worden: het atoom wordt geïoniseerd en het foton verdwijnt. De absorptie van röntgen- of γ -straling is nooit volledig: er zijn altijd fotonen die door het materiaal heen dringen.
- s** 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.
- t** Bij de absorptie van ioniserende straling wordt energie van de stralingsdeeltjes of de fotonen geabsorbeerd.
- u** Achtergrondstraling is de kosmische straling en de straling afkomstig van radioactieve stoffen op aarde, in de lucht, in bouwmaterialen en in het lichaam. Deze straling is overal op aarde aanwezig.
- v** Als een stralingsbron zich buiten het lichaam bevindt, zorgt dat voor uitwendige bestraling van het lichaam. Als de radioactieve stoffen zich op of in het lichaam bevinden, is er sprake van besmetting. De radioactieve stoffen in het lichaam zorgen voor inwendige bestraling.
- w** De dosis D (in Gy) is de hoeveelheid stralingsenergie E_{str} (in J) die per kg van het bestraalde voorwerp is geabsorbeerd:

$$D = \frac{E_{\text{str}}}{m}$$
 Bij de equivalente dosis H (in Sv) wordt rekening gehouden met het grotere ioniserende effect 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 ioniserende straling.
- x** De effectieve totale lichaamsdosis is de equivalente dosis bij bestraling van het lichaam als geheel.
- y** De veiligheidsmaatregelen bij uitwendige bestraling zijn blootstellingstijd beperken, afstand houden en afschermen van de bron.
 De veiligheidsmaatregelen bij besmetting door radioactieve stoffen zijn grondig wassen, isolatie en evacuatie.



- z 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.

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.

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^+ -vervalende 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 en daarmee wordt berekend waar de vervallen kern van de tracer zich bevindt. Uit alle metingen wordt dan een (drie dimensionaal) 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.

Opgave 83

Oriëntatie:

Voor het maken van een scintigram moet de activiteit groot genoeg zijn, en de stralingsbelasting voor de patiënt zo laag mogelijk.

Uitwerking:

Door de kortere halveringstijd van I-123 is de activiteit van deze isotoop in het begin (op en direct na het tijdstip $t = 0$ s) groter dan die van I-131. Vergelijk daartoe de helling van de raaklijn aan beide vervalcurves op het tijdstip $t = 0$ s.

Daardoor is de intensiteit van de door I-123 uitgezonden straling groter dan bij I-131. Voor eenzelfde stralingsintensiteit (voldoende voor het maken van een scintigram) is dus een kleiner aantal instabiele atoomkernen van I-123 nodig. Daardoor is de stralingsbelasting van de patiënt kleiner. De jodiumisotoop I-123 is dus het meest geschikt voor dit onderzoek. Bijkomend voordeel is dat door de korte halveringstijd van I-123 de patiënt na het onderzoek sneller naar huis kan.



Opgave 84

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.

$$\frac{A}{A_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow \frac{6,9 \cdot 10^{15}}{1,1 \cdot 10^{17}} = 0,0627 = 6,3\% \rightarrow n = 4,0$$

$$t = n \cdot t_{1/2} = 4,0 \times 5,27 = 21 \text{ jaar}$$

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:

$$d_{1/2} = 4,6 \text{ cm geeft } n = \frac{d}{d_{1/2}} = \frac{35}{4,6} = 7,61 \text{ dus } \frac{I}{I_0} = \left(\frac{1}{2}\right)^{7,61} = 0,0051 = 0,51\%$$

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:

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

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

De maximale blootstellingstijd is dus 1,7 jaar.

Opgave 85

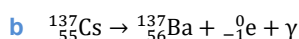
Oriëntatie:

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, en dus uit fotonen bestaan.

