

10 Kernfysica

havo

10.0 Inhoud

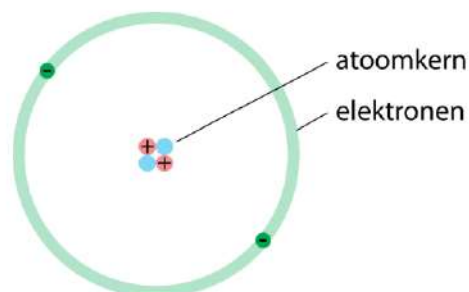
10.1	Het verval van atoomkernen	3
	– De atoomkern	3
	– Atoommassa	3
	– Isotopen	4
	– Spontaan verval van atoomkernen	5
	– Alfastraling	5
	– Bètastraling	6
	– Gammastraling	7
10.2	De snelheid van radioactief verval	8
	– Halveringstijd	8
	– Activiteit	10
	– De activiteit uit een (N, t)-diagram bepalen	12
	– Het aantal vervallen kernen uit een (A, t)-diagram bepalen	12
	– Relatie tussen de activiteit en het aantal kernen	13
	– Relatie tussen de activiteit en de halveringstijd	14
10.3	Ioniserende straling	15
	– Ioniserend vermogen en doordringend vermogen	15
	– Bestraling met α -deeltjes	16
	– Bestraling met β -deeltjes	16
	– Bestraling met γ -fotonen	16
	– De dracht van α -deeltjes en β -deeltjes	17
	– De halveringsdikte voor röntgenstraling en gammastraling	17
10.4	Detectie van straling	20
	– Stralingsbadge (dosimeter)	20
	– Geigerteller	20
10.5	Absorptie van straling door materie	22
	– Stralingsdosis	22
	– Equivalente dosis	22
	– Het vermogen van een stralingsbron	23
	– Effectieve totale lichaamsdosis	23
	– Radioactieve besmetting	25
	– Inwendige bestraling (Brachytherapie)	25
	– Nucleaire diagnostiek	26

10.6	Kernreacties	27
	– Spontane en gestimuleerde reacties	27
	– Behoud van massagetal en van elektrische lading	27
	– Het (massagetel, atoomnummer)-diagram	28
	– Vervalreeks	29
10.7	Samenvatting	30
	– Grootheden en eenheden	30
	– Weten	30
	– Formules	31
	– Figuren	32

10.1 Het verval van atoomkernen

De atoomkern

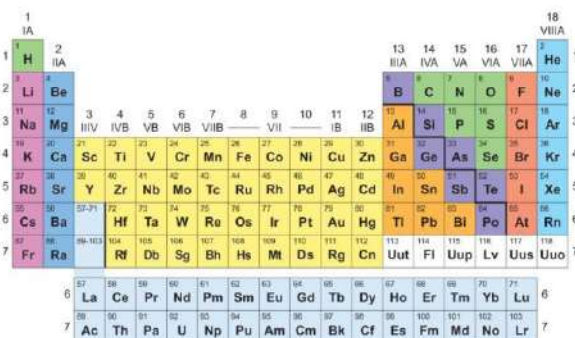
Een atoom bestaat uit een kern met daaromheen elektronen. Als je een atoomkern voorstelt als een tennisbal, dan zijn de elektronen zandkorreltjes op 5 km afstand. Een atoom bestaat dus vooral uit lege ruimte met vrijwel de hele atoommassa in de kern. De atoomkern heeft een diameter van ongeveer 10^{-15} m en bevat twee soorten deeltjes, **protonen** en **neutronen**. Dit zijn de **kerndeeltjes**, ook wel **nucleonen** genoemd.



Figuur 1 De bouw van een atoom.

Protonen hebben een positieve lading van één elementaire ladingseenheid. Op een afstand van ongeveer 10^{-10} m van de kern bevinden zich elektronen, die een negatieve lading van één elementaire ladingseenheid hebben. De lading van een elektron is dus gelijk maar tegengesteld aan die van het proton. Neutronen hebben geen lading, wat de naam van dit deeltje verklaart. Een atoom is elektrisch neutraal, omdat het aantal elektronen om de kern gelijk is aan het aantal protonen in de kern.

Het **atoomnummer** is het aantal protonen in de atoomkern. Het **periodiek systeem** is een rangschikking van de atomen met oplopend atoomnummer. Dit worden de **elementen** genoemd. Er zijn ruim honderd verschillende elementen met elk zijn eigen **symbool**. De structuur van het periodieke systeem wordt bepaald door de wijze waarop de elektronen zijn verdeeld in schillen om de atoomkern.



Figuur 2 Periodiek systeem der elementen.

Atoommassa

De massa van een atoom is de som van de massa's van de protonen, de neutronen en de elektronen. De massa's van een proton en van een neutron zijn vrijwel aan elkaar gelijk. De massa van een elektron is 1836 keer kleiner dan de massa van een proton of neutron en mag daarom vaak worden verwaarloosd. Massa wordt meestal uitgedrukt in kilogram. Maar omdat een atoom erg weinig massa heeft is de kilogram geen handige eenheid voor atomen. Er is daarom afgesproken om een twaalfde deel van de massa van een koolstof-atoom, bestaande uit 6 protonen 6 neutronen en 6 elektronen, als **atomaire massa eenheid** te gebruiken met als symbool u. Het proton en het neutron hebben een massa van ongeveer 1 u.

$$1\text{u} = 1,6605389 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Figuur 3 geeft aan hoe je een atoomkern noteert. Je noteert het **symbool**, en aan de linkerkant het atoomnummer en het massagetal. Het **massaget** (**A**) is het aantal **protonen (Z)** plus het aantal **neutronen (N)** in de kern. Er geldt: $A = Z + N$.



Figuur 3 Notatie van een atoomkern.

Omdat de naam van het element al informatie geeft over het atoomnummer wordt de volgende notatie soms ook gebruikt: ${}^4_2\text{He} \leftrightarrow {}^4\text{He} \leftrightarrow \text{He}-4$. Dezelfde notatie gebruiken we ook voor het **proton** ${}^1_1\text{p}$, het **neutron** ${}^1_0\text{n}$, het **elektron** ${}^0_{-1}\text{e}$ en het **positron** ${}^0_{+1}\text{e}$.

Isotopen

Atomen van hetzelfde element hebben altijd evenveel protonen in de kern, maar hebben niet allemaal evenveel neutronen. Een koolstofatoom met atoomnummer 6 heeft meestal 6 neutronen en dus een massagetal $A = 12$. Dit koolstofatoom wordt aangegeven met ${}^{12}\text{C}$. Maar er zijn ook koolstofatomen die acht neutronen in de kern hebben. Deze atomen hebben een massagetal $A = 14$ en geven we aan met ${}^{14}\text{C}$. Een element komt voor in verschillende **isotopen**. De isotopen van een element hebben hetzelfde aantal protonen maar een verschillend aantal neutronen. De isotopen hebben dezelfde scheikundige eigenschappen en verschillen alleen in het aantal neutronen in hun kern.

De isotopen van een element hebben evenveel protonen maar een verschillend aantal neutronen in de kern.

Er zijn ongeveer honderd verschillende elementen en de meeste van hen hebben een aantal isotopen. De bekendste isotopen zijn te vinden in Binas, maar dat zijn ze lang niet allemaal. In de tabel hieronder zie je informatie over koolstof zoals in Binas is te vinden.

atoom-nummer	symbool	massa-getal	atoommassa (u)	voorkomen (%)	halverings-tijd (s/min/h/d/y)	soort verval en energie (MeV)
6	C	10	10,016853	---	19,2 sec	β^+ 2,2
		11	11,011433	---	20,4 min	β^+ 0,95 K-vangst
		12	12,000000	98,93	---	---
		13	13,003354	1,07	---	---
		14	14,003242	---	5730 jaar	β^- 0,156

Gaan we van links naar rechts door de tabel dan vinden we:

- het atoomnummer
- het symbool van het atoom
- het massagetal
- de werkelijke massa van het atoom (kern + elektronen) uitgedrukt in u
- het percentage waarmee de isotoop op aarde voorkomt
- hoe stabiel een isotoop is uitgedrukt in de halveringstijd

- het soort straling α , β of γ dat vrijkomt bij het uiteenvallen van de isotoop
- de energie waarmee het uitgezonden α -, β - of γ -deeltje de kern verlaat in MeV

Normaal gebruik je de joule als eenheid van energie, maar voor kernreacties is dit onhandig, omdat de energie die een atoom kan opnemen of afstaan veel kleiner is dan één joule. Vandaar dat we liever met een kleinere energie-eenheid werken, de elektronvolt (eV) of de mega-elektronvolt (MeV).

$$1\text{eV} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J} \quad | \quad 1\text{MeV} = 1,60218 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

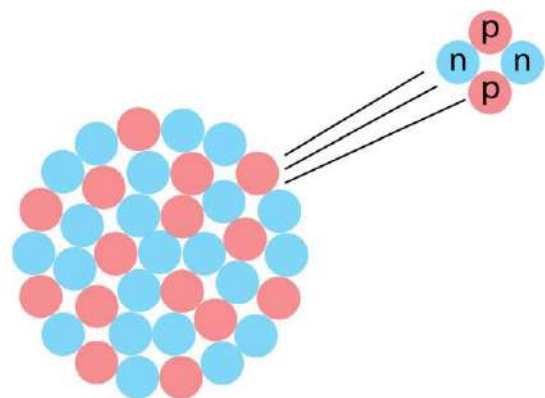
Spontaan verval van atoomkernen

Vanwege hun positieve lading stoten protonen elkaar af en om ze bij elkaar te houden zijn neutronen nodig. Bij te weinig neutronen wordt de afstotende kracht tussen de protonen onvoldoende tegengewerkt en vervalst de kern. Ook een teveel aan neutronen zorgt ervoor dat de kern vervalst. De isotopen ^{10}C , ^{11}C hebben te weinig neutronen en ^{14}C heeft te veel neutronen, alleen bij ^{12}C en ^{13}C is het aantal protonen (6 of 7) goed. Vandaar dat alleen ^{12}C en ^{13}C op aarde voorkomt, de andere koolstofisotopen vervallen. Bij dit verval stoot de kern een deeltje uit. Het spontaan vervallen van een atoomkern heet **radioactief verval** en kan op drie manieren gebeuren waarbij **alfa- (α)**, **bèta- (β)**, of **gamma (γ) straling** vrijkomt.

