

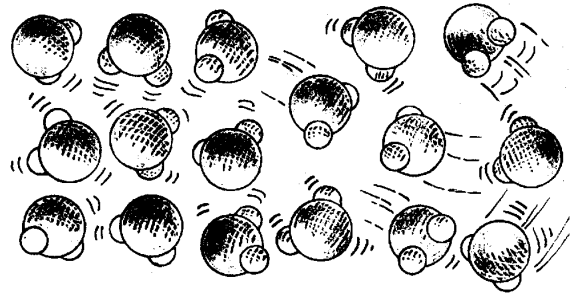
Radioactiviteit

- § 1 Bouw van atomen
- § 2 Chemische reacties en kernreacties
- § 3 Alfa-, bèta- en gammaverval
- § 4 Halveringstijd van radioactieve stoffen
- § 5 Activiteit van een radioactieve bron
- § 6 Kernstraling: doordringend vermogen
- § 7 Kernstraling: ioniserend vermogen
- § 8 Dosis, equivalente en effectieve dosis

§ 1 Bouw van atomen

Moleculen en atomen

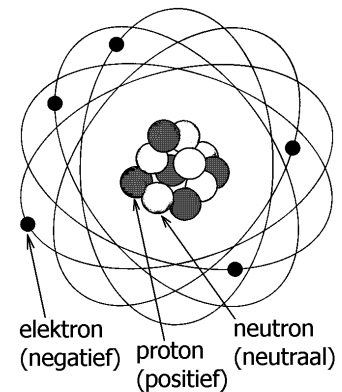
Stoffen zoals water of alcohol zijn opgebouwd uit heel kleine deeltjes: moleculen genaamd. Deze moleculen zijn allemaal gelijk. Ze zijn constant in beweging. In een vloeistof botsen ze vaak tegen elkaar en bewegen ze kriskras door de ruimte. Dit is getekend in de figuur hiernaast. Het betreft hier watermoleculen.



Moleculen zijn weer opgebouwd uit nog kleinere deeltjes namelijk atomen. Zo bestaat elk watermolecuul uit één groot atoom namelijk een zuurstofatoom en twee kleine atomen namelijk waterstofatomen. In totaal zijn er meer dan 100 atoomsoorten. Naast zuurstofatomen en waterstofatomen zijn er bijvoorbeeld ijzeratomen, koolstofatomen en zwavelatomen.

Bouw van een atoom

In de figuur hiernaast is een atoom schematisch weergegeven. Het betreft een booratom maar dat maakt op zich niet uit. Elk atoom bestaat uit een kern en uit elektronen die in banen om de kern heen draaien. De kern heeft een positieve (elektrische) lading en de elektronen hebben een negatieve lading. Doordat de kern en de elektronen tegengestelde ladingen hebben trekken ze elkaar aan. Hierdoor kunnen elektronen het atoom niet zomaar verlaten maar blijven ze rond de kern cirkelen.



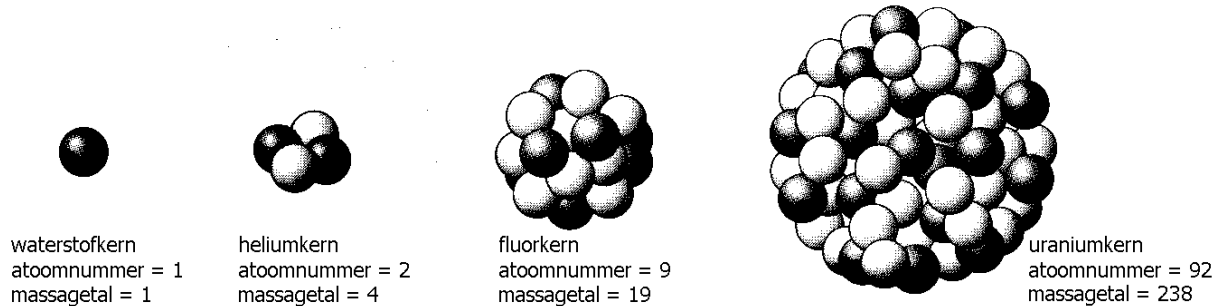
De kern bevat twee soorten deeltjes namelijk protonen en neutronen. Een uitzondering hierop is het waterstofatoom waarvan de kern uit slechts één proton bestaat. De protonen zijn positief geladen en de neutronen elektrisch neutraal. Vanwege hun positieve lading stoten de protonen elkaar af. Toch valt de kern niet uit elkaar dankzij de neutronen. De neutronen werken namelijk als een soort lijm voor de kern. Protonen en neutronen worden aangeduid met de naam nucleonen (= kerndeeltjes). Voor elke atoomsoort geldt dat het aantal protonen in de kern gelijk is aan het aantal elektronen dat om de kern heen draait. Het atoom als geheel is elektrisch neutraal want een elektron is precies evenveel negatief als een proton positief geladen is.

In de figuur zijn de deeltjes (protonen, neutronen en elektronen) veel en veel te groot getekend. Als je je een atoom zo groot als een voetbalstadion voorstelt, is de kern slechts een tennisbal op de middenstip van het veld. Vergeleken met de kern zijn elektronen nog veel kleiner. Tussen de kern en de elektronen zit niks. Een atoom bestaat dus bijna geheel uit lege ruimte.

Atoomnummer en massagetal

Onder het atoomnummer verstaan we het aantal protonen in de kern.

Onder het massagetal verstaan we het aantal nucleonen (protonen en neutronen) in de kern. Ter verduidelijking dient de onderstaande figuur waarin vier verschillende atoomkernen getekend zijn. Bij elke kern staan het atoomnummer en het massagetal vermeld. Neem bijvoorbeeld de fluorkern. Deze bevat 9 protonen en 10 neutronen. Zijn atoomnummer is dus 9 en zijn massagetal 19. Bij de kleinere atoomnummers (zeg de eerste 20) is het aantal neutronen en het aantal protonen in de kern vrijwel gelijk. Het massagetal is dan dus ongeveer twee keer zo groot als het atoomnummer. Bij grotere atoomnummers is het aantal neutronen steeds groter dan het aantal protonen.



Scheikundig (=chemisch) gezien is alleen het atoomnummer van belang. Want het atoomnummer bepaalt om welke stof het gaat. Bijvoorbeeld heeft de stof helium atoomnummer 2 en de stof koolstof atoomnummer 6. In het vervolg wordt daar dieper op ingegaan.

Natuurkundig gezien is naast het atoomnummer ook het massagetal van belang. Met name bij kernreacties geldt dit. Het massagetal is bij benadering een maat voor de massa van het atoom want protonen en neutronen zijn bijna even zwaar (neutronen zijn iets zwaarder). Bovendien zijn deze deeltjes ieder meer dan 1800 keer zwaarder dan een elektron.

Isotopen

Bij veel atoomkernen zijn er bij hetzelfde atoomnummer meerdere massagetalen mogelijk. We spreken dan van isotopen behorend bij dat atoomnummer. Neem bijvoorbeeld een waterstofkern. Zie de figuren hiernaast. De meeste waterstofkernen

normale
waterstofkern



atoomnummer = 1
massagetal = 1

zware
waterstofkern



atoomnummer = 1
massagetal = 2

superzware
waterstofkern



atoomnummer = 1
massagetal = 3

bevatten alleen een proton. Het massagetal is dan 1. Het is echter ook mogelijk dat een waterstofkern naast een proton één of twee neutronen bevat. De massagetalen zijn dan 2 respectievelijk 3 (we spreken dan over deuterium en tritium).

Veel stoffen hebben isotopen. Zo komen er in de natuur drie isotopen van koolstof (atoomnummer 6) voor. De meest voorkomende isotoop van koolstof heeft massagetal 12. De andere twee isotopen hebben massagetal 13 en 14. Een ander voorbeeld is de atoomsoort ijzer (atoomnummer 26). Deze heeft vier isotopen met als massagetalen 54, 56, 57 en 58.

Opgaven bij § 1

Opgave 1

Uit welke twee deeltjes is een atoomkern opgebouwd?

Opgave 2

Is de elektrische lading van de volgende deeltjes positief, negatief of neutraal?

- Elektron
- Proton
- Neutron
- Atoomkern
- Atoom

Opgave 3

Leg uit dat een atoom als geheel neutraal is terwijl het atoom onder meer is opgebouwd uit geladen deeltjes.

Opgave 4

Wat verstaan we onder het atoomnummer?

Wat verstaan we onder het massagetal?

Opgave 5

Leveren de elektronen of de kern de grootste bijdrage aan de massa van het atoom? Licht je antwoord toe.

Opgave 6

Leg uit waarom de elektronen in een atoom dit atoom niet zomaar kunnen verlaten.

Opgave 7

Wanneer spreken we over isotopen?

Opgave 8

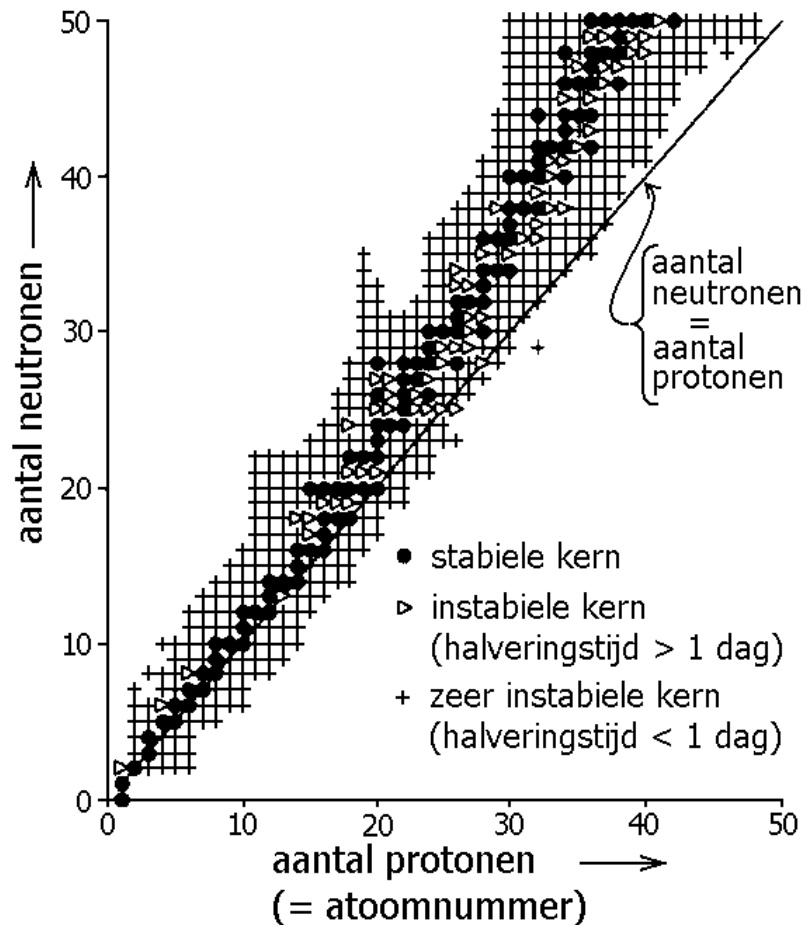
In het diagram hiernaast zijn de mogelijke isotopen bij atoomnummers lager dan 50 weergegeven.

a.
Hoe kun je in het diagram zien dat bij grotere kernen er meestal meer neutronen dan protonen in de kern zitten?

Het diagram maakt onderscheid tussen stabiele en instabiele kernen. Dit verschil wordt later uitgelegd.

b.
Hoeveel stabiele isotopen heeft zuurstof (atoomnummer 8)? Wat zijn hun massagetallen?

c.
Teken in het diagram de (rechte) lijn die alle punten met massagetal = 40 met elkaar verbindt.



Opgave 9

Een atoomsoort heeft atoomnummer 12 en massagetal 26. Hoeveel neutronen zitten er in de kern van deze atoomsoort?

Opgave 10

Een atoom heeft 19 elektronen en in zijn kern zitten 20 neutronen. Hoe groot is het massagetal van het atoom?

Opgave 11

Atoomsoort A heeft atoomnummer 35 en massagetal 79.

Atoomsoort B heeft massagetal 81.

A en B zijn isotopen van elkaar (het gaat hier namelijk om de stof broom).

Hoeveel elektronen draaien er om de atoomkern van A? _____

Hoeveel elektronen draaien er om de atoomkern van B? _____

Hoeveel neutronen zitten er in de atoomkern van B? _____

Opgave 12

Atoomsoort A heeft massagetal 30 en in zijn kern zitten 16 neutronen.

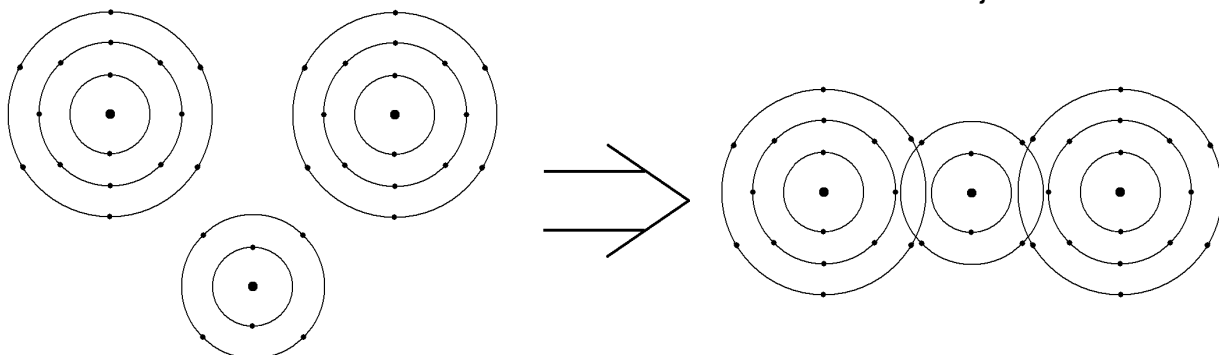
Atoomsoort B heeft in zijn kern 14 neutronen.

Wat moet het massagetal van atoomsoort B zijn om A en B isotopen van elkaar te laten zijn?