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

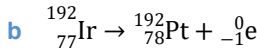


- c Po-209 is een α -straler, en dus ongeschikt voor het testen van de badges op β -straling. Cs-137 en Sr-90 zijn beide β -stralers, maar Cs-137 zendt behalve β -straling ook γ -straling uit. Voor het testen van de badges op β -straling is dus Sr-90 het meest geschikt, omdat deze isotoop alleen β -straling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



Opgave 86

- a De α -straling zal al worden tegengehouden door het materiaal van de naald. De β -straling zal wel door het materiaal heen gaan en een stralingsdosis geven in de directe omgeving van de naald. De γ -straling gaat makkelijk door naald en weefsel heen. Dus de β -straling zal het zieke weefsel vlak bij het radium het meeste aantasten.



c $D = \frac{E_{\text{str}}}{m} \rightarrow E_{\text{str}} = D \cdot m = 2,0 \times 4,0 \cdot 10^{-3} = 8,0 \cdot 10^{-3} \text{ J in } 3,5 \text{ uur} = 12600 \text{ s.}$

Het gemiddelde vermogen moet dus zijn:

$$P_{\text{str}} = \frac{E_{\text{str}}}{t} = \frac{8,0 \cdot 10^{-3}}{12600} = 6,35 \cdot 10^{-7} \text{ W}$$

Ook geldt: $P_{\text{str}} = A \cdot E_{\beta^-}$ dus de gemiddelde activiteit is:

$$A = \frac{P_{\text{str}}}{E_{\beta^-}} = \frac{6,35 \cdot 10^{-7}}{9,6 \cdot 10^{-14}} = 6,6 \cdot 10^6 \text{ Bq} = 6,6 \text{ MBq}$$

- d De halveringstijd van iridium-192 is 74 dagen en 4 weken is 28 dagen dus:

$$n = \frac{t}{t_{1/2}} = \frac{28}{74} = 0,378 \rightarrow A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{0,378} = 0,769 \cdot A_0$$

Het vermogen van de toegediende straling is nu dus $0,769 \times$ zo groot, dus moet de behandelstijd worden vermenigvuldigd met $\frac{1}{0,769} \rightarrow t = \frac{3,5}{0,769} = 4,5 \text{ uur.}$

Opgave 87

- a $t_{1/2} = 6,0 \text{ uur}$ en $m_a = 99 \text{ u}$ (met $u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$).

$$A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N \rightarrow N = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot A = \frac{6,0 \times 3600}{\ln 2} \times 39 \cdot 10^6 = 1,22 \cdot 10^{12}$$

$$m_a = 99 \text{ u} = 99 \times 1,66 \cdot 10^{-27} = 1,64 \cdot 10^{-25} \text{ kg} \rightarrow$$

$$m = N \cdot m_a = 1,22 \cdot 10^{12} \times 1,64 \cdot 10^{-25} = 2,0 \cdot 10^{-13} \text{ kg}$$

- b $1 \text{ keV} = 1,60 \cdot 10^{-16} \text{ J}$ dus de energie die vrijkomt per kern die vervalst is:

$$140 \times 1,60 \cdot 10^{-16} = 2,24 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

Dus de totaal geabsorbeerde energie is: $E_{\text{str}} = 0,60 \times 8,0 \cdot 10^{11} \times 2,24 \cdot 10^{-14} = 0,011 \text{ J}$ door een massa van $70 \text{ kg} \rightarrow$

$$D = \frac{E_{\text{str}}}{m} = \frac{0,011}{70} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Gy en } H = w_r \cdot D = 1 \times 1,5 \cdot 10^{-4} = 0,15 \text{ mSv.}$$

Opgave 88

- a 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 $16 \cdot 10^4 \text{ Bq}$ naar $1,0 \cdot 10^4 \text{ Bq}$ dus $4 \cdot t_{1/2} = 60 \text{ s} \rightarrow t_{1/2} = 15 \text{ s.}$

- e Oriëntatie:

Het verband tussen de activiteit en het aantal instabiele atoomkernen is $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N = \frac{0,693}{t_{1/2}} \cdot N$. Lees de activiteit af uit figuur 85.

Uitwerking:

$$\text{Op } t = 0 \text{ is } A = 16 \cdot 10^4 \text{ Bq} \rightarrow N = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot A = \frac{15}{\ln 2} \times 16 \cdot 10^4 = 3,5 \cdot 10^6$$

$$\text{en op } t = 60 \text{ s is } A = 1,0 \cdot 10^4 \text{ Bq} \rightarrow N = \frac{15}{\ln 2} \times 1,0 \cdot 10^4 = 2,2 \cdot 10^5$$

- 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 84 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.)