Bij het verval van atoomkernen blijven de elektrische lading en het massagetal behouden maar verandert de samenstelling van de kern. Dit noem je een **kernreactie**. Bij chemische reacties verandert de atoomkern niet. Het is daarom onmogelijk om met een chemische reactie een element te veranderen in een ander element. Met een scheikundige reactie kun je nooit lood veranderen in goud, maar met een kernreactie kan dit wel.

Alfastraling

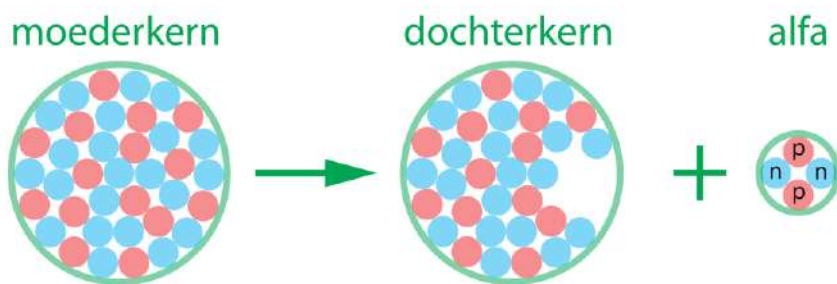
Alfastraling ontstaat als een kern zoveel protonen bevat dat hij niet bij elkaar te houden is door neutronen. De kern moet worden verkleind en dat gebeurt door het uitstoten van een alfadeeltje. Dit is een deeltje met twee protonen en twee neutronen en is dus een **^4He kern**. Elementen die α -straling uitzenden worden α -stralers genoemd. Vrijwel alle kernen met meer dan 82 protonen zijn alfastralers.



Figuur 4 Een α -deeltje wordt uitgestoten.

Bij het uitzenden van een α -deeltje verdwijnen er 2 protonen en 2 neutronen uit de kern. Als een $^{238}_{92}\text{U}$ kern een α -deeltje verliest blijven er in de resterende kern 90 protonen en 144 neutronen over. De nieuwe atoomkern is het **vervalproduct** en is niet langer een urani-umkern maar een thoriumkern. De oorspronkelijke kern wordt ook wel de **moederkern** genoemd en het vervalproduct de **dochterkern**.

Figuur 5 α -verval. Een kern stoot een α -deeltje uit. Een α -deeltje bestaat uit 2 protonen en 2 neutronen en is gelijk aan een heliumkern.



Het α -verval van uranium-238 noteer je als volgt: ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^4_2\alpha + {}^{234}_{90}\text{Th}$

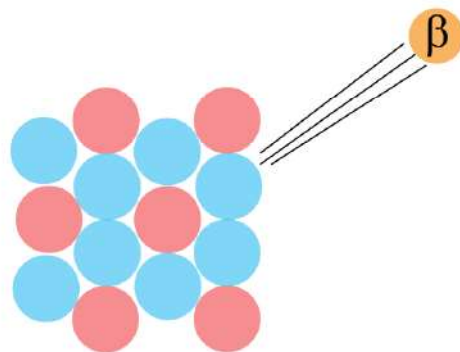
In deze **kernreactie** zijn het massagetal en het aantal protonen van alle deeltjes samen, voor en na de pijl hetzelfde. Dit is eenvoudig te controleren.

- linksboven: $238 = 4 + 234$ (massagetal is behouden)
- linksonder: $92 = 2 + 90$ (lading is behouden)

Bij het uitzenden van een α -deeltje raakt de kern niet alleen protonen en neutronen kwijt maar ook energie. Dit verlies aan energie wordt aan het α -deeltje meegegeven in de vorm van kinetische energie.

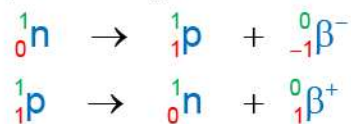
Bètastraling

Bètastraling ontstaat als de balans tussen het aantal protonen en het aantal neutronen niet in orde is. Zijn er te veel neutronen, dan verandert een neutron in een proton door het uitzenden van een β^- -deeltje. Dit is een **elektron**. Zijn er te weinig neutronen, dan verandert een proton in een neutron door het uitzenden van een β^+ -deeltje. Dit is een **positron**, een positief geladen elektron.



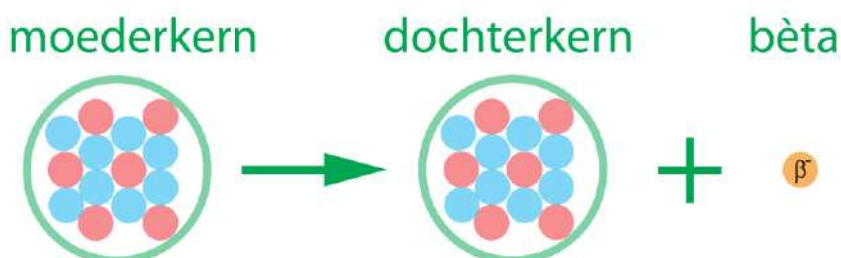
Figuur 6 Een β -deeltje wordt uitgestoten.

Bij β^- -straling wordt een neutron omgezet in een proton en bij β^+ -straling wordt een proton omgezet in een neutron. In beide gevallen verandert het massagetal niet.

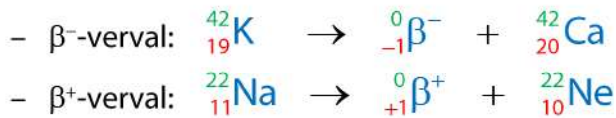


In figuur 7 zie je het β^- -verval van koolstof-14: ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^0_{-1}\beta^- + {}^{14}_7\text{N}$. Een neutron verandert in een proton, waardoor de koolstofkern verandert in een stikstofkern.

Figuur 7 β^- -verval van C-14.
rood = proton
blauw = neutron
oranje = elektron

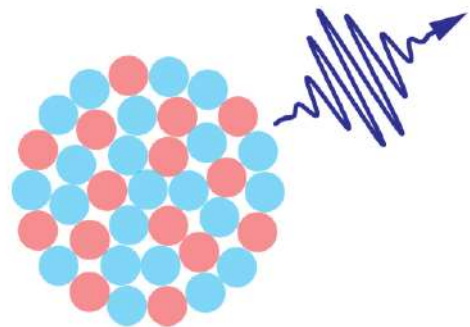


Bij het uitzenden van een β^- -deeltje verdwijnt er nauwelijks massa maar wel negatieve lading uit de kern. Bij het uitzenden van een β^+ -deeltje verdwijnt er positieve lading uit de kern. Behalve een β^- -deeltje of een β^+ -deeltje wordt er ook een **(anti-) neutrino ν** uitgezonden. Een neutrino is een mini-neutron dat lijkt op een ongeladen elektron. Over neutrino's gaan we het in dit hoofdstuk verder niet hebben. Elementen die β^- of β^+ -straling uitzenden worden β -stralers genoemd. Bekende voorbeelden zijn de β^- -straler kalium-42 en natrium-22.



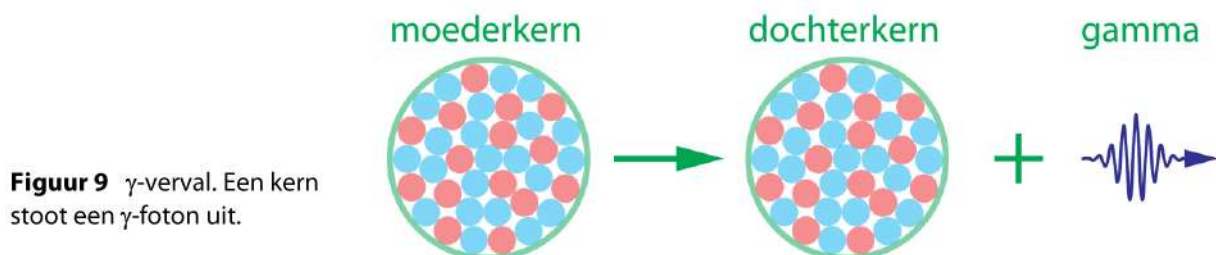
Gammastraling

Gammastraling ontstaat als de kern teveel energie heeft. De kern bevindt zich dan in een **aangeslagen toestand** en door energie uit te zenden in de vorm van een gammadeeltje komt hij in de **grondtoestand**. Een gamma-deeltje is een **foton** en is dus elektromagnetische straling. De energie van een gamma-foton is ongeveer een miljoen keer groter dan de energie van zichtbaar licht.



Figuur 8 Een γ -foton wordt uitgestoten waarbij de kern energie verliest.