§ 2 Chemische reacties en kernreacties

Atoomnummer en de chemische eigenschappen

Het verbranden van papier of het inwerken van zoutzuur op een blokje ijzer zijn voorbeelden van chemische reacties. Bij chemische reacties verdwijnen er stoffen en ontstaan er nieuwe stoffen. Wat gebeurt er nu met de atomen tijdens een chemische reactie? Zonder hier diep op in te gaan kun je zeggen dat chemische processen zich aan de buitenkanten van de atomen afspelen. Bij twee atomen A en B gaat het om de wisselwerking tussen de elektronen van atoom A en de elektronen van atoom B. Zie bijvoorbeeld de onderstaande figuur waarin een zeer eenvoudige chemische reactie op atomair niveau is getekend (schematisch). De atoomkernen zijn als dikke stippen getekend. Drie losse atomen binden zich aan elkaar en vormen daarbij een molecuul.



Losse atomen (twee atomen zwavel, één atoom koolstof)

molecuul koolstofdioxide

Het atoomnummer bepaalt de chemische eigenschappen van een atoomsoort. Het aantal protonen in de kern bepaalt namelijk de lading van de kern en ook het aantal elektronen dat om de kern heen draait. Deze laatste twee bepalen vervolgens weer hoe het atoom reageert met andere atomen.

Chemische elementen en hun symbolen

Isotopen met hetzelfde atoomnummer hebben dezelfde chemische eigenschappen. Zo komen er in de natuur drie soorten koolstofatomen voor. Alle drie hebben ze atoomnummer 6. Hun massagetalen zijn echter verschillend namelijk 12, 13 en 14. Chemisch zijn ze niet van elkaar te onderscheiden. We spreken dan ook over de stof koolstof zonder onderscheid te maken tussen de drie isotopen. Een ander voorbeeld is chloor. Deze stof heeft in de vrije natuur twee isotopen. Beiden hebben atoomnummer 17. De ene isotoop heeft massagetal 35 en de andere 37.

Een chemisch element of kortweg element is een verzamelnaam voor alle isotopen behorend bij hetzelfde atoomnummer. Zo vallen onder het element waterstof alle isotopen met atoomnummer 1. Op dezelfde manier vallen onder het element helium alle isotopen met atoomnummer 2. Enzovoort. In de vrije natuur komen ongeveer 90 elementen voor. Van deze elementen samen bestaan in de vrije natuur ongeveer 340 verschillende isotopen.

De volgende tabel geeft bij elk atoomnummer het bijbehorende element en zijn symbool. Elk element heeft namelijk een eigen symbool. Zo heeft waterstof het symbool H en helium het symbool He. De symbolen zijn afkortingen van de Latijnse namen. Bijvoorbeeld is H de afkorting van hydrogen wat waterstof betekent.

De elementen (met symbolen) gerangschikt naar atoomnummer

1	H	waterstof	36	Kr	krypton	71	Lu	lutetium
2	He	helium	37	Rb	rubidium	72	Hf	hafnium
3	Li	lithium	38	Sr	strontium	73	Ta	tantaal
4	Be	beryllium	39	Y	yttrium	74	W	wolframaam
5	B	boor	40	Zr	zirkonium	75	Re	renium
6	C	koolstof	41	Nb	niobium	76	Os	osmium
7	N	stikstof	42	Mo	molybdeen	77	Ir	iridium
8	O	zuurstof	43	Tc	technetium	78	Pt	platina
9	F	fluor	44	Ru	ruthenium	79	Au	goud
10	Ne	neon	45	Rh	rhodium	80	Hg	kwik
11	Na	natrium	46	Pd	palladium	81	Tl	thallium
12	Mg	magnesium	47	Ag	zilver	82	Pb	lood
13	Al	aluminium	48	Cd	cadmium	83	Bi	bismut
14	Si	silicium	49	In	indium	84	Po	polonium
15	P	fosfor	50	Sn	tin	85	At	astaat
16	S	zwavel	51	Sb	antimoon	86	Rn	radon
17	Cl	chloor	52	Te	telluur	87	Fr	francium
18	Ar	argon	53	I	jood	88	Ra	radium
19	K	kalium	54	Xe	xenon	89	Ac	actinium
20	Ca	calcium	55	Cs	cesium	90	Th	thorium
21	Sc	scandium	56	Ba	barium	91	Pa	protactinium
22	Ti	titaan	57	La	lanthaan	92	U	uraan
23	V	vanadium	58	Ce	cerium	93	Np	neptunium
24	Cr	chrom	59	Pr	praseodymium	94	Pu	plutonium
25	Mn	mangaan	60	Nd	neodymium	95	Am	americium
26	Fe	ijzer	61	Pm	promethium	96	Cm	curium
27	Co	kobalt	62	Sm	samarium	97	Bk	berkelium
28	Ni	nikkel	63	Eu	europium	98	Cf	californium
29	Cu	koper	64	Gd	gadolinium	99	Es	einsteinium
30	Zn	zink	65	Tb	terbium	100	Fm	fermium
31	Ga	gallium	66	Dy	dysprosium	101	Md	mendelevium
32	Ge	germanium	67	Ho	holmium	102	No	nobelium
33	As	arseen	68	Er	erbium	103	Lr	lawrencium
34	Se	seleen	69	Tm	thulium	104	Rf	rutherfordium
35	Br	broom	70	Yb	ytterbium	105	Db	dubnium

Notatie van isotopen

Er zijn meerdere manieren om isotopen aan te duiden. Neem bijvoorbeeld de drie isotopen van koolstof. We kunnen deze isotopen aangeven met $^{12}_6\text{C}$, $^{13}_6\text{C}$ en $^{14}_6\text{C}$ maar ook met koolstof-12, koolstof-13 en koolstof-14. Bij de eerste schrijfwijze staat het massagetal linksboven en het atoomnummer linksonder het elementsymbool. Bij de tweede schrijfwijze wordt het massagetal aan de elementnaam gekoppeld.

De aanduiding $^{12}_6\text{C}$ kan meerdere betekenissen hebben namelijk een atoomsoort, één atoom van deze atoomsoort en een kern van deze atoomsoort. In het volgende bedoelen we er meestal de kern mee.

Voorbeeld van een opgave

Opgave:

Geef de tweede schrijfwijze voor de kern van een polonium-210-atoom.

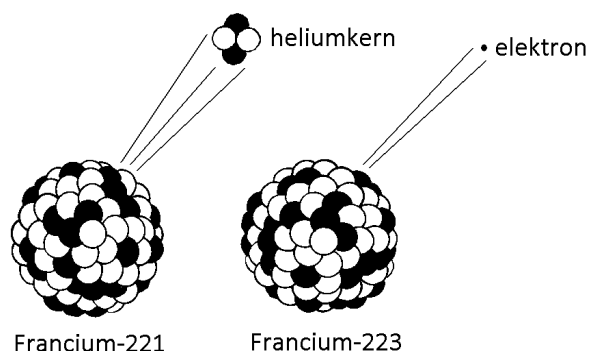
Oplossing:

Volgens de tabel heeft het element polonium atoomnummer 84 en symbool Po.

Dus $^{210}_{84}\text{Po}$.

Isotopen bij kernreacties

Isotopen van een element gedragen zich bij chemische reacties precies gelijk. Bij kernreacties daarentegen gedragen isotopen zich vaak verschillend. Vergelijk bijvoorbeeld de atoomkernen van francium-221 en francium-223 met elkaar. Beide kernen zijn instabiel. Dat wil zeggen dat ze een klein deeltje kunnen verliezen. Bij francium-221 is dat een heliumkern en bij francium-223 is het een elektron. In de volgende paragraaf gaan we hier dieper op in.



Enige verschillen tussen chemische reacties en kernreacties

1)

Bij een chemische reactie reageren de buitenkanten van atomen met elkaar. Met de atoomkernen gebeurt niets. Bij een kernreactie verandert de atoomkern juist. De elektronen die om de kern heen draaien spelen geen rol (en worden in tekeningen van een kernreactie achterwege gelaten).

2)

Bij chemische reacties is het aantal protonen in de kern (het atoomnummer dus) belangrijk. Bij kernreacties is ook het aantal neutronen in de kern van belang.

3)

Bij chemische reacties en kernreacties komt vaak energie vrij. Bij kernreacties is de hoeveelheid energie echter vele malen (in de orde van een miljoen maal) groter. Zo kan een hoeveelheid dynamiet een stadswijk vernielen; een kernbom vaagt een hele stad weg.

Opgaven bij § 2

Opgave 1

Geef van de volgende uitspraken aan of ze juist of onjuist zijn.

- 1) Bij een chemische reactie hebben de atoomkernen een wisselwerking met elkaar.
- 2) Het atoomnummer bepaalt de chemische eigenschappen van een atoomsoort.
- 3) Bij chemische reacties gedragen isotopen van een stof zich altijd gelijk.
- 4) Bij kernreacties gedragen isotopen van een stof zich altijd gelijk.
- 5) Kwik-202 en kwik-204 hebben dezelfde chemische eigenschappen.
- 6) De isotoop uranium-235 heeft atoomnummer 235.

Opgave 2

Wat verstaan we onder een element?

Opgave 3

Leg uit dat atoomkernen niet betrokken zijn bij een chemische reactie. Met andere woorden dat ze “met rust gelaten” worden.

Opgave 4

Wat is het atoomnummer van plutonium?

Opgave 5

Geef een andere schrijfwijze voor fosfor-32.

Opgave 6

Geef een andere schrijfwijze voor ${}_{43}^{99}\text{Tc}$.

Opgave 7

Er is één isotoop waarbij het massagetal gelijk is aan het atoomnummer. Bij welk element hoort deze isotoop?

Opgave 8

Zullen atomen van de isotoop lithium-7 groter zijn dan atomen van lithium-6? Leg je antwoord uit.

Opgave 9

In de tekst van deze paragraaf staat dat een francium-221-kern een heliumkern kan wegschieten. Daardoor verliest de kern twee protonen en twee neutronen.

Bepaal nu welke kern ontstaat na het wegschieten van de heliumkern. Noteer deze dochterkern op twee manieren.

Opgave 10

In de tekst van deze paragraaf staat dat een francium-221-kern een heliumkern kan wegschieten. Er zijn veel meer atoomkernen die dat doen. Steeds bevat de dochterkern twee protonen en twee neutronen minder dan de moederkern. Bij een van deze gebeurtenissen ontstaat er een radium-224-kern (=dochterkern). Bepaal welke kern de heliumkern uitstootte. Noteer deze moederkern op twee manieren.

Opgave 11

Een koolstof-14-kern is instabiel en kan plotseling een elektron wegschieten (op dezelfde manier als een francium-223-kern dat doet; zie leestekst). Stel nu dat een koolstofatoom met zo'n kern een chemische verbinding aangaat met twee zuurstofatomen waarbij een molecuul koolstofdioxide ontstaat. Zal deze chemische reactie de kans dat de koolstof-14-kern een elektron uitzendt dan veranderen? Leg je antwoord uit.

Opgave 12

Mensen met een te snel werkende schildklier (zie de figuur hiernaast) krijgen in het ziekenhuis vaak een drankje toegediend met de radioactieve isotoop jood-131 erin. Het zijn vooral de te snel werkende schildkliercellen die deze stof opnemen. Deze cellen worden beschadigd door de straling die de atoomkernen van jood-131 uitzenden. Daardoor gaat de schildklier na enige tijd weer normaal functioneren.



Het element jood heeft veel isotopen die kernstraling uitzenden.

De bekendste zijn jood-123, jood-125, jood-128 en jood-131.

Toch wordt voor de schildklierbehandeling altijd jood-131 genomen.

Iris verklaart dit als volgt. "Jood-131 wordt het snelst door de schildklier opgenomen. In de schildklier gaat jood-131 namelijk makkelijker een chemische reactie met andere stoffen aan dan bijvoorbeeld jood-123, jood-125 en jood-128."

Leg uit waarom Iris ongelijk heeft.

§ 3 Alfa-, bèta- en gammaverval

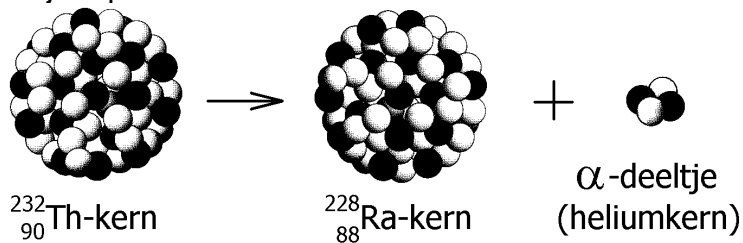
Het verval van instabiele atoomkernen

Veel atoomkernen zijn instabiel. Dat wil zeggen dat ze “niet zo lekker in hun vel zitten” en vroeg of laat een deeltje uitzenden. We zeggen dan dat ze “vervallen”. We spreken over radioactief verval van kernen. Stoffen waarin verval van atoomkernen plaats vindt noemen we radioactief.

Er is een aantal manieren waarop atoomkernen kunnen vervallen. Dit hangt van de kern af. De ene kern vervalt op de ene manier en de andere kern op de andere manier. Hier behandelen we de drie belangrijkste vormen van verval namelijk: 1. alfaverval, 2. bètaverval en 3. gammaverval.

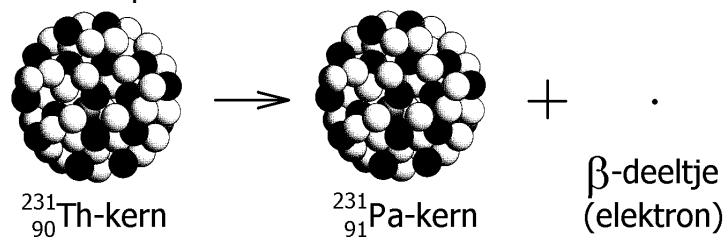
Alfaverval

Bij alfaverval zendt een instabiele atoomkern een alfadeeltje uit. Het alfadeeltje is eigenlijk niks anders dan een heliumkern (met twee protonen en twee neutronen) die met grote snelheid wordt weggeschoten. Neem bijvoorbeeld de onderstaande schematische figuur waarin een kern van thorium-232 een alfadeeltje wegschiet. Er blijft een radium-228-kern over. Dat is logisch want bij alfaverval heeft de dochterkern altijd 2 protonen en 2 neutronen minder dan de moederkern.

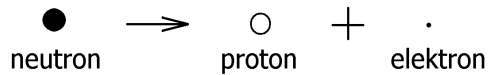


Bètaverval

Bij bètaverval zendt een instabiele kern een bètadeeltje uit. Het bètadeeltje is een elektron dat met grote snelheid wordt weggeschoten. Zie bijvoorbeeld de onderstaande schematische figuur waarin een thorium-231-kern een bètadeeltje wegschiet. Er blijft dan een protactinium-231-kern achter.



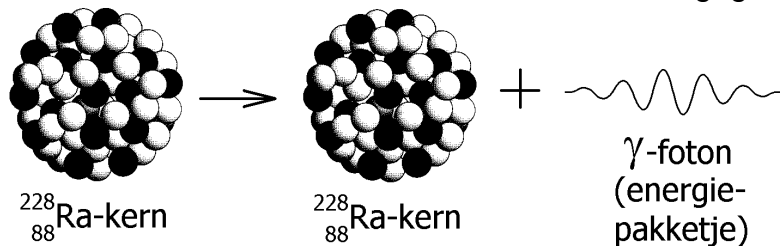
Je kunt je afvragen hoe een atoomkern nu een elektron kan wegschieten als hij alleen maar protonen en neutronen (geen elektronen) bevat. Het antwoord hierop is in de volgende figuur gegeven. Een neutron in de kern verandert in een proton en in een elektron. Het proton blijft in de kern achter terwijl het elektron wordt weggeschoten. Bij bètaverval neemt het atoomnummer dus met 1 toe terwijl het aantal nucleonen (protonen en neutronen) gelijk blijft.



Bij kleine en middelgrote atoomkernen (atoomnummer onder 83) treedt alleen bètaverval (en gammaverval) op. Bij grote atoomkernen (atoomnummer groter dan of gelijk aan 83) komt zowel alfaverval als bètaverval voor.

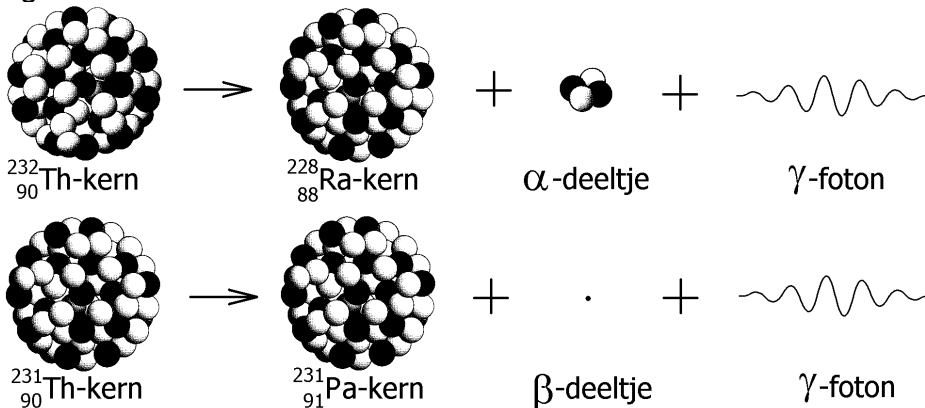
Gammaverval

Bij gammaverval heeft een atoomkern overtollige energie. Hij verliest deze energie door een gammafoton uit te zenden. Dit is een soort energiepakketje. Foton betekent "lichtdeeltje". Een gammafoton zit echter niet in het zichtbare deel van het elektromagnetisch spectrum maar bij een veel kortere golflengte. Bijvoorbeeld verliezen de dochterkernen in de bovenstaande voorbeelden op deze manier energie. Dat is voor de radium-228-kern hieronder schematisch weergegeven.



Combineren van gammaverval met alfa- of bètaverval

Vaak heeft de dochterkern die ontstaat bij alfa- of bètaverval een overschot aan energie. Deze dochterkern raakt deze energie dan kwijt via gammaverval. Kortom, zowel alfa- als bètaverval wordt vaak opgevolgd door gammaverval. Gemakshalve worden de twee vervalprocessen dan weergegeven als één proces. Zie de volgende figuren.



Snelheid van alfadeeltjes, bètadeeltjes en gammafotonen

Alfadeeltjes worden door kernen uitgezonden met een snelheid die voor elke radioactieve stof anders is. Heel snelle alfadeeltjes hebben een snelheid die zo'n 10% van de lichtsnelheid bedraagt. Dat is onvoorstelbaar snel want de lichtsnelheid is 300000 km/s. Volgens de relativiteitstheorie is het onmogelijk dat een voorwerp of een deeltje even snel of sneller gaat dan het licht. De lichtsnelheid kan hooguit benaderd worden.

Bètadeeltjes zijn na het wegschieten nóg grotere snelheidsduivels dan alfadeeltjes. Ze kunnen namelijk met 99% van de lichtsnelheid gaan. Dat bètadeeltjes sneller zijn dan alfadeeltjes is niet zo verwonderlijk want ze zijn veel lichter. Gammafotonen halen het wereldsnelheidsrecord pas echt! Ze gaan namelijk precies met de lichtsnelheid. Gammafotonen zijn geen deeltjes zoals alfadeeltjes en bètadeeltjes. Ze hebben namelijk geen massa (beter gezegd: geen "rustmassa").

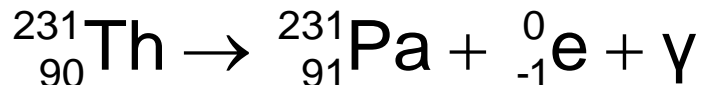
In tegenstelling tot alfadeeltjes en gammafotonen ligt de energie (bewegingsenergie) van weggeschoten bètadeeltjes (bij een gegeven moeder- en dochterkern) niet vast. De energie van bètadeeltjes kan elke waarde aannemen tussen nul en een bepaalde maximum waarde. In dit verband zeggen we dat het spectrum van alleen alfastraling en gammastraling 'mono-energetisch' is. Het feit dat bètastraling niet mono-energetisch is, heeft te maken met het feit dat er naast het bètadeeltje nog een ander, zeer klein deeltje, namelijk een anti-neutrino, wordt uitgezonden. Dit valt overigens buiten het bestek van deze cursus.

Reactievergelijkingen

Het hiervoor besproken verval van thorium-232 kan met de volgende reactievergelijking worden beschreven.



Voor het hiervoor besproken verval van thorium-231 geldt:



Bij het opstellen van deze reactievergelijkingen gelden de volgende regels:

- Het totaal aantal nucleonen (protonen en neutronen) blijft gelijk
- De totale lading blijft gelijk

Het aantal nucleonen in elk afzonderlijk deeltje staat linksboven het symbool. Een bètadeeltje (elektron) en een gammafoton hebben ieder 0 nucleonen.

De lading van elk afzonderlijk deeltje staat linksonder het symbool. De lading van het bètadeeltje (elektron) is -1 omdat zijn lading tegengesteld is aan de lading van een proton. De lading van het gammafoton is 0.

Neem bijvoorbeeld het verval van thorium-232. Voor het aantal nucleonen geldt:

$232 = 228 + 4 + 0$. Voor de lading geldt: $90 = 88 + 2 + 0$.

Opgaven bij § 3

Opgave 1

Bij alfaverval zendt een atoomkern een alfadeeltje met een zeer grote snelheid uit.
Wat is een alfadeeltje eigenlijk?

Bij bètaverval zendt een atoomkern een bètadeeltje met een zeer grote snelheid uit.
Wat is een bètadeeltje eigenlijk?

Bij gammaverval zendt een atoomkern een gammafoton uit.
Wat is een gammafoton eigenlijk?

Opgave 2

Bij radioactief verval van een atoomkern wordt een alfadeeltje, een bètadeeltje of een gammafoton uitgezonden. Welke van deze drie gaat het langzaamst? En welke het snelst?

Opgave 3

Vul op de volgende open plek groot of klein in.
Atoomkernen die bij verval een alfadeeltje uitzenden zijn _____.

Vul op de volgende open plek alfadeeltje of bètadeeltje in.
Kleine en middelgrote atoomkernen zenden bij verval een _____ uit.

Opgave 4

Helium is een zeer licht gas dat bijvoorbeeld wordt gebruikt om luchtballonnen mee te vullen. Helium is zelfs zo licht dat heliumatomen in de dampkring aan het zwaartekrachtveld van de aarde kunnen ontsnappen en in de ruimte verdwijnen. Helium lekt dus voortdurend weg uit de dampkring. Toch zal het helium op aarde niet verdwijnen. Helium ontstaat namelijk in de aardkorst door radioactief verval van zware elementen zoals uranium-238. Als de geologische aardlagen het toelaten beweegt dit helium naar het aardoppervlak en komt vervolgens in de dampkring.

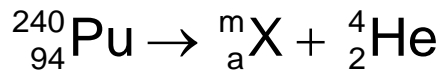
a.
Leg uit waarom het hier om alfaverval moet gaan.

Bij alfaverval wordt een alfadeeltje met grote snelheid weggeschoten. Uiteindelijk komt het alfadeeltje tot stilstand.

b.
Wat moet er vervolgens nog gebeuren voordat er sprake is van een heliumatoom?

Opgave 5

De onderstaande reactievergelijking geeft het alfaverval van een plutonium-240-kern.



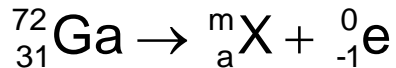
Hoe groot is het massagetal (aangegeven met m) van de dochterkern? _____

Hoe groot is het atoomnummer (aangegeven met a) van de dochterkern? _____

Wat is het elementsymbool van de dochterkern (dus op de plaats van X)? _____

Opgave 6

De onderstaande reactievergelijking geeft het bètaverval van een gallium-72-kern.



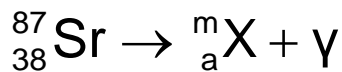
Hoe groot is het massagetal (aangegeven met m) van de dochterkern? _____

Hoe groot is het atoomnummer (aangegeven met a) van de dochterkern? _____

Wat is het elementsymbool van de dochterkern (dus op de plaats van X)? _____

Opgave 7

De onderstaande reactievergelijking geeft het gammaverval van een strontium-87-kern.



Hoe groot is het massagetal (aangegeven met m) van de dochterkern? _____

Hoe groot is het atoomnummer (aangegeven met a) van de dochterkern? _____

Wat is het elementsymbool van de dochterkern (dus op de plaats van X)? _____

Opgave 8

Schrijf hieronder de reactievergelijking op van het alfaverval van een thorium-229-kern.

Opgave 9

Schrijf hieronder de reactievergelijking op van het bètaverval van een tin-121-kern.

Opgave 10

Schrijf hieronder de reactievergelijking op van het gammaverval van een indium-113-kern.

Opgave 11

Een fermium-257-kern vervalt onder uitzending van een alfadeeltje waarna de dochterkern nog een gammafoton uitzendt. Geef een reactievergelijking van dit (gehele) proces.

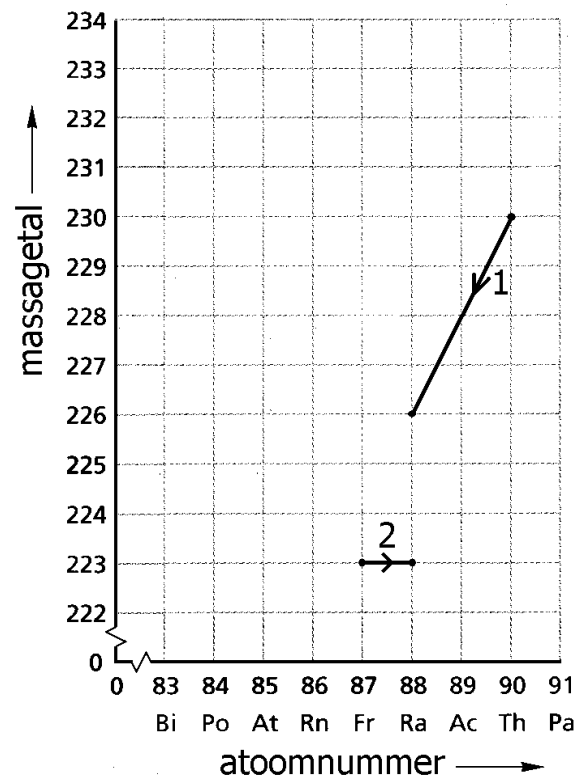
Opgave 12

Een nikkel-65-kern vervalt onder uitzending van een bètadeeltje waarna de dochterkern nog een gammafoton uitzendt. Geef een reactievergelijking van dit (gehele) proces.

Opgave 13

In het diagram hiernaast kunnen vervalprocessen worden weergegeven. Langs de horizontale as is het atoomnummer en langs de verticale as het massagetal uitgezet.

- Stelt lijnstuk 1 alfaverval of bètaverval van een kern voor?
- Stelt lijnstuk 2 alfaverval of bètaverval van een kern voor?
- Teken in het diagram het lijnstuk dat hoort bij het alfaverval van een thorium-232-kern.
- Teken in het diagram het lijnstuk dat hoort bij het bètaverval van een radium-228-kern.



§ 4 Halveringstijd van radioactieve stoffen

De halveringstijd van instabiele atoomkernen

In de vorige paragraaf hebben we gezien dat instabiele atoomkernen kunnen vervallen. Je kunt niet voorspellen op welk tijdstip een bepaalde kern zal vervallen. Je kunt echter wel de kans aangeven dat de kern binnen een bepaalde tijd vervalt. Zo heb je een kans van 50% dat een zuurstof-19-kern binnen 26,8 seconde vervalt (bètaverval). Deze 26,8 s wordt de “halveringstijd” van zuurstof-19 genoemd.

De halveringstijd van een isotoop kan op meerdere manieren worden omschreven.

- De halveringstijd is de tijdsduur waarbinnen een atoomkern (van die isotoop) met een kans van 50% vervalt.
- De halveringstijd is de tijdsduur waarbinnen de helft van een grote groep atoomkernen (van die isotoop) is vervallen.