Bij het alfa- en bètaverval is het vervalproduct vaak een atoomkern in een aangeslagen toestand. Deze toestand leeft meestal kort en door het uitzenden van gammafotonen bereikt de kern zijn grondtoestand. Soms gebeurt dit in enkele stappen. Bij sommige isotopen heeft de aangeslagen toestand een lange levensduur. Dit wordt een **metastabiele toestand** genoemd. Bij Barium-137 heeft de aangeslagen toestand een levensduur van 2,6 minuten. Bij Technium-99 zelfs 6,0 uur. Om de metastabiele toestand aan te geven wordt een m geschreven achter het massagetal, dus ${}^{137m}_{56}\text{Ba}$ of Ba-137m en ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$ of Tc-99m. Een metastabiel isotoop wordt ook wel **nucleair isomeer** genoemd, omdat zowel het atoomnummer als het massagetal gelijk zijn aan het isotoop in de grondtoestand.



Figuur 9 γ -verval. Een kern stoot een γ -foton uit.

10.2 De snelheid van radioactief verval

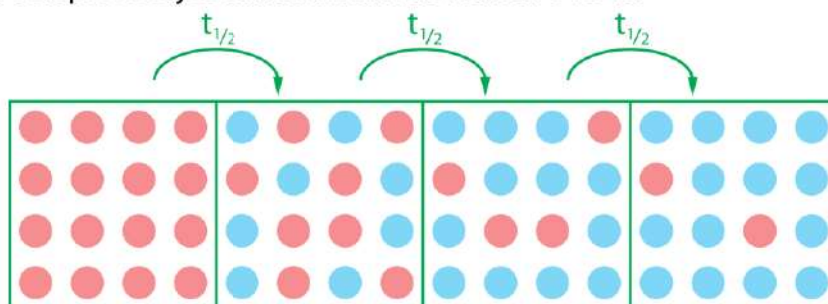
Halveringstijd

Het aantal kernen dat per seconde vervalt is recht evenredig met het aantal aanwezige kernen. Hieruit volgt dat als de helft van het aantal kernen in een bepaalde tijd vervalt na twee keer deze tijd driekwart is vervallen en na drie keer deze tijd zeven achtste. De tijd waarin de helft van de kernen vervalt heet de **halveringstijd** $t_{1/2}$. De grootte van de $t_{1/2}$ zegt niets over hoe lang een individuele kern blijft bestaan, dat kan veel korter zijn of veel langer dan $t_{1/2}$. Over de toekomst van een individuele kern valt niets te zeggen, maar als er een groot aantal instabiele kernen zijn weet je zeker dat na de halveringstijd de helft van deze kernen is vervallen.

De halveringstijd $t_{1/2}$ is de tijd waarin de helft van de kernen vervalt.

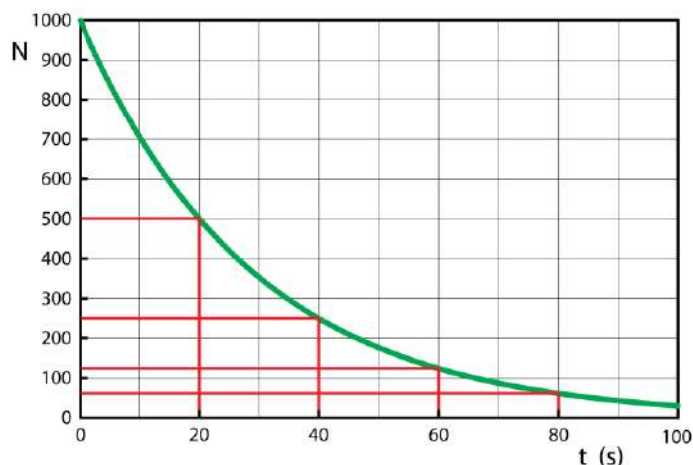
$$1N_0 \xrightarrow{1 \cdot t_{1/2}} \frac{1}{2}N_0 \xrightarrow{2 \cdot t_{1/2}} \frac{1}{4}N_0 \xrightarrow{3 \cdot t_{1/2}} \frac{1}{8}N_0 \xrightarrow{4 \cdot t_{1/2}} \frac{1}{16}N_0 \xrightarrow{5 \cdot t_{1/2}} \frac{1}{32}N_0$$

In figuur 10 is dit proces uitgebeeld. De instabiele kernen zijn in rood aangegeven. Als een instabiele kern vervalt ontstaat er een stabiele blauwe kern. Na opnieuw de halveringstijd is de helft van de overgebleven kernen vervallen, zodat na twee keer de halveringstijd er nog maar een kwart van het oorspronkelijke aantal instabiele kernen over is.



Figuur 10 Radioactief verval. Bij het verval verandert een instabiele kern (rood) in een stabiele kern (blauw).

We kunnen van dit vervalproces een diagram maken. Op de verticale as staat het aantal aanwezige kernen en op de horizontale as de tijd. In figuur 11 is het verval weergegeven. De halveringstijd is 20 seconden. Op $t = 0$ zijn er 1000 instabiele kernen aanwezig. Na 20 seconden is de helft vervallen en zijn er nog 500 over. Na weer 20 seconden is opnieuw de helft vervallen, zodat er nog 250 over zijn. Na de volgende 20 seconden zijn er nog 125 over, enzovoort.



Figuur 11 (N, t)-diagram van radioactief verval.

Voor radioactief verval geldt:

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

- N is het aantal aanwezige instabiele kernen na n keer de halveringstijd
- N_0 is het aantal aanwezige instabiele kernen op $t = 0$
- n is het aantal halvingen, $n = t / t_{1/2}$ t en $t_{1/2}$ in dezelfde eenheid
- t is de tijd in dezelfde eenheid als $t_{1/2}$
- $t_{1/2}$ is de halveringstijd in seconden, minuten, uren of jaren

Voor t en $t_{1/2}$ moet dezelfde eenheid worden gebruikt.

VOORBEELD β^- -verval van jood-131

De halveringstijd van jood-131 (I-131) is 8,0 dagen. Op $t=0$ zijn er $1,0 \cdot 10^{15}$ I-131 kernen.

Bereken hoeveel I-131 kernen na 32 dagen zijn vervallen.

- $32 = 4 \cdot 8 \rightarrow$ het aantal aanwezige kernen is 4 keer gehalveerd
- $\left(\frac{1}{2}\right)^4 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{16}$
- na 32 dagen is nog $1/16$ deel van de kernen aanwezig
- $\frac{1,0 \cdot 10^{15}}{16} = 6,25 \cdot 10^{13}$ kernen zijn aanwezig
- $1,0 \cdot 10^{15} - 6,25 \cdot 10^{13} = 9,375 \cdot 10^{14} = 9,4 \cdot 10^{14}$ kernen zijn vervallen

VOORBEELD α -verval van plutonium-241

De halveringstijd van plutonium-241 (Pu-241) is 14 jaar. Op $t=0$ zijn er $1,0 \cdot 10^{15}$ Pu-241 kernen.

Bereken op welk tijdstip er $1,25 \cdot 10^{14}$ Pu-241 kernen zijn.

- $\frac{1,0 \cdot 10^{15}}{1,25 \cdot 10^{14}} = 8$
- op $t = 0$ zijn er 8 keer meer kernen
- $\left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{8}$
- het aantal kernen is 3 keer gehalveerd
- dit kost 3 keer de halveringstijd
- 3 keer $t_{1/2} \rightarrow 3 \cdot 14 = 42$ jaar

Activiteit

Bij radioactief verval worden instabiele kernen omgezet in andere atoomkernen. De **activiteit** geeft aan hoe snel dit gebeurt. Een grote activiteit betekent dat er per seconde veel instabiele kernen vervallen en dat er dus veel radioactieve straling is.

De activiteit A is het aantal kernen dat per seconde vervalst.
De eenheid van activiteit is de becquerel (Bq). 1 Bq is 1 kern per seconde.

Bij radioactief verval komt er per reactie één α -, β - of γ -deeltje vrij. Als het ontstane deeltje (de dochterkern) ook instabiel is volgt een nieuwe reactie, waarbij opnieuw één α -, β - of γ -deeltje vrijkomt. De activiteit is daarom gelijk aan het aantal α -, β - of γ -deeltjes dat per seconde wordt uitgezonden.

De activiteit A is het aantal α -, β - of γ -deeltjes dat per seconde wordt uitgezonden.

De **gemiddelde activiteit** geeft aan hoeveel atoomkernen er gemiddeld per seconde vervallen.

$$A_{\text{gem}} = - \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

- A_{gem} is de gemiddelde activiteit in becquerel (Bq) **kernen per seconde**
- ΔN is de verandering van het aantal kernen
- Δt is de tijd waarin deze verandering gebeurt in seconde (s)

Het aantal aanwezige instabiele kernen neemt exponentieel af in de tijd. ΔN is dus altijd een negatief getal. Het minteken in de formules voor A_{gem} zorgt ervoor dat de activiteit altijd een **positief getal** is. Je kunt ook de **activiteit op één tijdstip** bepalen. Je moet dan op dit tijdstip een raaklijn tekenen aan de (N, t) -grafiek en daarvan de richtingscoëfficiënt berekenen. Voor **de activiteit op één tijdstip** geldt:

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

LET OP de tijd Δt moet in seconde!

Doordat het aantal kernen afneemt zal ook het aantal kernen dat per seconde vervalst afnemen. Zowel het aantal kernen als de activiteit nemen exponentieel af in de tijd. Weet je de activiteit op $t = 0$ dan kun je met de volgende formule de activiteit voor ieder tijdstip uitrekenen.

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

- A is de activiteit na n keer de halveringstijd
- A_0 is de activiteit op $t = 0$
- n is het aantal halveringen, $n = t / t_{1/2}$ t en $t_{1/2}$ in dezelfde eenheid
- t is de tijd in dezelfde eenheid als $t_{1/2}$
- $t_{1/2}$ is de halveringstijd in seconden, minuten, uren of jaren

Zoals je kunt zien lijkt de formule voor de activiteit op de formule voor het aantal kernen. Je kunt er daarom op dezelfde manier mee werken.