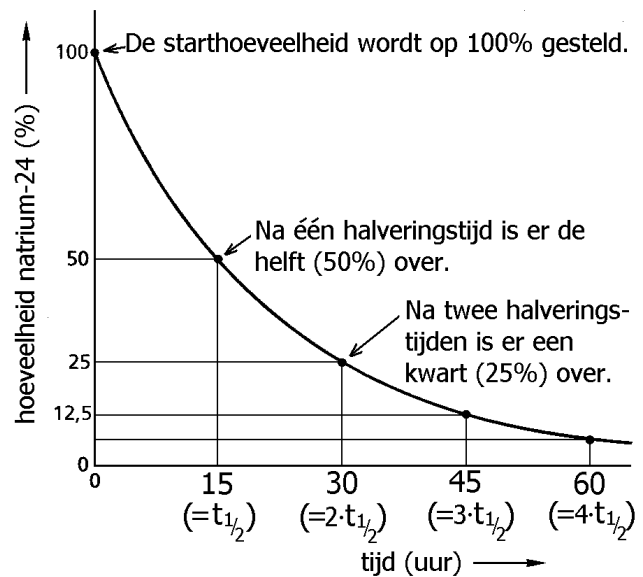
Het symbool voor de halveringstijd is $t_{1/2}$. Hoe kleiner de halveringstijd is, des te instabieler de kern. De halveringstijd hangt niet af van uitwendige invloeden zoals druk, temperatuur of de chemische inwerking van stoffen. De halveringstijd kan variëren van heel klein zoals 0,0125 s bij stikstof-12 tot heel groot zoals 5730 jaar bij koolstof-14.

Voorbeeld: het verval van natrium-24

In een glazen potje breng je een hoeveelheid natrium-24 en sluit je het potje af. De inhoud van het potje verandert dan langzaam maar zeker. Het natrium-24 gaat namelijk door bètaverval over in het stabiele magnesium-24. De halveringstijd van natrium-24 is 15 uur. Dit betekent dat na 15 uur de helft van de natrium-24-kernen vervallen is en de andere helft nog aanwezig is. Na deze 15 uur duurt het weer 15 uur voordat de helft van de overgebleven helft vervallen is. Na twee halveringstijden (30 uur) is er dus nog maar een kwart van het oorspronkelijke aantal over.

In de grafiek hiernaast is de hoeveelheid natrium-24 in het potje uitgezet tegen de tijd. De beginhoeveelheid is op 100% gesteld. Na elke halveringstijd is de overgebleven hoeveelheid natrium-24 gehalveerd. Ga dat na.

Eigenlijk is de grafiek geen vloeiende lijn maar verloopt een beetje grillig. Dit heeft alles te maken met het statistische karakter van radioactief verval. In de ene seconde vervallen er namelijk toevallig meer kernen dan in de andere seconde.



Voorbeeld van een opgave

Opgave

De isotoop nikkel-63 gaat door bètaverval over in koper-63 (stabiel) en heeft een halveringstijd van 85 jaar. Stel dat je 1,6 gram nikkel-63 hebt. Ga dan na hoe lang het duurt voordat je nog maar 0,05 gram nikkel-63 over hebt.

Oplossing

Na 85 jaar is er nog 0,8 gram nikkel-63 over.

Na 2x85 jaar is er nog 0,4 gram nikkel-63 over.

Na 3x85 jaar is er nog 0,2 gram nikkel-63 over.

Na 4x85 jaar is er nog 0,1 gram nikkel-63 over.

Na 5x85 jaar is er nog 0,05 gram nikkel-63 over.

Het duurt dus 5x85 jaar = 425 jaar.

De hoeveelheid radioactieve stof die nog over is (dus niet vervallen)

Stel dat je een bepaalde hoeveelheid van een radioactieve isotoop hebt. Deze hoeveelheid zal dan afnemen ten gevolge van het verval van de atoomkernen. Hoe meer tijd verstrijkt, des te minder er over blijft. De overgebleven hoeveelheid isotoop is eenvoudig uit te rekenen. Hierbij gebruiken we de volgende symbolen.

$t_{1/2}$ = halveringstijd van de isotoop

t = tijd die verstreken is na de beginsituatie

N_0 = aantal atoomkernen van de isotoop in de beginsituatie

N = aantal atoomkernen van de isotoop na tijdsduur t

Voor N geldt de volgende formule.

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

De formule is eenvoudig te begrijpen door een getallenvoorbeeld te nemen. Stel bijvoorbeeld dat je begint met 1000 atoomkernen van een radioactieve isotoop met een halveringstijd van 10 s. Er zullen dan na 10 s nog gemiddeld 500 atoomkernen over zijn. Dit aantal vinden we ook met de bovenstaande formule door $N_0 = 1000$ en $t_{1/2} = 10$ s en $t = 10$ s in te vullen. We krijgen dan namelijk:

$$N = 1000 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{10\text{s}}{10\text{s}}} = 1000 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^1 = 500.$$

Na 20 s zijn er nog 250 atoomkernen over want de helft van 500 is 250. Met de formule vinden we dit ook zoals uit de volgende regel blijkt.

$$N = 1000 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{20\text{s}}{10\text{s}}} = 1000 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 250.$$

In werkelijkheid is het aantal atoomkernen vele malen groter dan in dit getallenvoorbeeld genomen is. Vaak wordt de formule gebruikt om uit te rekenen hoeveel procent van de beginhoeveelheid van een radioactieve stof nog over is. Zie het volgende voorbeeld van een opgave.

Nog een voorbeeld van een opgave

Opgave

Een boom is 40.000 jaar geleden door een grondverschuiving ontworteld en vervolgens onder de grond goed bewaard gebleven. Het in de boom aanwezige koolstof-14 is door radioactief verval grotendeels verdwenen. Bereken hoeveel procent van het oorspronkelijke koolstof-14 nu nog in de boom zit. De halveringstijd van koolstof-14 is 5730 jaar.

Oplossing

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{40000}{5730}} = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{6,9808} = N_0 \cdot 0,0079$$

In de boom zit dus nog 0,79% van de oorspronkelijke hoeveelheid koolstof-14.

Opmerking

Dieren en planten zijn onder andere opgebouwd uit koolstof. Hiervan komt de isotoop koolstof-12 verreweg het meeste voor (99%). De twee andere isotopen zijn koolstof-13 en koolstof-14. Koolstof-12 en koolstof-13 zijn stabiel terwijl koolstof-14 verval met een halveringstijd van 5730 jaar. Om te bepalen hoe lang geleden dieren en planten dood zijn gegaan kijkt men naar het percentage van koolstof-14. Tijdens het leven ligt dit percentage min of meer vast. Na de dood neemt het percentage van koolstof-14 door verval af. Door dit percentage te bepalen kan men terug rekenen hoe lang geleden de dood is ingetreden.

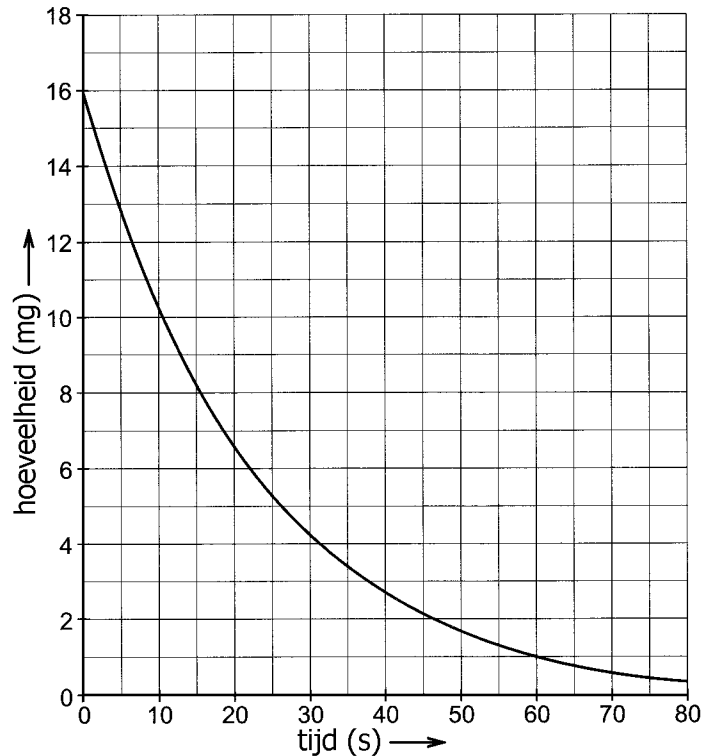
Opgaven bij § 4

Opgave 1

Omschrijf de halveringstijd van een isotoop op twee manieren.

Opgave 2

Een radioactief preparaat bevat een aantal stoffen. De enige radioactieve stof in het preparaat is technetium-100. Door het radioactieve verval daalt de hoeveelheid hiervan. In de grafiek hiernaast staat deze hoeveelheid uit tegen de tijd. Bepaal uit de grafiek de halveringstijd van technetium-100.



Opgave 3

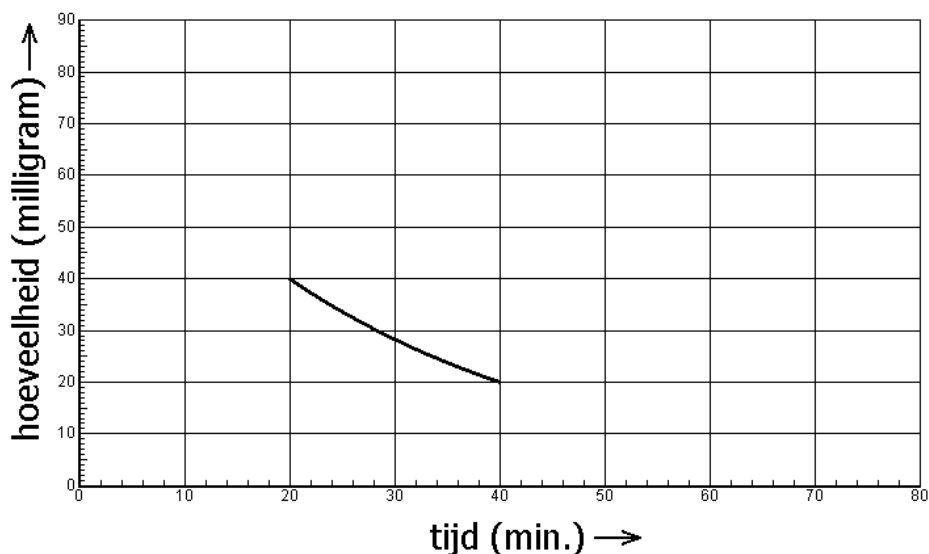
De isotoop kalium-42 gaat door bètaverval over in calcium-42 (stabiel) en heeft een halveringstijd van 12,4 uur. Stel dat je in het begin 2,4 microgram hebt. Ga dan na hoe lang het duurt voordat je nog maar 0,15 microgram over hebt.

Opgave 4

Een klompje tin bevat een kleine hoeveelheid van de isotoop tin-121. Deze isotoop vervalt onder uitzending van een bètadeeltje. De halveringstijd van dit bètaverval is 22,7 uur. Bereken dan hoeveel procent van het oorspronkelijke tin-121 over is na 5 dagen.

Opgave 5

Een radioactieve isotoop vervalt. In het diagram hiernaast staat de hoeveelheid van deze isotoop uit tegen de tijd. Slechts een klein deel van de grafiek is zichtbaar. Teken de ontbrekende delen van de grafiek.



Opgave 6

Bij veel vervalreacties van atoomkernen zijn de dochterkernen zelf ook radioactief. Ook de dochterkernen vervallen dan vroeg of laat. De vervalreacties gaan net zo lang door totdat er stabiele atoomkernen zijn gevormd. Op deze manier kun je een aantal in de natuur voorkomende vervalreeksen onderscheiden. Zie de volgende vier diagrammen. In elk diagram is het massagetal tegen het atoomnummer uitgezet. Elke vervalreactie heeft zijn eigen halveringstijd. De grootste halveringstijden zijn in de diagrammen vermeld.

In deze opgave kijken we naar de isotopen die in de natuur op aarde voorkomen. Stel dat bij het ontstaan van de aarde alle in de diagrammen voorkomende isotopen aanwezig zijn en dat de aarde 4,6 miljard ($4,6 \cdot 10^9$) jaar oud is.

a.

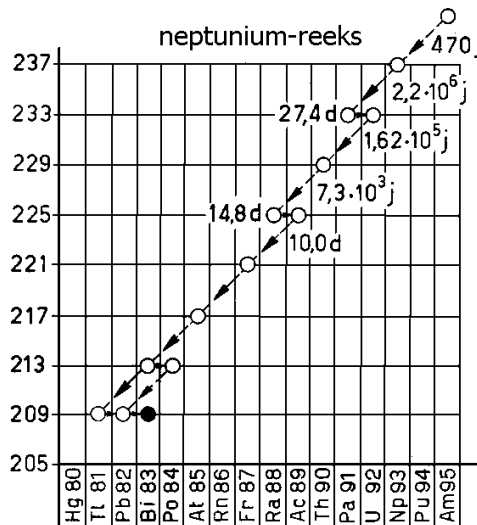
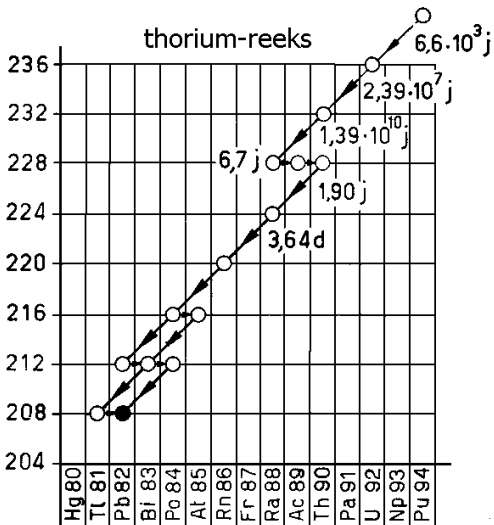
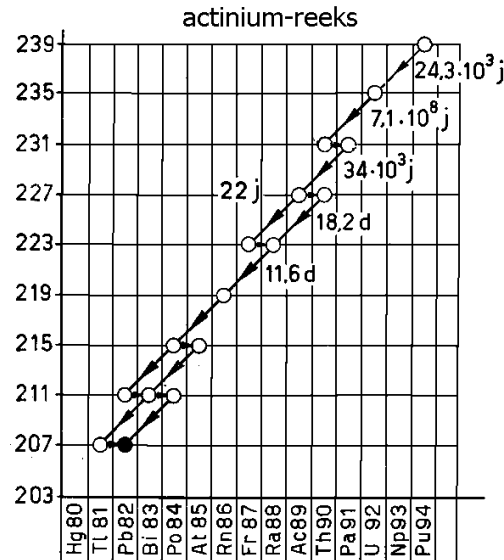
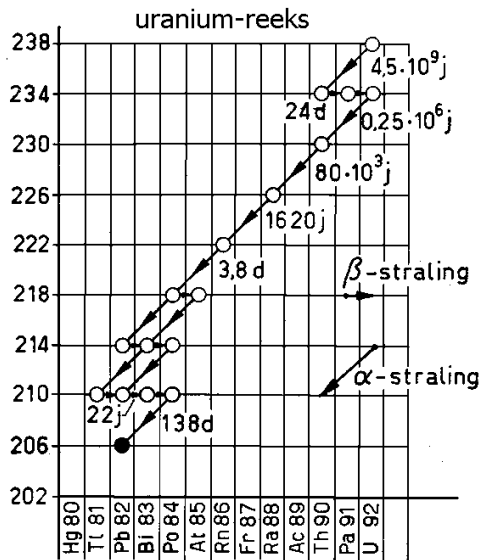
Leg uit dat alle isotopen in de neptunium-reeks niet meer in de natuur voorkomen.

b.