VOORBEELD De activiteit van het β^- -verval van ijzer-59

Het Fe-59 isotoop heeft een halveringstijd van 45 dagen. Op $t=0$ is de activiteit 1000 Bq.

Bereken de activiteit na 270 dagen.

- $n = \frac{270}{45} = 6$
- de activiteit wordt 6 keer gehalveerd
- $\left(\frac{1}{2}\right)^6 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{64}$
- $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \rightarrow A = 1000 \cdot \frac{1}{64} = 15,6 \text{ Bq}$

VOORBEELD β^- -verval van fosfor-33

Fosfor-33 vervalst door het uitstoten van β^- -deeltjes. De halveringstijd van P-33 verval is 25,3 dagen. Op $t=0$ is de activiteit $1,9 \cdot 10^8 \text{ Bq}$.

Bereken het aantal kernen dat in één dag na $t=0$ vervalst.

- $t_{1/2} = 25,3 \text{ d} \mid A_0 = 1,9 \cdot 10^8 \text{ Bq} \mid \Delta t = 60 \cdot 60 \cdot 24 = 86400 \mid \Delta N = \dots \text{ kernen}$
- in één dag verandert de activiteit nauwelijks $\rightarrow$ gebruik $A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$
- $1,9 \cdot 10^8 = -\frac{\Delta N}{86400} \rightarrow \Delta N = -1,6416 \cdot 10^{13}$
- in één dag vervallen er $1,64 \cdot 10^{13}$ kernen

Bereken de activiteit na 253 dagen

- $A_0 = 1,9 \cdot 10^8 \text{ Bq} \mid t_{1/2} = 25,3 \text{ d} \mid t = 253 \text{ d} \mid A = \dots \text{ Bq}$
- $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \rightarrow A = 1,9 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{253}{25,3}} = 1,85547 \cdot 10^5 = 1,9 \cdot 10^5 \text{ Bq}$

De activiteit uit een (N, t)-diagram bepalen

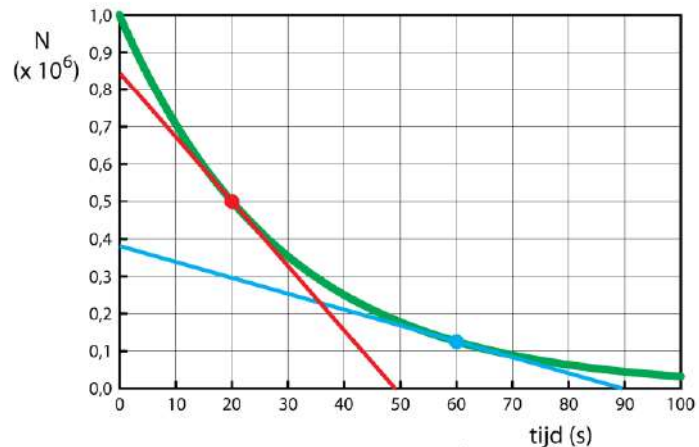
Stel er zijn instabiele kernen met een halveringstijd van 20 seconden. In figuur 12 is het (N, t)-diagram gegeven. De activiteit bepaal je door een raaklijn te tekenen en daarvan de richtingscoëfficiënt $\Delta N / \Delta t$ te bepalen. Maak de raaklijn zo lang dat hij zowel door de horizontale als door de verticale as gaat. ΔN is de afname van het aantal instabiele kernen en Δt is de tijd die hiervoor nodig is. In dit geval vinden we:

- Activiteit op $t = 20$ s:

$$A = -\frac{0 - 0,84 \cdot 10^6}{49} = 1,7 \cdot 10^4 \text{ Bq}$$

- Activiteit op $t = 60$ s:

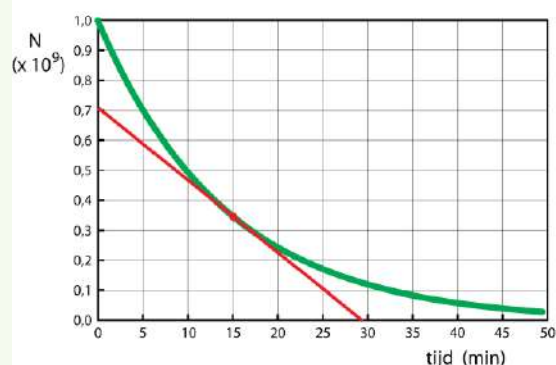
$$A = -\frac{0 - 0,38 \cdot 10^6}{89} = 4,3 \cdot 10^3 \text{ Bq}$$



Figuur 12 Raaklijn aan (N, t)-grafiek.

VOORBEELD Bepaal de activiteit van het β^+ -verval van N-13

Figuur 13 is het (N, t)-diagram van het verval van N-13 isotoop. Op $t=0$ zijn er $1,0 \cdot 10^9$ N-13 kernen. Het N-13 isotoop heeft een halveringstijd van 10 minuten.



Figuur 13

Bepaal de activiteit op $t = 15$ minuten met de raaklijnmethode.

- teken de raaklijn aan de (N, t)-grafiek op $t = 15$ minuten
- bereken de steilheid van de raaklijn en vermenigvuldig dit met -1
- richtingscoëfficiënt: $\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{0 - 0,70 \cdot 10^9}{29} = -2,414 \cdot 10^7$ kernen per minuut
- per seconde vervallen er $\frac{2,414 \cdot 10^7}{60} = 4,0 \cdot 10^5$ kernen $\rightarrow A = 4,0 \cdot 10^5 \text{ Bq}$

Het aantal vervallen kernen uit een (A, t)-diagram bepalen

Uit een (A, t)-diagram kun je het aantal vervallen kernen op tijdstip t bepalen door het oppervlakte onder de grafiek te bepalen.

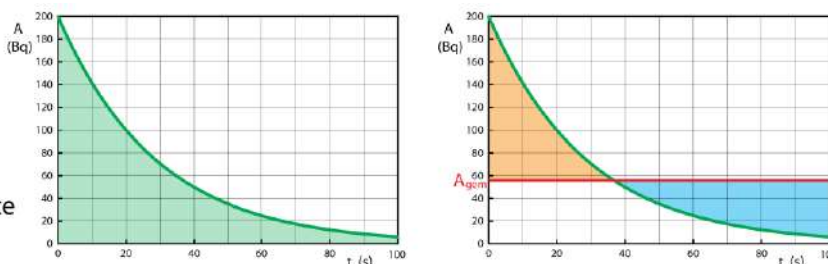
Tel het aantal hokjes onder de (A, t)-grafiek en vermenigvuldig dit met het aantal kernen per hokje.

OOK GOED Schat A_{gem} en gebruik $A_{\text{gem}} = -(\Delta N / \Delta t)$

In figuur 14 correspondeert één hokje met $10 \cdot 20 = 200$ vervallen kernen.

- Tel 28 hokjes $\rightarrow \Delta N = 28 \cdot 200 = -5600$ kernen $\rightarrow 5600$ kernen vervallen
- Schat $A_{\text{gem}} = 56$ Bq $\rightarrow \Delta N = 56 \cdot 100 = -5600$ kernen $\rightarrow 5600$ kernen vervallen

Figuur 14 Het aantal vervallen kernen is gelijk aan de oppervlakte onder de (A, t)-grafiek.



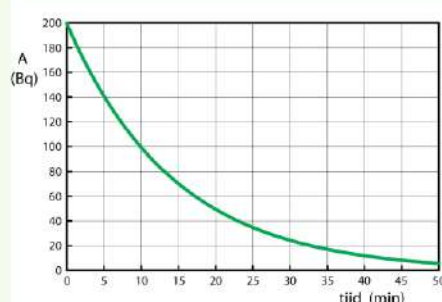
VOORBEELD Bepaal het aantal vervallen N-13 kernen uit het (A, t)-diagram

Figuur 15 is (A, t)-diagram van het β^+ - verval van N-13.

Bepaal het aantal vervallen N-13 kernen in 30 minuten.

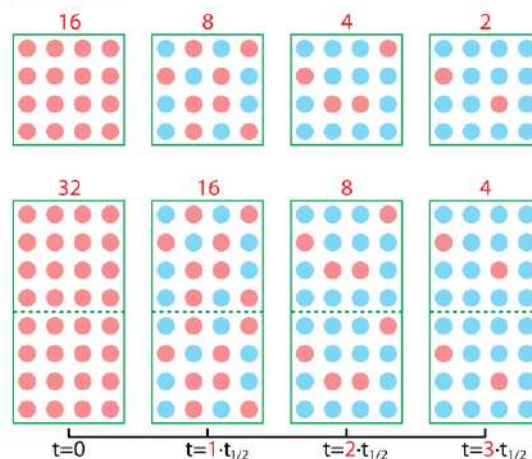
- hokjes tellen onder de (A, t)-grafiek $\rightarrow 25$ hokjes
- één hokje zijn $20 \cdot 5 \cdot 60 = 6000$ kernen
- $\Delta N = 25 \cdot 6000 = 1,5 \cdot 10^5$ kernen zijn vervallen

Figuur 15



Relatie tussen de activiteit en het aantal kernen

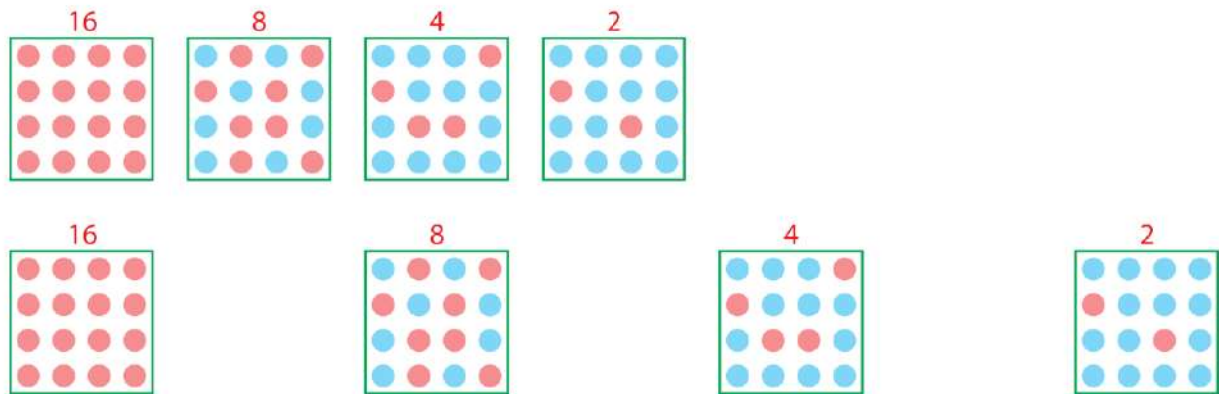
Het aantal radioactieve kernen dat per seconde vervalft (de activiteit) is afhankelijk van het aantal aanwezige kernen. Want als er veel kernen zijn zullen er per seconde ook veel vervallen. Hoe de activiteit samenhangt met het aantal aanwezige kernen zie je in figuur 16. Bovenaan zijn er in het begin 16 kernen. Na $1 \cdot t_{1/2}$ zijn er 8 kernen, na $2 \cdot t_{1/2}$ zijn er 4 kernen en na $3 \cdot t_{1/2}$ zijn er 2 kernen. Onderaan zijn er in het begin twee keer zoveel kernen. En je ziet dat er dan ook steeds twee keer zoveel vervallen. Hieruit mag je concluderen dat de activiteit **recht evenredig** is met het aantal aanwezige radioactieve kernen.



Figuur 16 Activiteit en aantal kernen.

Relatie tussen de activiteit en de halveringstijd

Behalve het aantal aanwezige kernen wordt de activiteit ook bepaald door de halveringstijd. Dit zie je in figuur 17. De halveringstijd onderaan is twee keer zo groot als die bovenaan. Daardoor duurt het vervallen steeds twee keer zo lang, waardoor de activiteit twee keer zo klein wordt. Hieruit mag je concluderen dat de activiteit **omgekeerd evenredig** is met de halveringstijd.



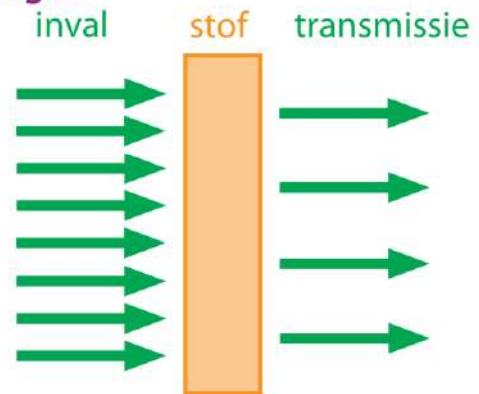
Figuur 17 Activiteit en halveringstijd.

De activiteit is recht evenredig met het aantal aanwezige radioactieve kernen en omgekeerd evenredig met de halveringstijd.

10.3 Ioniserende straling

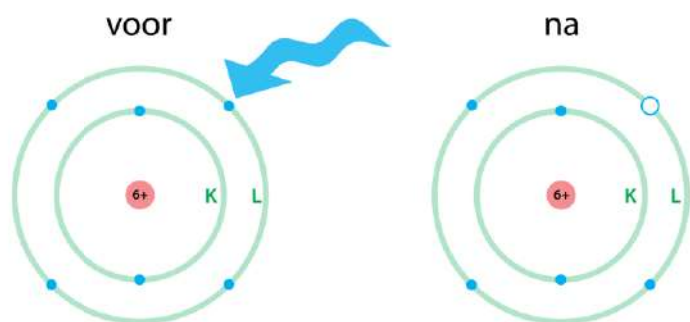
Ioniserend vermogen en doordringend vermogen

Bestraal je een stof met α -, β - of γ -deeltjes, dan botsen de stralingsdeeltjes tegen de kernen en tegen de elektronen van de stof. Stralingsenergie wordt hierbij overgedragen. Als het voorwerp dik genoeg is worden alle stralingsdeeltjes door de stof opgenomen. Bij een dun voorwerp wordt een deel opgenomen en gaat de rest er doorheen. Zie figuur 18.



Figuur 18 Een stof wordt bestraald met α -, β - of γ -straling.

Het overdragen van energie gebeurt als volgt. Een atoom heeft een kleine kern met daaromheen een elektronenwolk. Radioactieve straling heeft voornamelijk interactie met de elektronenwolk. De stralingsenergie wordt overgedragen op de elektronen, die hierbij op grotere afstand van de kern komen. Is er voldoende energie, dan kan het elektron losraken van de kern. Er ontstaat dan een positief geladen atoom, een **ion**. Het proces waarbij een elektron van het atoom wordt verwijderd heet **ioniseren**. Straling waarvan de deeltjes voldoende energie hebben om een atoom te ioniseren heet **ioniserende straling**. Zie figuur 19.

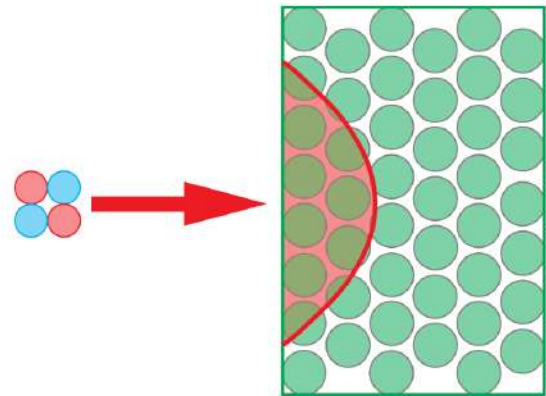


Figuur 19 Door ioniserende straling wordt een elektron losgemaakt van de kern. Het atoom wordt dan een positief geladen ion.

Bij α -, β -, γ -, en röntgenstraling hebben de stralingsdeeltjes genoeg energie om een atoom te ioniseren. De energie van α - en β -deeltjes is gelijk aan de kinetische energie $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. Hoe groter de massa en hoe groter de snelheid is, hoe meer kinetische energie het deeltje heeft. De snelheid waarmee een α -deeltje uit een radioactieve kern wordt weggeschoten is 5 – 10% van de lichtsnelheid. Een β -deeltje (een elektron) wordt met een snelheid van 30 – 99% van de lichtsnelheid weggeschoten. Hoewel β -deeltjes een hogere snelheid hebben dan α -deeltjes hebben α -deeltjes toch meer energie, omdat een α -deeltje ruim 7000 keer zwaarder is dan een β -deeltje. Het ioniserend vermogen van een α -deeltje is daarom verreweg het grootst. De energie van een γ -deeltje (een foton) wordt niet gegeven door de massa of de snelheid, maar door de frequentie. Vergeleken met zichtbaar licht, heeft een γ -foton een miljoen keer meer energie.

Bestraling met α -deeltjes

Omdat α -straling uit zware deeltjes (twee protonen + twee neutronen) bestaat die een 2+ elektrische lading hebben, is de kans dat ze botsen met atomen in een stof groot. Wordt een bundel α -deeltjes op een stof geschoten, dan zullen de α -deeltjes vaak botsen. Bij iedere botsing verliezen ze energie en worden er een aantal atomen geïoniseerd. Omdat het α -deeltje snel al zijn energie verliest kan het niet ver in de stof binnendringen. Het doordringend vermogen is daarom klein. Zie figuur 20.

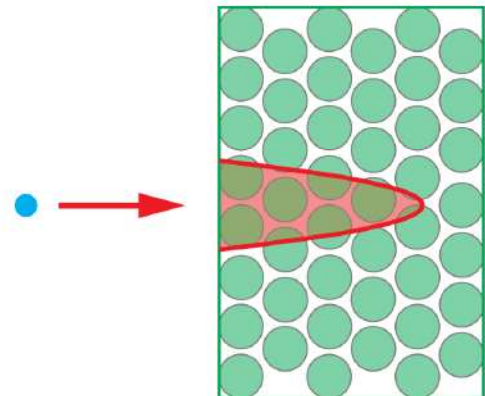


Figuur 20 Bestraling met α -deeltjes.

De afstand die een α -deeltje aflegt in een stof is de **dracht**. De dracht van een α -deeltje in lucht is ongeveer 3 – 10 cm. In een vaste stof is de dracht van α -deeltjes minder dan een millimeter.

Bestraling met β -deeltjes

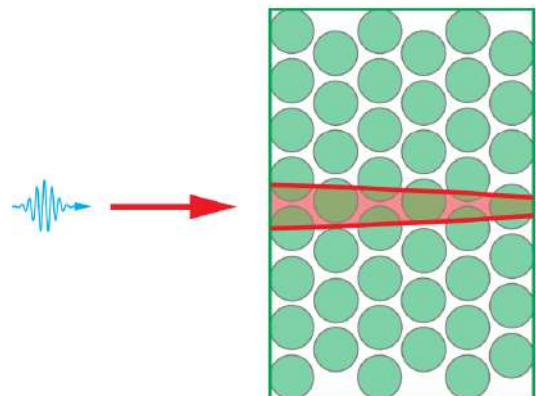
Het ioniserend vermogen van β -straling is kleiner dan dat van α -straling. Dit komt omdat een β -deeltje lichter is dan een α -deeltje en bovendien een kleinere lading heeft. De kans dat een β -deeltje botst met elektronen in een stof is daarom niet zo groot. β -deeltjes kunnen verder doordringen in een stof en hebben een grotere dracht dan α -deeltjes. De dracht van een β -deeltje in lucht is hooguit enkele meters. Hoewel β -deeltjes verder een stof kan binnendringen richten ze minder schade aan. Zie figuur 21.