Leg uit dat in de natuur nog aanzienlijke hoeveelheden radium-226 zijn terwijl zijn halveringstijd “slechts” 1620 jaar is.

c.

Leg uit dat de hoeveelheid lood op aarde toeneemt. Welke isotopen van lood zijn dat?



§ 5 Activiteit van een radioactieve bron

De activiteit van een hoeveelheid radioactieve stof

In een radioactieve stof zitten atoomkernen die spontaan vervallen of kunnen vervallen. Een belangrijke grootheid hierbij is de 'activiteit'. Deze kan als volgt omschreven worden.

De activiteit van een hoeveelheid radioactieve stof is het gemiddeld aantal atoomkernen dat in die stof per seconde vervalt. De activiteit wordt uitgedrukt in becquerel (symbool Bq).

Stel bijvoorbeeld dat de activiteit van een radioactieve bron 8000 Bq is. Dan vervallen in die bron dus gemiddeld 8000 atoomkernen per seconde. We noteren dit als:

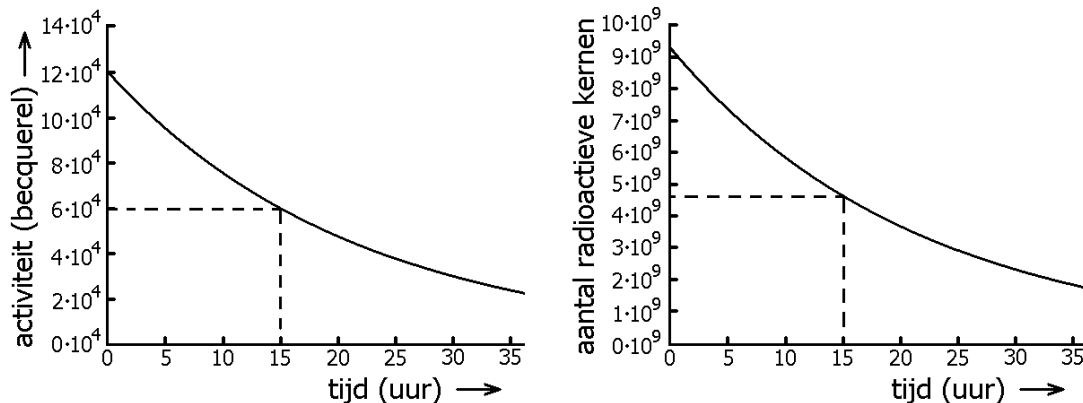
$$A = 8000 \text{ Bq.}$$

Naast (kunstmatige) radioactieve bronnen is er ook natuurlijke radioactiviteit. De activiteit van oceaanwater is bijvoorbeeld 12 Bq per liter. Het menselijk lichaam heeft een activiteit van ongeveer 120 Bq per kilogram.

Voorbeeld

In dit voorbeeld kijken we naar een hoeveelheid natrium-24. Deze isotoop wordt op een kunstmatige manier verkregen en vervalt tot het stabiele magnesium-24 onder uitzending van een bètadeeltje.

Hieronder staan twee diagrammen. In het linker diagram staat de activiteit van het natrium-24 tegen de tijd uit. De activiteit bedraagt in het begin (op $t = 0$) $12 \cdot 10^4$ becquerel. In het rechter diagram staat het aantal natrium-24-kernen tegen de tijd uit. Zo'n soort diagram kennen we reeds uit de vorige paragraaf. In het begin (op $t = 0$) zijn er $9,3 \cdot 10^9$ van deze kernen.



Als we beide grafieken met elkaar vergelijken valt meteen op dat ze in hetzelfde tempo afnemen. Bijvoorbeeld zijn beide grafieken in de halveringstijd (15 uur) gedaald tot de helft van de beginwaarde. Zie de stippellijnen. Dit is logisch want de activiteit is evenredig met het aantal radioactieve kernen. Bij twee keer zo weinig radioactieve kernen zullen er gemiddeld ook twee keer zo weinig atoomkernen per seconde vervallen.

Het tijdsverloop van de activiteit van een radioactieve stof

In deze paragraaf kijken we naar een radioactieve stof ("radioactieve bron") die slechts één radioactieve isotoop bevat (zoals natrium-24 in het voorgaande voorbeeld). De volgende formule beschrijft hoe het aantal radioactieve kernen N van de tijd t afhangt. Hierbij zijn N_0 het beginaantal en $t_{1/2}$ de halveringstijd. Zie eventueel de vorige paragraaf.

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

Een soortgelijke formule geldt nu ook voor de activiteit A van die stof namelijk:

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

Bijvoorbeeld kunnen we de activiteit in het bovenstaande voorbeeld voor $t = 30$ uur (twee keer de halveringstijd) als volgt uitrekenen.

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} = 12 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{30}{15}} = 3 \cdot 10^4 \text{ Bq.}$$

Verband tussen activiteit, aantal radioactieve kernen en halveringstijd

Met de volgende formule kan je de activiteit A van de stof berekenen uit het aantal radioactieve kernen N in die stof en de halveringstijd $t_{1/2}$.

$$A = \frac{0,693 \cdot N}{t_{1/2}}$$

Deze formule is eenvoudig te begrijpen. Uit de formule volgt dat A evenredig is met N . Dat is hiervoor reeds besproken. Uit de formule blijkt ook dat A omgekeerd evenredig is met $t_{1/2}$. Dat is ook logisch want bij een verdubbeling van de halveringstijd wordt de kans dat een atoomkern binnen een bepaalde tijd (stel 1 seconde) vervalt, gehalveerd. De evenredigheidsconstante is 0,693. Dit getal is afgerond; de exacte waarde is de natuurlijke logaritme van 2 en wordt geschreven als $\ln(2)$.

Bij het gebruik van de formule moet de halveringstijd in seconde worden uitgedrukt. Dit hangt samen met de eenheid becquerel die gelijk is aan "per seconde" (en bijvoorbeeld niet "per minuut" of "per uur").

De formule kunnen we controleren met het hiervoor behandelde voorbeeld.

De halveringstijd is: $t_{1/2} = 15$ uur. Op $t = 0$ geldt volgens de rechter grafiek: $N = 9,3 \cdot 10^9$. Voor de activiteit op $t = 0$ geldt dan volgens de formule:

$$A = \frac{\ln(2) \cdot N}{t_{1/2}} = \frac{0,693 \cdot 9,3 \cdot 10^9}{15 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}} = 12 \cdot 10^4 \text{ Bq.}$$

Dit klopt met de linker grafiek op $t = 0$. Ga dat na.

Opgaven bij § 5

Opgave 1

Wat verstaan we onder de activiteit van een radioactieve bron?

Opgave 2

Wat is de eenheid van activiteit?

Opgave 3

Een radioactieve bron heeft een activiteit van $4,5 \cdot 10^3$ Bq.
Bereken hoeveel atoomkernen vervallen in één minuut.

Opgave 4

In een radioactieve bron vervallen in één minuut gemiddeld 3000 radioactieve atoomkernen. Bereken de activiteit van de bron.

Opgave 5

In een radioactieve bron bevindt zich één soort radioactieve kernen. Deze vervallen tot stabiele dochterkernen. De halveringstijd van dit radioactieve verval is 22 uur. In de beginsituatie is de activiteit 2,8 kBq. Bereken de activiteit na 64 uur.

Opgave 6

Een bepaalde radioactieve bron bevat naast stabiele kernen ook een miljard ijzer-59-kernen. Deze vervallen tot stabiele kobalt-59-kernen. De halveringstijd hierbij is 45 dagen. De activiteit van de bron is 178 Bq.

Wat zal de activiteit dan van een bron zijn die twee miljard ijzer-59-kernen bevat (naast stabiele kernen)?

Wat zal de activiteit van een bron zijn die een miljard instabiele kernen met een halveringstijd van 90 dagen bevat (naast stabiele kernen)?

Opgave 7

Kernenergiecentrales produceren radioactief afval. Er zijn wat betreft het opslaan van dit afval drie gevallen te onderscheiden namelijk:

- * afval met een zeer korte halveringstijd,
 - * afval met een extreem grote halveringstijd,
 - * afval met een “middellange” halveringstijd, variërend van tientallen jaren tot eeuwen.
- Leg uit wat het “voordeel” is van afval met een zeer korte halveringstijd.

Leg uit wat het “voordeel” is van afval met een extreem grote halveringstijd.

Opgave 8

In een radioactieve bron bevindt zich één soort radioactieve kernen. Deze vervallen tot stabiele dochterkernen. De halveringstijd van dit radioactieve verval is 40 uur. Op een bepaald moment bevinden zich $8,5 \cdot 10^{16}$ radioactieve kernen in de bron. Bereken dan de activiteit van de bron.

Opgave 9

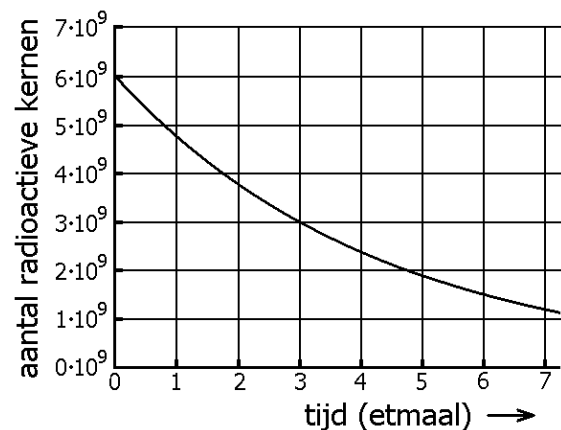
De radioactieve isotoop radon-222 wordt in de aardkorst gevormd door het verval van andere radioactieve isotopen. Het gevormde radon-222 ontsnapt voortdurend in kleine hoeveelheden als gas uit de aardbodem. In Nederland is de activiteit van deze radonisotoop per m^3 gemiddeld 3,0 Bq. De halveringstijd van radon-222 is 3,83 etmaal (1 etmaal = 24 uur).

Bereken het gemiddelde aantal kernen van radon-222 per m^3 buitenlucht.

Opgave 10

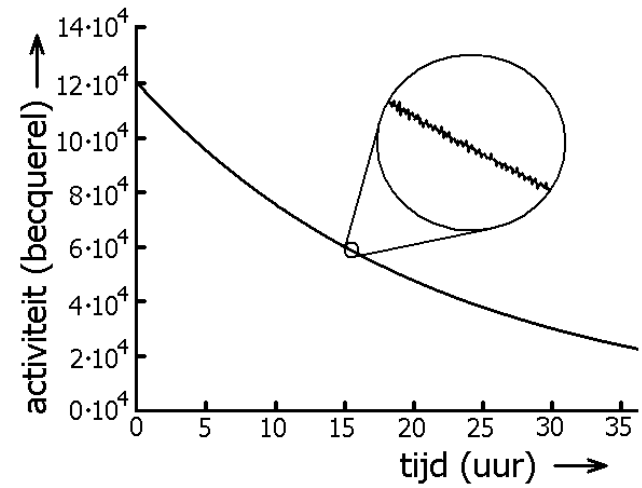
In een radioactieve bron bevindt zich één soort radioactieve kernen. Deze vervallen tot stabiele dochterkernen. In de figuur hiernaast is het aantal radioactieve kernen uitgezet tegen de tijd.

Bereken de activiteit van de bron op $t = 0$.



Opgave 11

In het diagram hiernaast is de activiteit van een radioactieve bron tegen de tijd uitgezet. Als je zo'n diagram precies bekijkt, blijkt de grafiek geen vloeiende maar een beverige lijn te zijn. Leg uit waarom dat het geval is.



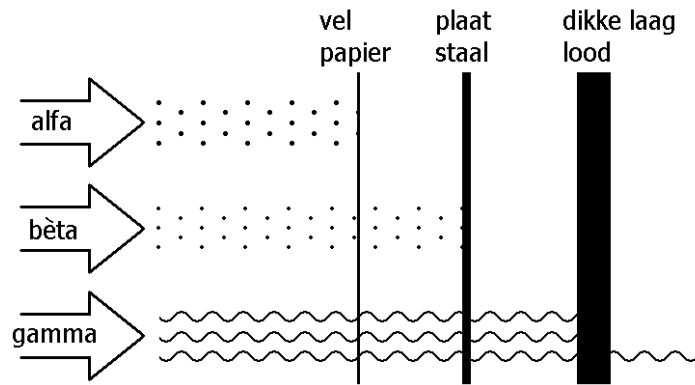
§ 6 Kernstraling: doordringend vermogen

Doordringend vermogen van alfa-, bèta- en gammastraling

Het doordringend vermogen van kernstraling (alfa-, bèta- en gammastraling) geeft aan hoe ver deze straling door stoffen heen dringt. Het doordringend vermogen is van alfastraling het kleinst en van gammastraling het grootst. Zie de figuur hiernaast. Zo leggen alfadeeltjes in lucht hooguit 1 decimeter af. Een vel papier houdt ze al tegen.

Bètadeeltjes leggen in lucht enkele meters af. In metaal kunnen ze enkele millimeters doordringen.

Gammastraling wordt nauwelijks verzwakt door lucht. Het gaat ook vrij makkelijk door menselijk weefsel. Het gaat zelfs door een paar centimeter lood.