Figuur 21 Bestraling met β -deeltjes.

Bestraling met γ -fotonen

Net als zichtbaar licht maakt γ -straling deel uit van het elektromagnetisch spectrum. γ -deeltjes zijn fotonen, ze hebben geen massa en geen lading. Het ioniserend vermogen van γ -straling is daarom veel kleiner dan dat van α - of β -straling. De kans dat een γ -foton botst met elektronen in een stof is klein, zodat γ -fotonen ver kunnen binnendringen in een stof en een grote **indringdiepte** hebben. De indringdiepte van γ -fotonen in lucht is kilometers groot. Zie figuur 22.



Figuur 22 Bestraling met γ -fotonen.

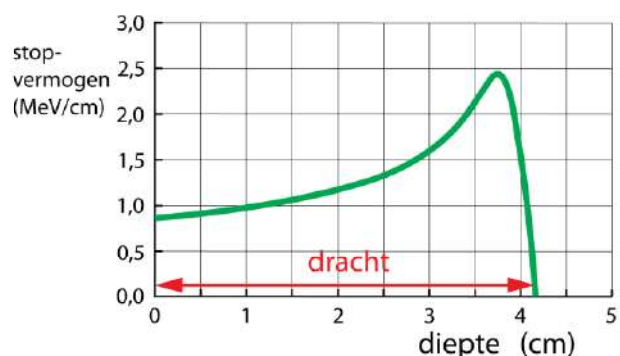
De tabel hiernaast is een overzicht van het ioniserend vermogen en het doordringend vermogen van α -, β - en γ -straling.

soort straling	deeltje	ioniserend vermogen	doordringend vermogen
α	helium-4 kernen	groot	klein
β^- β^+	elektronen positronen	gemiddeld gemiddeld	gemiddeld gemiddeld
γ	fotonen	klein	groot

De dracht van α -deeltjes en β -deeltjes

Voor het doordringen van α - en β -deeltjes gelden andere regels dan voor γ -deeltjes en röntgenstraling (elektromagnetische straling). Bij α - en β -deeltjes en andere deeltjes die uit materie bestaan spreekt je van de **dracht** van het deeltje.

In figuur 23 zie je hoe α -deeltjes met een energie van 5,5 MeV doordringen in de lucht. Doordat ze met moleculen in de lucht botsen, verliezen ze onderweg hun energie. Op de verticale as staat het energieverlies per cm afgelegde weg. Na ruim 4 cm hebben de α -deeltjes al hun energie (snelheid) verloren zodat ze niet verder kunnen.



Figuur 23 De dracht van α -deeltjes in lucht.

De halveringsdikte voor röntgenstraling en gammastraling

De hoeveelheid doorgelaten **elektromagnetische straling** hangt af van de energie van de fotonen, het soort materiaal en van de dikte van het voorwerp. Voor elektromagnetische straling, waartoe röntgen en gammafotonen behoren, bestaat een **halveringsdikte** $d_{1/2}$ waarbij de helft van de opvallende straling wordt doorgelaten en de andere helft wordt geabsorbeerd.

De halveringsdikte $d_{1/2}$ is de dikte waarbij de helft van de straling wordt doorgelaten.

Na één keer de halveringsdikte is $\frac{1}{2}$ van de straling nog aanwezig, na twee keer de halveringsdikte is $\frac{1}{4}$ van de straling nog aanwezig en na drie keer de halveringsdikte $\frac{1}{8}$, etc. De intensiteit van de opvallende straling noemen we I_0 . Voor de intensiteit van de straling die door de stof heen gaat geldt:

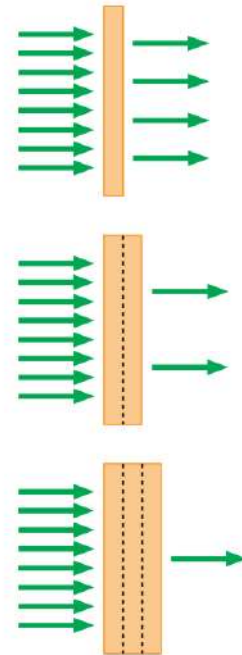
$$1 \cdot I_0 \xrightarrow{1 \cdot d_{1/2}} \frac{1}{2} I_0 \xrightarrow{2 \cdot d_{1/2}} \frac{1}{4} I_0 \xrightarrow{3 \cdot d_{1/2}} \frac{1}{8} I_0 \xrightarrow{4 \cdot d_{1/2}} \frac{1}{16} I_0 \xrightarrow{5 \cdot d_{1/2}} \frac{1}{32} I_0$$

In figuur 24 zie je een plaatje dat wordt bestraald met fotonen. De dikte van het bovenste plaatje is gelijk aan $d_{1/2}$. Achter het plaatje is de intensiteit van de straling gehalveerd (=50%). Het middelste plaatje is twee keer zo dik en heeft dus een dikte van $2 \cdot d_{1/2}$. Achter dit plaatje is de intensiteit van de straling afgenomen tot $\frac{1}{4}$ (= 25%). Het onderste plaatje is drie keer de halveringsdikte, waardoor de straling afneemt tot $\frac{1}{8}$ (= 12,5%).

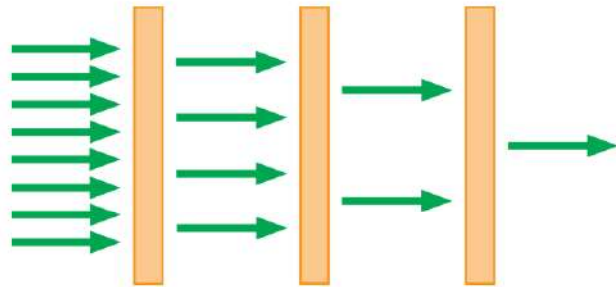
Een plaatje met een dikte van drie keer de halveringsdikte mag je opvatten als drie plaatjes achter elkaar van ieder één keer de halveringsdikte. Zie figuur 25.

Figuur 24 Het doorlaten van elektromagnetische straling.

Boven $d = d_{1/2}$
Midden $d = 2 \cdot d_{1/2}$
Onder $d = 3 \cdot d_{1/2}$



Figuur 25 Elektromagnetische straling passeert drie keer achter elkaar een plaatje met dikte $d_{1/2}$. Er wordt evenveel straling doorgelaten als één plaatje met een dikte van $3 \cdot d_{1/2}$.



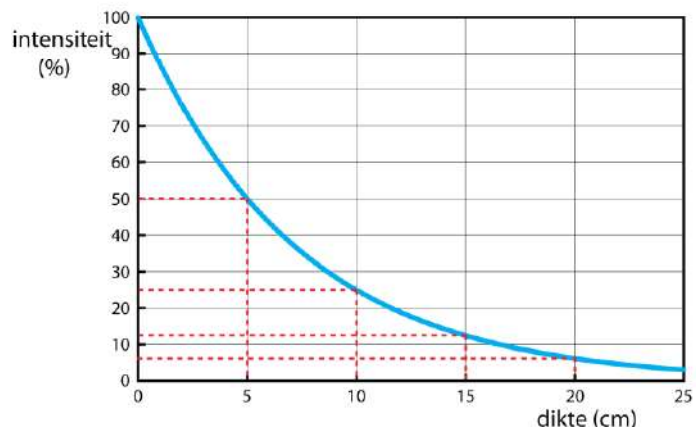
Voor de intensiteit van de straling nadat n keer de halveringsdikte is gepasseerd geldt:

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

- I is de intensiteit van de doorgelaten straling (achter het plaatje)
- I_0 is de intensiteit van de opvallende straling (voor het plaatje)
- n is het aantal keer de halveringsdikte, $n = d / d_{1/2}$ **d en $d_{1/2}$ in dezelfde eenheid**
- d is de dikte in dezelfde eenheid als $d_{1/2}$
- $d_{1/2}$ is de halveringsdikte

De intensiteit van de straling neemt exponentieel af bij het doordringen in een stof. In figuur 26 zie je hoe de intensiteit afneemt. In deze figuur is de intensiteit in procenten weergegeven. De halveringsdikte is 5,0 cm.

Figuur 26 Afname van de intensiteit van γ -straling bij het doordringen in een stof.



De halveringsdikte $d_{1/2}$ is de afstand waarin de helft van de γ -straling wordt geabsorbeerd. De halveringsdikte wordt vaak in cm opgegeven.

VOORBEELD γ -straling door lood

Een radioactieve bron straalt γ -straling uit met een fotonenergie van 1,0 MeV. De bron wordt in een ijzeren kluis bewaart. De halveringsdikte is 1,5 cm.

Hoe dik moet de wand zijn om 87,5% van de γ -straling tegen te houden?

- $100 - 87,5 = 12,5$ % van de straling wordt doorgelaten
- $\frac{12,5}{100} = \frac{1}{8} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}$
- $I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{d}{d_{1/2}}$
- de straling wordt 3 keer gehalveerd $\rightarrow n = 3 \rightarrow \frac{d}{d_{1/2}} = 3 \rightarrow d = 3 \cdot d_{1/2}$
- $d = 3 \cdot 1,5 = 4,5$ cm

10.4 Detectie van straling

Stralingsbadge (dosimeter)

Radioactieve straling kan niet door onze zintuigen worden waargenomen. Vandaar dat er instrumenten zijn ontwikkeld om radioactieve straling te meten. Bij deze meting maak je gebruik van het ioniserend en het doordringend vermogen van de straling.