Dracht en halveringsdikte

Als alfa- en bètadeeltjes een stof binnendringen leggen ze een bepaalde afstand af. We spreken over de dracht. Dat is de maximale afstand die alfa- en bètadeeltjes in de stof afleggen. Vergelijk dit met kogels die je met een geweer op een zandhoop afvuurt. De kogels hebben een zekere indringdiepte. In zachte lichaamsweefsels bijvoorbeeld is de dracht van alfadeeltjes tussen 0,005 mm en 0,2 mm (afhankelijk van de beginsnelheid) en van bètadeeltjes tussen 5 mm en 50 mm.

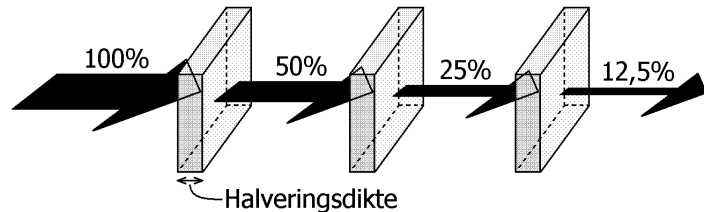
Gammastraling wordt in een stof anders geabsorbeerd dan alfa- en bètastraling. Hoe dieper de gammastraling in het materiaal dringt, des te zwakker de straling wordt. Helemaal verdwijnen zal hij echter niet. Dat kan je vergelijken met de absorptie van zonlicht in water. Als je bijvoorbeeld naar de bodem van een diep meer duikt wordt het steeds donkerder (en kouder). Toch zal er altijd wel een heel klein beetje licht tot de bodem doordringen.

Hoe kan gammastraling zich zo anders gedragen dan alfa- en bètastraling? Alfa- en bètastraling bestaan uit geladen deeltjes. De stof waar zij doorheen gaan bestaat uit atomen en moleculen die zelf ook geladen deeltjes bevatten. Daardoor kunnen de alfa- en bètadeeltjes niet ongestoord doorgaan maar worden zij voortdurend afgeremd. Uiteindelijk staan alle alfa- en bètadeeltjes stil. Gammastraling is een elektromagnetische golf en bestaat uit gammafotonen. Bij de absorptie hiervan is er sprake van een kansproces. Een gammafoton heeft namelijk een kans om binnen een bepaalde afstand geabsorbeerd te worden. Zo niet, dan gaat het foton vrolijk verder alsof er niets gebeurd is.

Voor gammastraling gebruiken we het begrip halveringsdikte. Zie de volgende omschrijvingen.

- De halveringsdikte is de afstand waarbinnen een gammafoton met een kans van 50% door het materiaal geabsorbeerd wordt.
- De halveringsdikte van een materiaal is de afstand waarover de intensiteit van de gammastraling tot de helft van zijn oorspronkelijke waarde afneemt.

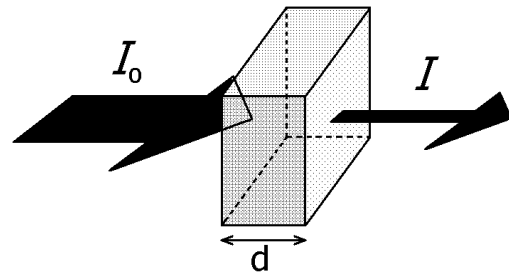
Een laag met eenmaal de halveringsdikte verzwakt de intensiteit van de gammastraling tot de helft. Na nog zo'n laag blijft er een kwart over, daarna een achtste enzovoort. Zie de figuur hiernaast.



Bijvoorbeeld is de halveringsdikte van zachte lichaamsweefsels tussen 100 mm en 300 mm (afhankelijk van de energie van het gammafoton).

Formule voor de verzwakking van gammastraling door een stof

In de figuur hiernaast valt een bundel gammastralen op een plaat (blok) van een bepaalde stof. In de plaat wordt de gammabundel verzwakt. Het is eenvoudig om uit te rekenen hoe groot de verzwakking is. Hierbij gebruiken we de volgende symbolen.



- I = doorgelaten intensiteit,
- I_0 = invallende intensiteit,
- d = dikte van de plaat,
- $d_{1/2}$ = halveringsdikte van de stof.

Voor de intensiteit van de doorgelaten bundel geldt dan de volgende formule.

$$I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{d_{1/2}}}$$

Ga na dat deze formule veel overeenkomst vertoont met de eerder behandelde formule voor radioactief verval.

Stel bijvoorbeeld dat een bundel gammastralen op een loden plaat met een dikte van 8,0 cm valt en dat de halveringsdikte van lood 1,4 cm is. Dan geldt:

$$I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{8,0}{1,4}} = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{5,71} = I_0 \cdot 0,019$$

De loden plaat laat dus 1,9% van de gammastraling door.

Opgaven bij § 6

Opgave 1

Wat verstaan we onder de dracht van alfa- of bètadeeltjes in een stof?

Opgave 2

Geef twee omschrijvingen van de halveringsdikte van een stof bij gammastraling.

Opgave 3

Radioactieve stoffen moeten veilig worden opgeborgen. De wand van het opbergkastje bestaat meestal uit een dikke laag lood. Hiermee wordt de uitgezonden straling zoveel mogelijk tegen gehouden. Leg uit waarom het afschermen van gammastraling veel lastiger is dan het afschermen van alfa- en bètastraling.

Opgave 4

Jan bewaart een klompje alfastraler (bijvoorbeeld actinium-225) in zijn broekzak. Piet bewaart een klompje bètastraler (bijvoorbeeld fosfor-33) in zijn broekzak. Wie loopt het grootste gevaar? Leg je antwoord uit.

Opgave 5

Gammastraling gaat door een stalen plaat met een dikte van 6 cm. De halveringsdikte van staal bij de betreffende gammastraling is 2 cm. Bereken (uit je hoofd) hoeveel procent van de oorspronkelijke gammastraling door het staal gaat.

Opgave 6

Gammastraling gaat door een loden plaat heen. De plaat laat een kwart van de straling door. De halveringsdikte van lood bij de betreffende gammastraling is 1,4 cm. Bereken (uit je hoofd) hoe dik de loden plaat is.

Opgave 7

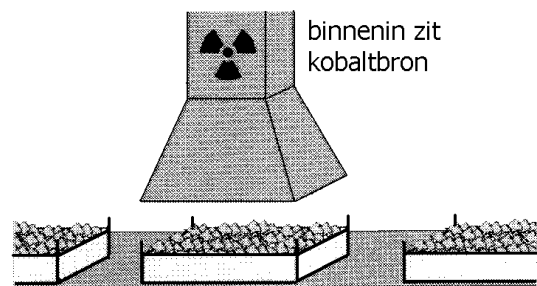
Met welke formule kunnen we berekenen hoeveel procent van gammastraling door een plaat of wand gaat?

Opgave 8

In een betonnen bunker wordt radioactief materiaal opgeslagen. De muren van de bunker zijn 40 cm dik. De halveringsdikte van het beton bij de uitgezonden gammastraling bedraagt 12 cm. Bereken hoeveel procent van de oorspronkelijke intensiteit door de muren gaat.

Opgave 9

De houdbaarheid van bijvoorbeeld aardbeien kan aanzienlijk vergroot worden door de vruchten na het plukken te doorstralen met gammastraling. Zie de figuur hiernaast. Niet alleen de bacteriën die verantwoordelijk zijn voor het rottingsproces worden onschadelijk gemaakt, maar ook de insecten en eitjes van insecten. Als stralingsbron wordt kobalt-60 gebruikt dat bij verval bèta- en gammastraling uitzendt. De kistjes komen via een lopende band onder de bestraler. Dan stopt de band even en wordt het fruit enige tijd doorstraald. Daarna schuift het volgende kistje onder de bestraler.



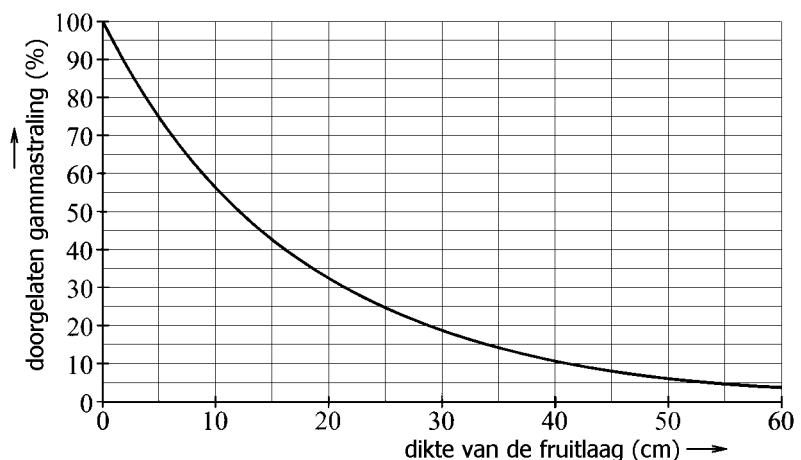
a.

Leg uit waarom de bètastraling die het kobalt uitzendt, nauwelijks bijdraagt aan het onschadelijk maken van bacteriën en insecten in het fruit.

De grafiek hiernaast geeft aan hoeveel procent van de gammastraling door een laag fruit van een bepaalde dikte wordt doorgelaten.

b.

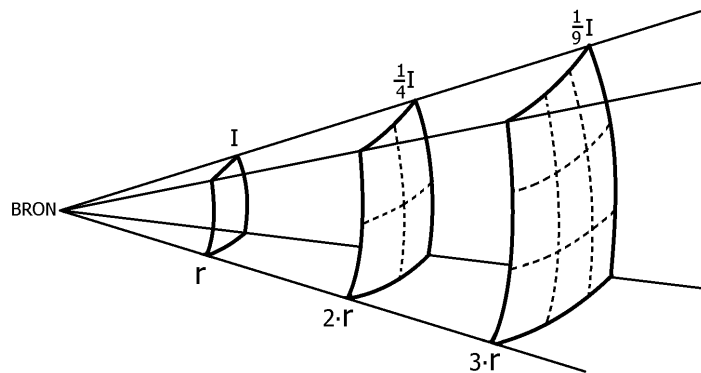
Bepaal de halveringsdikte van fruit voor de gammastraling van kobalt-60.



Opgave 10

In een laboratorium bewaart men radioactieve stoffen in een loden kistje. Het lood houdt de vrijkomende alfa- en bètastraling volledig tegen. Helaas kan gammastraling nooit voor de volle honderd procent worden tegengehouden, hoe dik de loden wanden van het kistje ook zijn. Om de mensen in het laboratorium tegen deze gammastraling te beschermen, worden zij gedurende het grootste deel van de werkdag op afstand van het kistje gehouden. In dit verband geldt de kwadratenwet. Deze wet staat in de huidige opgave centraal.

Volgens de kwadratenwet is de intensiteit van de gammastraling, die van een stralingsbron afkomstig is, omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tot de bron. Zie de figuur hiernaast. Als de afstand tot de bron bijvoorbeeld wordt verdubbeld, wordt de intensiteit van de gammastraling vier keer zo klein. De kwadratenwet volgt uit het feit dat de straling zich uitsmeert over een steeds groter boloppervlak en de oppervlakte van een bol kwadratisch afhangt van de straal van de bol.



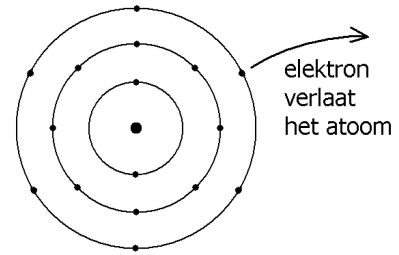
Na deze inleiding over de kwadratenwet dan eindelijk de opgave.

Een werknemer van het eerder genoemde laboratorium heeft een werkplek die zich 3 m van het loden kistje met radioactieve bron bevindt. Bereken tot hoeveel procent de stralingsintensiteit daalt als deze afstand wordt vergroot tot 15 m.

§ 7 Kernstraling: ioniserend vermogen

Ionisatie

Om het effect van alfa-, bèta- en gammastraling op stoffen te begrijpen moeten we eerst weten wat ionisatie is. Ionisatie is het proces waarbij een atoom of molecuul één of meerdere elektronen kwijt raakt of erbij krijgt. Door de ionisatie gaat het atoom of molecuul over in een ion. Zie bijvoorbeeld de figuur hiernaast waarin een atoom wordt geïoniseerd.

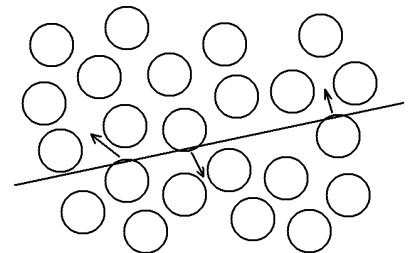


Om een elektron uit een atoom of een molecuul te trekken is energie nodig: de zogenaamde ionisatie-energie. Zoals we hierna zullen zien zijn alfadeeltjes, bètadeeltjes en gammafotonen in staat om atomen en moleculen te ioniseren. Zij leveren dan de benodigde ionisatie-energie.

Ioniserende straling

Alfa-, bèta- en gammastraling kunnen in een stof atomen en moleculen ioniseren. We noemen deze stralingssoorten dan ook wel ioniserende straling. Ook röntgenstraling en (in mindere mate) ultraviolette straling kunnen dat. Deze laatste twee stralingssoorten ontstaan echter niet uit het verval van atoomkernen en blijven in deze cursus daarom buiten beschouwing.

Neem een alfadeeltje als voorbeeld. Tijdens het verval van een atoomkern wordt zo'n deeltje met een reusachtige snelheid weggeschoten. Als het deeltje vervolgens door een stof schiet, zal het op zijn weg atomen en/of moleculen ioniseren. Zie de schematische voorstelling hiernaast. De rechte lijn geeft de baan van het alfadeeltje weer en de cirkels stellen atomen of moleculen voor. In de figuur worden er drie geïoniseerd. De pijltjes zijn de losgekomen elektronen.