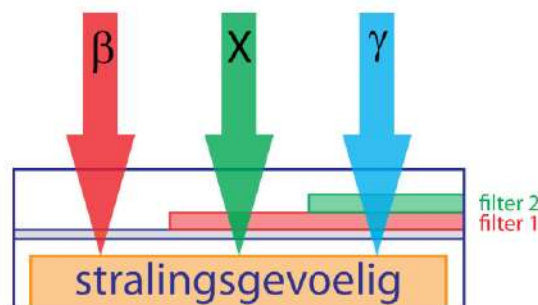
Mensen die dichtbij stralingsbronnen werken moeten altijd een **stralingsbadge** dragen. Hiermee kan je vaststellen aan hoeveel straling iemand in het verleden is blootgesteld. Omdat de dracht van α -straling in de lucht maar enkele centimeters is heeft het geen zin om een badge gevoelig te maken voor α -straling. Meestal is een stralingsbadge gevoelig voor β -straling, röntgenstraling (x-straling) en γ -straling.

Een badge meet de straling die in het verleden is ontvangen.

Een badge bevat stralingsgevoelig materiaal verpakt in een lichtdicht doosje. De hoeveelheid opgevangen straling wordt vastgelegd in het materiaal. Door filters aan te brengen kan je onderscheid maken tussen de verschillende type straling. Hierbij maak je gebruik van het verschil in doordringend vermogen van β -straling, röntgenstraling (x-straling) en γ -straling. In figuur 27 zie je de werking van een stralingsbadge. De badge heeft twee filters.

- β -straling kan **niet** door filter 1 en **niet** door filter 2
- x-straling kan **wel** door filter 1 maar **niet** door filter 2
- γ -straling kan **wel** door filter 1 en **wel** door filter 2

Figuur 27 Met een stralingsbadge meet je de straling waaraan iemand is blootgesteld.

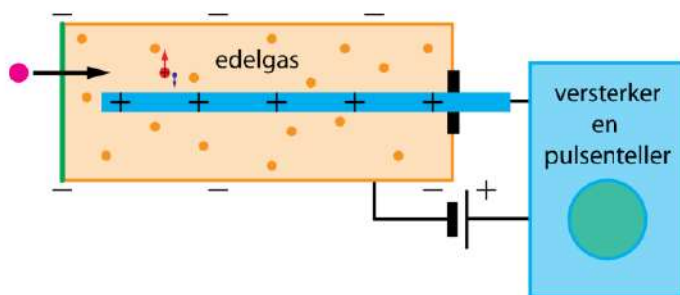


Geigerteller

Een geigerteller, ook bekend als geiger-mullerteller (GM-teller), gebruik je om de aanwezigheid van radioactieve straling te meten. Als er straling is verschijnt dit op het scherm en klinkt er een knetterend geluid. Een GM-teller zegt niets over de hoeveelheid straling die je in het verleden hebt ontvangen.

Een GM-teller meet de straling die op dat moment aanwezig is.

De werking van een GM-teller zie je in figuur 28. Een buisje is gevuld met helium, neon of argon onder lage druk. In het buisje zit een elektrode (blauw) die op een positieve spanning van ongeveer 500 V staat ten opzichte van de buitenkant van het buisje. Deze spanning is zo gekozen dat het gas nog net niet ioniseert. Omdat het gas geen geladen deeltjes bevat is de elektrische weerstand hoog. Als er een radioactief deeltje in het buisje komt worden een paar gasatomen geïoniseerd. De positieve ionen worden aangetrokken door de negatieve elektrode en onderweg botsen ze met andere edelgasatomen die hierdoor ook ioniseren. Er ontstaat een lawine van ionen en elektronen, waardoor de elektrische weerstand van het gas even klein wordt. Tijdens de lawine loopt er elektrische stroom die je kunt meten. De spanning is zo gekozen dat de lawine van korte duur is, zodat je snel achter elkaar binnenkomende deeltjes kunt meten. Vaak wordt een luidspreker aangesloten, waardoor bij iedere stroompuls een kort signaal klinkt. Bij veel ionisaties achter elkaar hoor je een knetterend geluid en weet je dat de stralingsintensiteit hoog is.



Figuur 28 Een geigermüllerteller (GM-teller).

10.5 Absorptie van straling door materie

Stralingsdosis

De **stralingsdosis** is de hoeveelheid **stralingsenergie** die door één kilogram stof wordt geabsorbeerd. De eenheid van stralingsdosis is de gray, Gy, wat gelijk is aan joule per kilogram J/kg. De stralingsdosis geeft aan hoeveel schade weefsel oploopt door ioniserende straling en kan worden gemeten met een **dosimeter**.

$$D = \frac{E_{\text{abs}}}{m}$$

- D is de stralingsdosis in gray (Gy) = (J/kg)
- E_{abs} is de geabsorbeerde stralingsenergie (J)
- m is de bestraalde massa (kg)

Equivalente dosis

Het ioniserende vermogen van een radioactief deeltje hangt niet alleen af zijn energie, maar ook van andere factoren zoals de massa en de lading. Een α -deeltje van 4,0 MeV dat wordt geabsorbeerd veroorzaakt 20 keer zoveel ionisaties als een β -deeltje met dezelfde hoeveelheid energie. Om hiervoor te corrigeren voeren we de **stralingsweegfactor** in met als symbool w_R . De stralingsweegfactor heeft geen eenheid. De **equivalente dosis** is de stralingsdosis vermenigvuldigd met de stralingsweegfactor.

$$H = w_R \cdot D$$

- H is de equivalente dosis in sievert (Sv) (1 Sv = 1 J/kg)
- w_R is de stralingsweegfactor (geen eenheid)
- D is de stralingsdosis in gray (Gy) (1 Gy = 1 J/kg)

De stralingsdosis wordt uitgedrukt in gray (Gy).

De equivalente dosis wordt uitgedrukt in sievert (Sv).

Eén gray (Gy) is gelijk aan één sievert (Sv) en is één joule per kilogram (J/kg).

De (stralings)weegfactoren voor α -, β -, γ - en röntgenstraling staan in de tabel hiernaast.

Straling	Weegfactor
α	20
β	1
γ	1
röntgen	1

Het vermogen van een stralingsbron

Een stralingsbron zendt radioactieve deeltjes uit met veel energie. Het vermogen van de bron is de uitgezonden energie per seconde. Dit is gelijk aan het aantal uitgezonden deeltjes per seconde (de activiteit) keer de energie van één deeltje.

$$P_{\text{bron}} = A \cdot E_{\text{deeltje}}$$

- P_{bron} is het uitgestraalde vermogen van de stralingsbron in watt (W)
- A is de activiteit in becquerel (Bq)
- E_{deeltje} is de energie van één deeltje in joule (J)

Weet je het vermogen van de bron dan volgt hieruit de uitgezonden hoeveelheid energie:

$$E_{\text{bron}} = P_{\text{bron}} \cdot t$$

Meestal bereiken niet alle uitgezonden deeltjes de bestraalde massa. Dit wordt aangegeven met een **fractie** of **rendement** η . Weet je deze fractie, dan kun je de geabsorbeerde stralingsenergie uitrekenen.

$$E_{\text{abs}} = E_{\text{bron}} \cdot \eta$$

VOORBEELD

Een steen met uraniumoxide (isotoop U-238) zendt α -deeltjes uit met een energie van 4,18 MeV. De activiteit van de steen is 100 Bq. Van de uitgestraalde α -deeltjes wordt 80 procent door een voorwerp van 15 gram geabsorbeerd.

Bereken de equivalente dosis van dit voorwerp nadat het 24 uur is blootgesteld aan deze straling.

- energie per deeltje: $E_{\text{deeltje}} = 4,18 \text{ MeV} = 4,18 \cdot 1,60218 \cdot 10^{-13} = 6,69711 \cdot 10^{-13} \text{ J}$
- $P_{\text{bron}} = A \cdot E_{\text{deeltje}} \rightarrow P_{\text{bron}} = 100 \cdot 6,69711 \cdot 10^{-13} = 6,69711 \cdot 10^{-11} \text{ W}$
- $E_{\text{bron}} = P_{\text{bron}} \cdot t \rightarrow E_{\text{bron}} = 6,69711 \cdot 10^{-11} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 5,7863 \cdot 10^{-6} \text{ J}$
- $E_{\text{abs}} = E_{\text{bron}} \cdot \eta \rightarrow E_{\text{abs}} = 5,7863 \cdot 10^{-6} \cdot 0,8 = 4,629 \cdot 10^{-6} \text{ J}$
- $D = \frac{E_{\text{abs}}}{m} \rightarrow D = \frac{4,629 \cdot 10^{-6}}{0,015} = 3,086 \cdot 10^{-4} \text{ Gy}$
- α -deeltjes: weegfactor = 20
- $H = w_R \cdot D \rightarrow H = 20 \cdot 3,086 \cdot 10^{-4} = 6,172 \cdot 10^{-3} = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}$

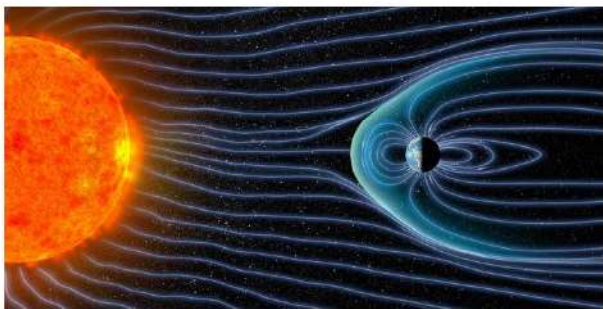
Effectieve totale lichaamsdosis

Biologisch weefsel wordt beschadigd als het met ioniserende straling in aanraking komt. Door ionisaties worden moleculen afgebroken en uit de brokstukken kunnen weer nieuwe moleculen worden gevormd. Dit kan schadelijke effecten veroorzaken, zeker als het mole-

cuul in kwestie een DNA-molecuul is. Biologische cellen die teveel straling ontvangen sterven meestal af. Is het DNA in de cel beschadigd dan kan de cel in leven blijven en zich ongecontroleerd gaan delen. Dit kan tot kwaadaardige kanker leiden. Anderzijds is deze vorm van mutatie ook een belangrijke oorzaak van biologische evolutie. Een gezond lichaam is in staat kapotte chemische bindingen snel te repareren. Maar als de stralingsdosis te groot is lukt dat niet meer en word je ziek. Bij een erg hoge stralingsdosis word je afweermechanisme onherstelbaar beschadigd en overlijdt je na enige tijd.