Het alfadeeltje heeft een positieve elektrische lading en trekt de (negatief geladen) elektronen, die rond de atoomkern bewegen, aan. Daardoor kan het alfadeeltje bij het passeren van een atoom of molecuul elektronen uit hun banen trekken. Elke keer als een alfadeeltje een atoom of molecuul ioniseert, neemt zijn snelheid af. Dit komt doordat de benodigde ionisatie-energie ten koste gaat van de bewegingsenergie van het alfadeeltje. Het alfadeeltje stopt pas met ioniseren als hij (bijna) tot stilstand is gekomen.

Ook een weggeschoten bètadeeltje kan op zijn weg door een stof atomen en moleculen ioniseren. Het bètadeeltje is negatief geladen en werkt afstotend op elektronen die rond een atoomkern bewegen. Daardoor kan het bètadeeltje bij het passeren van een atoom of molecuul elektronen uit hun baan duwen. Ook nu geldt dat de snelheid van het bètadeeltje bij elke ionisatie afneemt. Uiteindelijk komt hij (bijna) tot stilstand en wordt dan een gewoon elektron.

In tegenstelling tot alfa- en bètadeeltjes ioniseert gammastraling atomen en moleculen in een stof op een indirecte manier. Dit gebeurt namelijk in stappen. Een gammafoton gaat een reactie aan met een atoom of een atoomkern. Hierbij wordt een elektron met grote snelheid weggeschoten die op zijn beurt andere atomen of moleculen ioniseert (net als een bètadeeltje dat zou doen).

Ioniserend vermogen van alfa-, bèta- en gammastraling

Het ioniserend vermogen van straling geeft aan hoe makkelijk deze straling atomen en/of moleculen in een stof kan ioniseren. Het ioniserend vermogen van alfastraling is groot, van bètastraling matig en van gammastraling zeer klein. Dat betekent dat de ionisaties bij alfastraling gemiddeld genomen dicht bij elkaar liggen en bij gammastraling juist heel ver van elkaar af.

Het feit dat alfadeeltjes veel meer ionisaties per eenheid van lengte teweeg brengen dan bètadeeltjes is logisch als we bedenken dat ze veel langzamer door de stof lopen. Ze hebben als het ware veel meer tijd om de atomen en moleculen, die ze op hun pad tegenkomen, te ioniseren. De kleinere snelheid van alfadeeltjes bevordert dus het ioniseren en daarmee weer het afremmen van die deeltjes.

De tabel hiernaast vat de eigenschappen van alfa-, bèta- en gammastraling samen. Het komt er kort gezegd op neer dat de ionisaties door alfastraling geconcentreerd zijn in een klein gebiedje. De ionisaties door gammastraling zijn juist uitgesmeerd over een groot gebied. Bètastraling zit met zijn ionisaties tussen deze uitersten in.

	ioniserend vermogen	doordringend vermogen
alfastraling	groot	klein
bètastraling	matig	matig
gammastraling	klein	groot

Gevaar van ioniserende straling in het menselijk lichaam

Ioniserende straling ioniseert atomen en moleculen op zijn weg. In menselijk of dierlijk weefsel kan dit schadelijk zijn. De ionen die ontstaan reageren namelijk erg gemakkelijk met andere atomen of moleculen. Vaak heeft dit ongewenste chemische reacties in lichaamscellen tot gevolg. Dit geldt zeker voor de celkern, waarin het DNA zich bevindt. Er zijn dan drie mogelijkheden: de cel herstelt zich, de cel krijgt andere erfelijke eigenschappen (mutatie) of de cel gaat dood. In het tweede geval is er kans op onbeheersbare celdeling en ontstaat er een tumor (kanker).

We moeten onderscheid maken tussen uitwendige bestraling en inwendige besmetting. Bij uitwendige bestraling bevindt de stralingsbron zich buiten het lichaam. Alfastraling is dan vrijwel onschadelijk omdat de alfadeeltjes niet door de huid kunnen dringen. Ook bètastraling vormt maar een beperkt gevaar. Gammastraling is bij uitwendige bestraling het gevaarlijkst vanwege zijn grote doordringend vermogen. Bij inwendige besmetting vormen alfa- en bètastraling juist het grootste gevaar. De alfa- en bètadeeltjes verliezen al hun energie namelijk binnen het lichaam (door atomen en moleculen te ioniseren) en veroorzaken dus maximale schade.

Ioniserende straling als wapen tegen een tumor

Als iemand in een bepaald lichaamsdeel een kankergezwell heeft, kan dit met ioniserende straling bestreden worden. Deze straling verstoort immers de chemische processen in cellen. Kankercellen zijn hier, net als andere snel delende cellen, erg gevoelig voor. De ioniserende straling treft natuurlijk ook gezonde cellen in de buurt van de tumor maar deze kunnen de ionisaties gelukkig beter verdragen.

Naast ioniserende straling is chemotherapie ook een veelgebruikt wapen tegen kanker. Bij chemotherapie wordt een soort gif in de aderen gespoten. Dit gif werkt in principe hetzelfde als ioniserende straling: de chemie in cellen wordt verstoord. Omdat snel delende cellen hier erg gevoelig voor zijn, gaan deze als eerste dood. Dit geldt dus ook voor kankercellen. De bekende haaruitval tijdens chemotherapie is hiermee ook te verklaren want haarcellen zijn ook snel delend.

Schematisch overzicht van stralingssoorten

In de figuur hiernaast wordt straling op verschillende manieren onderverdeeld. Allereerst kun je onderscheid maken tussen deeltjesstraling en elektromagnetische straling. Een tweede onderscheid is dat tussen niet-ioniserende straling en ioniserende straling.

	Snelle deeltjes	Elektromagnetisch
Niet ioniserend		Radiogolven Microgolven Infrarood licht Zichtbaar licht Ultraviolet licht A en B
Ioniserend	Protonen Neutronen	Ultraviolet licht C Röntgenstraling
	Alfastraling Bètastraling	Gammastraling

Kernstraling bij radioactief verval.

Uit het schema blijkt onder andere dat alfa-, bèta- en gammastraling niet de enige stralingssoorten zijn die in stoffen ioniserend werken. Ook protonen en neutronen kunnen ioniseren, evenals ultraviolet licht (met name de kortere golflengtes) en röntgenstraling.

Ter informatie (valt buiten de lesstof)

Omdat protonen geladen deeltjes zijn, ioniseren zij atomen en moleculen op een directe manier (vergelijkbaar met alfadeeltjes en bètadeeltjes). Door hun elektrische lading kunnen ze elektronen uit hun banen (rond de atoomkern) trekken. Protonen worden tijdens hun reis door een stof voortdurend afgeremd en hebben dan ook een dracht (geen halveringsdikte). Neutronen zijn ongeladen deeltjes en ioniseren atomen en moleculen op een indirecte manier (net als gammastraling). Een neutron kan op een atoomkern botsen. Als de atoomkern licht is, zoals een waterstofkern, kan deze met grote snelheid uit het atoom gestoten worden en vervolgens andere atomen en moleculen op zijn weg ioniseren. Het botsen van neutronen op kernen is een kansproces en daarom wordt het doordringend vermogen van neutronen beschreven met een halveringsdikte (geen dracht).

Opgaven bij § 7

Opgave 1

Wat verstaat men onder het ioniseren van een atoom of molecuul?

Opgave 2

Als alfastraling, bètastraling en gammastraling in stoffen dringen, ioniseren ze atomen en moleculen. Bij welke stralingssoort liggen de ionisaties het dichtst bij elkaar en bij welke stralingssoort het verst?

Opgave 3

Alfa-, bèta- en gammastraling richten schade aan in het menselijk lichaam. Leg uit waarom.

Opgave 4

Stel dat je een bolletje van een radioactieve stof inslikt dat alfastraling en gammastraling uitzendt. Welke van deze twee stralingssoorten is dan het schadelijkst voor je gezondheid? Leg je antwoord uit.

Opgave 5

Het doorstralen van voedsel met gammastraling gebeurt op grote schaal. Het doel hiervan is het doden van bacteriën waardoor het voedsel langer houdbaar blijft. Toch bestaan in consumentenkringen bezwaren tegen deze manier van houdbaar maken van voedsel. Men stelt vragen als: "Wordt het bestraalde voedsel zelf radioactief?" Beantwoord deze vraag. Licht je antwoord toe.

Opgave 6

Een tandarts maakt af en toe een röntgenfoto van je gebit. Leg uit waarom hij dat niet te vaak moet doen.

Opgave 7

Leg uit waarom je huidkanker kunt krijgen als je te lang in de zon zit.

Opgave 8

Een uranium-238 kern vervalt onder uitzending van een alfadeeltje. Het alfadeeltje beweegt een aantal centimeter door de lucht voordat het tot stilstand komt. Op zijn weg door de lucht ioniseert het veel luchtmoleculen. De energie die nodig is om een luchtmolecuul te ioniseren, gaat steeds ten koste van de bewegingsenergie van het alfadeeltje. De gemiddelde ionisatie-energie van luchtmoleculen bedraagt 34 eV. Het alfadeeltje begint zijn reis door de lucht met een bewegingsenergie van 4,2 MeV.

Bereken nu hoeveel luchtmoleculen door het alfadeeltje geïoniseerd kunnen worden.

Achtergrondinformatie

De afkortingen eV en MeV betekenen 'elektronvolt' en 'mega-elektronvolt' (= miljoen eV). Dit zijn heel kleine eenheden van energie. Eén elektronvolt is de energieverandering van een elektron als deze een spanning van 1 volt doorloopt. Er geldt: $1 \text{ elektronvolt} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$.

Opgave 9

Als geladen deeltjes, zoals alfadeeltjes, bètadeeltjes en protonen, met grote snelheid door een stof bewegen, ioniseren ze atomen en moleculen die ze op hun weg tegenkomen.

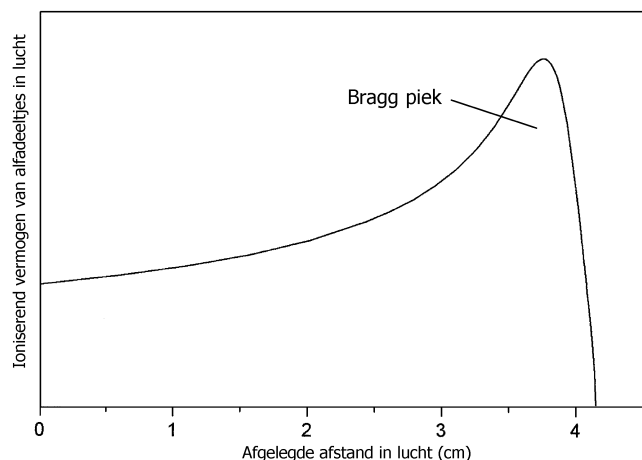
a.

Geladen deeltjes met een grote massa (alfadeeltjes en protonen) kunnen gemakkelijker ionisaties veroorzaken dan geladen deeltjes met een kleine massa (bètadeeltjes) bij gelijke bewegingsenergieën. Leg dat uit.

Geladen deeltjes (met name zware deeltjes zoals alfadeeltjes en protonen) kunnen het gemakkelijkst ionisaties teweeg brengen vlak voor het eind van hun baan. Zie bijvoorbeeld het diagram hiernaast waarin het ioniserend vermogen van alfadeeltjes in lucht is weergegeven als functie van de afgelegde afstand.

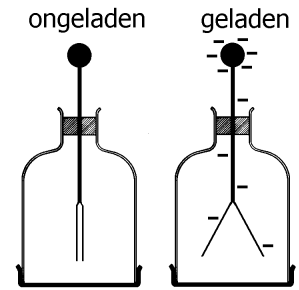
b.

Leg uit waarom dit zo is.



Opgave 10

Een elektroscoop bestaat uit een fles met een stop, waardoor een metalen staaf loopt. De stop is gemaakt van een isolator. Aan het ondereind van de staaf hangen twee dunne blaadjes bladtin. In ongeladen toestand hangen de blaadjes verticaal. Zie de linker figuur hiernaast. Als de metalen staaf elektrisch geladen wordt, stoten de blaadjes elkaar af waardoor ze uit elkaar gaan staan. Zie de rechter figuur hiernaast waarin de staaf negatief geladen is.

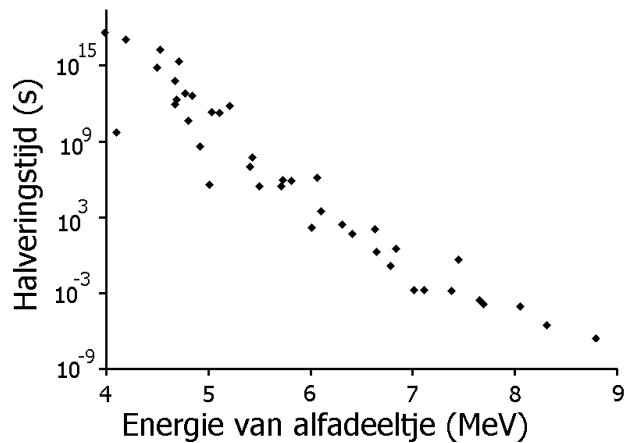


Leg nu uit waarom de uitslag van een geladen elektroscoop steeds kleiner wordt als je bij de kop van de elektroscoop een radioactieve bron houdt die alfa- of bètastraling uitzendt.

Opgave 11

De wet van Geiger-Nuttall heeft betrekking op isotopen die alfadeeltjes uitzenden. Volgens deze wet hebben de uitgezonden alfadeeltjes meer bewegingsenergie (kinetische energie) naarmate de isotoop een kleinere halveringstijd heeft. Zie het diagram hiernaast waarin elke stip een isotoop voorstelt.

Stel nu dat isotoop A een halveringstijd heeft van een uur en isotoop B een halveringstijd heeft van tien miljoen jaar. Geef dan twee redenen waarom het per ongeluk inslikken van isotoop A erger is dan het inslikken van even veel atomen van isotoop B. Geef ook aan welke reden belangrijker is.



§ 8 Dosis, equivalente en effectieve dosis

Het verschil tussen bestraling en besmetting

Er moet onderscheid gemaakt worden tussen radioactieve bestraling en radioactieve besmetting. In het eerste geval wordt je blootgesteld aan ioniserende straling waardoor cellen in je lichaam worden aangetast. Radioactieve bestraling kan dus gevaarlijk zijn, maar het gevaar is geweken zodra je de bron uitzet of opbergt. Als je de bron niet direct kunt uitzetten of opbergen, kun je van de stralingsbron weglopen.

Een radioactieve besmetting wil zeggen dat je een radioactieve stof op of in je lichaam hebt gekregen en je daardoor zelf ioniserende straling gaat uitzenden. Als je het op je lichaam hebt, kun je het probleem oplossen door je goed te wassen, maar bij inname is dit niet mogelijk. Je kunt radioactief besmet worden door het eten van groenten waarop radioactieve deeltjes zitten, of door het inademen van radioactieve deeltjes als er een radioactieve wolk vrij is gekomen bij een kernramp.

Bij de ramp in de kerncentrale van Tsjernobyl in 1986 was er sprake van een krachtige explosie, waarbij radioactief materiaal tot hoog in de atmosfeer werd geslingerd. Het gevolg was dat de radioactieve deeltjes zich over grote afstanden verspreidden. Mensen werden vervolgens radioactief besmet door het eten van besmette groenten en fruit, contact met de grond en via inademing.

Stralingsdosis of kortweg dosis

Ioniserende straling kan schadelijk voor de gezondheid zijn. De biologische schade in een bepaald orgaan of weefsel van je lichaam hangt af van het aantal ionisaties dat de straling daar heeft veroorzaakt. Hoe meer ionisaties, des te groter de schade. Omdat er voor elke ionisatie een bepaalde hoeveelheid energie nodig is, is het belangrijk om te weten hoeveel stralingsenergie het orgaan heeft opgenomen.

Bij de gezondheidsrisico's speelt de massa van het bestraalde weefsel ook een rol. Een grote massa kan natuurlijk meer stralingsenergie opnemen dan een kleine massa. Vergelijk dit bijvoorbeeld met een lange dikke man en een kleine dunne man die allebei 30 glazen bier drinken. Terwijl de eerste man alleen met een dubbele tong gaat praten, moet de tweede met een acute alcoholvergiftiging in het ziekenhuis worden opgenomen.

Gelet op het bovenstaande wordt de grootte van de stralingsdosis of kortweg dosis als volgt gedefinieerd.

$$\text{dosis} = \frac{\text{geabsorbeerde stralingsenergie}}{\text{massa}}$$

De eenheid van dosis is gray, afgekort Gy. Omdat stralingsenergie in joule en massa in kilogram wordt uitgedrukt, is één gray gelijk aan één joule per kilogram.

Neem het volgende voorbeeld. Radon-222 is radioactief en vervalt onder uitzending van een alfadeeltje. Radon-222 ontsnapt voortdurend in kleine hoeveelheden als gas uit de aardbodem en uit bouwmaterialen. Mede daarom moet je de lucht in je huis regelmatig verversen. Stel nu het volgende geval. Een vrouw woont in een huis waarin weinig geventileerd wordt. De lucht bevat daardoor een verhoogde concentratie radon-222. In een jaar tijd absorberen de longen van de vrouw 0,094 millijoule aan stralingsenergie. Deze energie komt terecht in 0,11 kg longweefsel.

Voor de dosis geldt dan:

$$dosis = \frac{energie}{massa} = \frac{0,094 \text{ mJ}}{0,11 \text{ kg}} = 0,85 \text{ mGy} .$$

Equivalente dosis

De grootte dosis maakt geen onderscheid tussen de verschillende soorten straling (alfa-, bèta-, gamma- of röntgenstraling). Toch blijkt bijvoorbeeld dat alfastraling veel meer biologische schade in organen aanricht dan bètastraling of gammastraling. Daarom vermenigvuldigt men de dosis vaak met een weegfactor voor straling. De belangrijkste weegfactoren staan in de tabel hiernaast. Op deze manier krijgen we de equivalente dosis die een orgaan krijgt. Hiervoor geldt dus:

Soort straling	weegfactor
Alfa	20
Bèta	1
Gamma	1
Röntgen	1
Neutronen	5-20
Protonen	10

$$\text{equivalente dosis} = \left(\text{weegfactor voor straling} \right) \times \text{dosis}$$

De equivalente dosis drukken we uit in sievert, afgekort Sv.

In het bovenstaande voorbeeld krijgen de longen van de vrouw een dosis van 0,85 mGy. Omdat het hier om alfastraling gaat is de weegfactor 20. Dus is de equivalente dosis $20 \times 0,85 = 17 \text{ mSv}$.

Effectieve dosis

In het algemeen staan er meerdere organen of weefsels van iemand bloot aan straling. Om de totale stralingsbelasting van diegene te bepalen moeten de equivalente doses van alle bestraalde organen bij elkaar worden opgeteld. Maar omdat ionisaties in bijvoorbeeld voortplantingsorganen op langere termijn veel schadelijker zijn dan in spierweefsel, moet elke equivalente dosis eerst met een weegfactor voor weefsels worden vermenigvuldigd. Zie de tabel hiernaast. Op deze manier krijgen we de effectieve dosis.

Hiervoor geldt dus:

Orgaan	weegfactor
Geslachtsorganen	0,20
Borst	0,05
Lever	0,05
Blaas	0,05
Slok darm	0,05
Schildklier	0,05
Beenmerg	0,12
Dikke darm	0,12
Longen	0,12
Maag	0,12
Botoppervlak	0,01
Huid	0,01
Totaal overige organen	0,05
TOTAAL	1,00 +

effectieve dosis =

$$\underbrace{\left(\text{weegfactor voor orgaan} \right) \times \left(\text{equivalente dosis} \right)}_{\text{orgaan 1}} + \underbrace{\left(\text{weegfactor voor orgaan} \right) \times \left(\text{equivalente dosis} \right)}_{\text{orgaan 2}} + \dots$$

Net als de equivalente dosis wordt de effectieve dosis in sievert uitgedrukt.

In het bovenstaande voorbeeld ontvangen de longen van de vrouw gedurende een jaar een equivalente dosis van 17 mSv. Maar haar overige lichaam staat ook bloot aan ioniserende straling. Stel bijvoorbeeld dat zij borstkanker krijgt en dat één van haar borsten wordt bestraald met een equivalente dosis van 320 mSv. De effectieve dosis kan dan als volgt berekend worden.

Effectieve dosis = $(0,12 \times 17 \text{ mSv}) + (0,05 \times 320 \text{ mSv}) = 2 \text{ mSv} + 16 \text{ mSv} = 18 \text{ mSv}$.
Hierbij is 0,12 de weegfactor voor de longen en 0,05 die voor de borst.

Achtergrondstraling

In het dagelijks leven wordt iedereen blootgesteld aan ioniserende straling. Deze zogenoemde achtergrondstraling is onder andere afkomstig uit de ruimte (kosmische straling), van het verval van radioactieve stoffen in de bodem en in bouwmaterialen van huizen, en van de ingeademde lucht. De achtergrondstraling is niet overal op aarde gelijk. Op sommige plaatsen komen van nature meer radioactieve stoffen in de bodem voor, en is de achtergrondstraling een veelvoud van die op andere plaatsen. In Nederland is de effectieve dosis die een persoon ten gevolge van de achtergrondstraling oploopt ongeveer 0,2 microsievert per uur ($0,2 \mu\text{Sv/h}$).

Op grote hoogte is de ontvangen stralingsdosis aanzienlijk groter door de kleinere beschermende werking van de dampkring. Bijvoorbeeld bedraagt de stralingsdosis tijdens een vliegreis op 10 km hoogte ongeveer $4 \mu\text{Sv/h}$.

Veel mensen zullen in hun hele leven minder dan één sievert aan effectieve dosis ontvangen. Stel bijvoorbeeld dat je 80 jaar oud wordt. Je hebt je hele leven dan $0,14 \text{ Sv}$ aan achtergrondstraling opgelopen want $0,2 \mu\text{Sv/h} \times 24 \text{ h} \times 365 \times 80 = 0,14 \text{ Sv}$. Samen met de stralingsdosis van röntgenfoto's, CT-scans en vliegreizen zal dit meestal ruim onder 1 Sv blijven.

Stralingsziekte en kanker

Als je een flinke stralingsdosis in korte tijd (minder dan een uur) ontvangt, wordt je stralingsziek. Zoals hiervoor is uitgelegd, komt dit doordat chemische processen in je lichaam ontregeld worden. Bij een stralingsdosis van 1 sievert, toegediend aan het hele lichaam, word je misselijk en ga je overgeven. Een dosis van 2 of meer sievert leidt tot haaruitval. Na een dosis van 3 sievert aan het hele lichaam (preciezer gezegd: 3 sievert aan elke lichaamscel) gaat 50% van de mensen dood binnen een aantal weken.

Naast stralingsziekte is er de kans op kanker. De ioniserende straling beschadigt dan het DNA waardoor de celdeling onbeheersbaar wordt en waaruit vervolgens kanker ontstaat. Volgens de 'lineaire hypothese zonder drempel' is de kans op kanker evenredig met de stralingsdosis. Neem het volgende voorbeeld waarbij we ervan uitgaan dat 25 sievert één kankerpatiënt oplevert. Volgens de lineaire hypothese zonder drempel zou het niet uitmaken of deze 25 sievert aan 100 mensen of aan 1000 mensen of aan 10000 mensen wordt toegediend. Steeds zou (statistisch gezien) één persoon uit de groep hierdoor kanker krijgen.

Volgens de lineaire hypothese zonder drempel zou onder de bevolking in gebieden met een hoge achtergrondstraling (zoals Ramsar in Iran en Guarapari van Brazilië) meer kanker moeten voorkomen. Toch lijkt dat niet het geval te zijn. Hierdoor, en door andere redenen, wordt de lineaire hypothese zonder drempel niet door iedereen geaccepteerd. Met name bij lage doses zou de hypothese niet opgaan.

Opgaven bij § 8

Opgave 1

a.

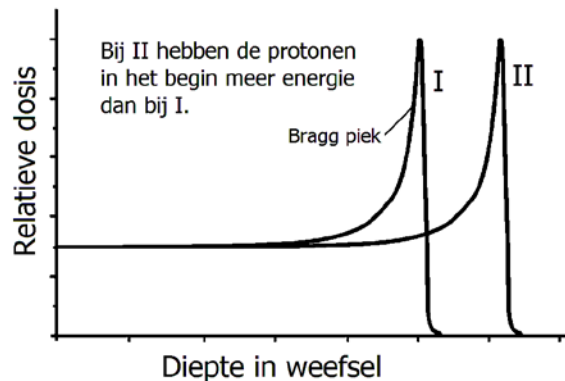
Leg het verschil uit tussen radioactieve bestraling en besmetting.

b.

Kun je van gammastraling besmet raken?

Opgave 2

Om een kankergezwel in een menselijk lichaam te behandelen, gebruiken doktoren vaak de protonentherapie. Wanneer snelle protonen weefsel binnendringen, dragen ze het grootste deel van hun bewegingsenergie aan het eind van hun baan over aan het weefsel. Zie de figuur hiernaast. De reden hiervan is dat de protonen dan al flink zijn afgeremd waardoor hun ioniserend vermogen is toegenomen. Als ze langs (of door) atomen of moleculen 'vliegen', hebben ze meer tijd om elektronen uit hun baan rond de atoomkern te trekken.



Leg uit waarom deze eigenschap van snelle protonen zo gunstig is bij het behandelen van een kankergezwel.

Opgave 3

Stel je de volgende situatie voor. Je werkt bij de geheime dienst van land X en je moet een tegenstander in land Y uitschakelen met behulp van een radioactieve isotoop. Deze isotoop kan in een reactorcentrum in land X gefabriceerd worden. De isotoop moet vervolgens naar land Y gesmokkeld worden om daar met het eten van de tegenstander vermengd te worden. Welke van de onderstaande isotopen komt dan het meest in aanmerking voor het plan? Licht je antwoord toe.

- Wolfram-185; bètastraler met een halveringstijd van 74 dagen.
- Thallium-209; bètastraler met een halveringstijd van 2,2 minuut.
- Lood-210; bètastraler met een halveringstijd van 22,3 jaar.
- Polonium-209, alfastraler met een halveringstijd van 200 jaar.
- Polonium-210; alfastraler met een halveringstijd van 138 dagen.
- Polonium-211; alfastraler met een halveringstijd van 0,5 seconde.

Opgave 4

In het ziekenhuis wordt er een foto van je longen gemaakt met behulp van röntgenstraling. Het bestraalde deel van je longen heeft een massa van 0,8 kg en absorbeert 4,0 mJ aan stralingsenergie. Bereken de equivalente dosis die de longen krijgen.

Opgave 5

Iemand wordt in het ziekenhuis bestraald waarbij de longen een equivalente dosis van 3 Sv ontvangen en de schildklier een equivalente dosis van 2 Sv. Bereken dan de effectieve dosis van de bestraling.

Opgave 6

Op grote hoogte boven de zeespiegel word je meer blootgesteld aan ioniserende straling dan op zeeniveau. Dit komt door de "kosmische straling". Zo is bekend dat je tijdens een vliegreis op 10 km hoogte een equivalente dosis van $5 \mu\text{Sv}$ (= 5 microsievvert = 5 miljoenste sievert) per uur oploopt. Voor mensen die veel vliegen kan dit een risico met zich meebrengen. Dit geldt in het bijzonder voor zwangere vrouwen.

Men wenst vrouwen tijdens hun zwangerschap aan niet meer dan 1 mSv (= 1 millisievert) bloot te stellen. Stel dat een zwangere vrouw zeer frequent tussen Amsterdam en Atlanta (USA) vliegt en dat zo'n vlucht (enkele reis) 8 uur duurt. Bereken dan hoeveel van zulke vliegreizen (enkele reis) ze mag maken.

Opgave 7

Een medewerker van de afdeling nucleaire geneeskunde van een ziekenhuis staat op 5 m afstand van een radioactieve bron. Hierdoor loopt zijn lichaam per uur een stralingsdosis op van 0,4 mGy.

a.

Leg uit dat hij blootstaat aan gammastraling en niet aan alfastraling of bètastraling.

Om de medewerker tegen straling te beschermen wordt een 10 mm dikke loden plaat voor de radioactieve bron geplaatst. De halveringsdikte van lood voor de betreffende gammastraling bedraagt 2,5 mm.

b.

Bereken de dosis die de medewerker in de nieuwe situatie per uur oploopt.

Neem aan dat alle organen van zijn lichaam door de straling een gelijke dosis ontvangen.

c.

Hoe groot is dan de effectieve dosis die de man per uur oploopt? Leg je antwoord uit.