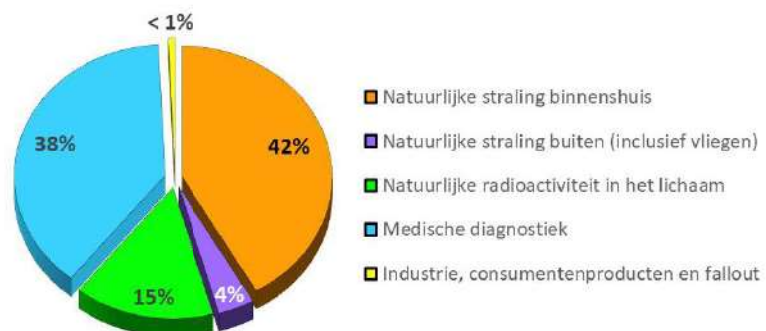
De **effectieve totale lichaamsdosis** is de equivalente dosis die een mens per jaar ontvangt. Deze **stralingsbelasting** wordt uitgedrukt in millisievert (mSv) per jaar. Dit mag niet teveel zijn en vandaar dat er **stralingsbeschermingsnormen** zijn vastgesteld.

De aarde ontvangt uit de ruimte voortdurend **kosmische straling**. Het grootste deel hiervan is afkomstig van de zon, die behalve licht ook geladen deeltjes uitzendt. Zie figuur 29 links. Verder vliegen er door de ruimte deeltjes die ontstaan bij kosmische explosies. Als deze deeltjes in de dampkring komen ontstaan er kernreacties en de ioniserende straling die daarbij ontstaat kan het aardoppervlak bereiken. Zie figuur 29 rechts. Een gemiddeld persoon ontvangt hierdoor in Nederland 0,2 mSv aan ioniserende straling. Dit is een lage dosis die verder geen schadelijke gevolgen heeft.



Figuur 29 Kosmische straling. De zon zendt

Behalve de kosmische straling is er ook ioniserende straling die wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van kleine hoeveelheden radioactieve isotopen in de bodem en in bouwmaterialen. De totale **natuurlijke achtergrondstraling** is in Nederland tussen 1,7 en 2,5 mSv per jaar. Door **medische diagnostiek** ontvangt je daarbij gemiddeld 1,2 mSv per jaar. In figuur 30 zie je de verdeling van deze stralingsbelasting over de verschillende bronnen.



Figuur 30 Bronnen van ioniserende straling in Nederland.

Bovenop de equivalente dosis door achtergrondstraling en medische diagnostiek mag je per jaar aan maximaal **1 mSv** worden blootgesteld. Dit is de **stralingsbeschermingsnorm** voor een individueel lid van de bevolking. Werk je beroepshalve met stralingsbronnen en ben je ouder dan 18 jaar, dan is de stralingsbeschermingsnorm **20 mSv** per jaar. Onderstaande tabel geeft een indruk van de stralingsbelasting die je oploopt.

Bijdrage uit	Stralingsbron	millisievert (mSv)
Leefomgeving	kosmische straling	0,25 / jaar
	bodem	0,05 / jaar
	water en voedsel	0,35 / jaar
	lucht	0,8 / jaar
	bouwmaterialen	0,35 / jaar
Vrije tijd	vliegreis op 10 km hoogte	0,005 / uur
	wintersport op 2 km hoogte	0,03 / week
Medisch	röntgenfoto borstholte	0,09 / keer
	röntgenfoto gebit	0,01 / keer
	röntgenfoto borsten (mammografie)	0,1 / keer
	röntgenfoto hoofd en nek	0,2 / keer
	röntgenfoto heup	0,8 / keer
	röntgenfoto beenbreuk	1,0 / keer
	CT-scan hoofd	1,3 / keer
	CT-scan lichaam	12 / keer

Radioactieve besmetting

Alfa-, bèta- en gammastraling blijft niet in het lichaam zitten. Als je blootstaat aan ioniserende straling word je zelf geen radioactieve bron. Geabsorbeerde alfadeeltjes nemen elektronen op en worden onschadelijke heliumatomen, bèta-min deeltjes zijn elektronen, bèta-plus deeltjes annihilieren met elektronen en gammastraling is energie. Maar als radioactief materiaal in je lichaam komt, bijvoorbeeld door het eten van besmet voedsel of door het inademen van radioactief gas, word je voortdurend van binnenuit bestraald. Je spreekt dan van **radioactieve besmetting**. Ook als radioactief materiaal op je huid komt ben je radioactief besmet.

Inwendige bestraling (brachytherapie)

Brachytherapie is een medische behandelingen waarbij een radioactieve stof wordt toegediend, zodat de patiënt gedurende een bepaalde tijd van binnenuit wordt bestraald. Tijdens deze behandeling is de patiënt radioactief besmet. Een bron met een radioactieve isotoop (een radionuclide) wordt in of vlak naast het weefsel geplaatst dat bestraald moet worden. De gebruikte isotopen zenden β^- -straling of röntgenstraling uit. In weefsel hebben β^- deeltjes een dracht van enkele centimeters, zodat voornamelijk tumorcellen worden bestraald. De halveringsdikte van röntgenstralen is meer dan enkele centimeters, zodat ook gezonde cellen worden bestraald. Maar omdat de afstand tussen de bron en de gezonde cellen groter is dan die tussen de bron en de tumorcellen is de stralingsintensiteit bij de gezonde cellen klein. Omdat gezonde cellen veel minder straling krijgen is de toegevoegde stralingsdosis bij brachytherapie groot. Tumorcellen krijgen een dosis van 2 tot 12 Gy per uur. Bij tijdelijke brachytherapie wordt de stralingsbron na een aantal minuten of

uren verwijderd. Bij permanente brachytherapie (zaadimplantatie) worden holle staafjes (5 mm lang) gevuld met de radionuclide in het lichaam geplaatst waar ze achterblijven. Zie figuur 31. Door het verval van de radioactieve isotopen wordt de activiteit steeds kleiner, zodat na een aantal weken of maanden de bestraling stopt. Brachytherapie is in 1901 (vijf jaar na de ontdekking van radioactiviteit) voor het eerst toegepast en is nog steeds een veel gebruikte behandeling voor baarmoederhalskanker, prostaatkanker, borstkanker en huidkanker.



Figuur 31 Bij brachytherapie worden staafjes met radionucliden in het lichaam geplaatst.

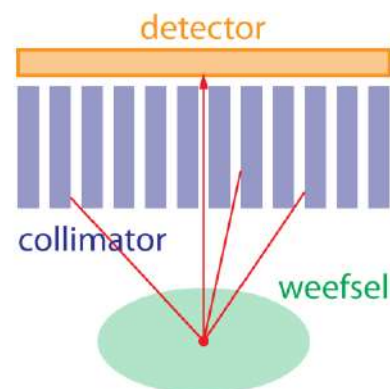
Nucleaire diagnostiek

In de geneeskunde wordt radioactieve besmetting ook gebruikt voor diagnose. Het toegediende radioactieve isotoop noem je een **tracer**, omdat je hiermee kunt volgen (traceren) wat er in het lichaam gebeurt.

Een tracer is een toegediende radioactieve stof waarmee je processen in het lichaam kunt volgen (traceren).

Een voorbeeld van nucleaire diagnostiek is **Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)**. Bij SPECT wordt een radioactief isotoop (een tracer) in het lichaam van een patiënt gebracht om weefsel te onderzoeken. De radioactieve isotoop moet worden opgenomen door het weefsel en wordt daarom vastgemaakt aan speciale moleculen. Bij SPECT vervallen de radionucliden onder uitzending van γ -fotonen die door een gamma-detector worden waargenomen. De gammadetector bevat een stof (bijvoorbeeld natrium-jodide) waarin een lichtflits ontstaat als het wordt geraakt door een γ -foton. Om te zorgen dat alleen fotonen die loodrecht invallen worden waargenomen wordt een collimator aangebracht. Dat is een dikke loden plaat waarin een groot aantal kanaaltjes is geboord, zodat γ -fotonen die schuin aankomen door het lood worden opgevangen. Zie figuur 32.

De waargenomen γ -fotonen zijn afkomstig uit een gebied dat loodrecht onder de detector ligt. Van welke diepte ze komen is niet direct vast te stellen. Door met de detector een hele of halve cirkel om de patiënt te maken krijg je een serie plaatjes waaruit een computer een driedimensionaal beeld kan berekenen. De resolutie van het beeld is ongeveer 1 cm en een SPECT-scan is daarom minder nauwkeurig dan andere technieken zoals CT-scan.



Figuur 32 SPECT.

10.6 Kernreacties

Spontane en gestimuleerde reacties

Er zijn twee soorten kernreacties: **spontane reacties** en **gestimuleerde reacties**. Spontane reacties gebeuren zonder aanwijsbare oorzaak. Opeens zendt een atoomkern een α -, een β -, of een γ -deeltje uit. Gestimuleerde reacties gebeuren als je de kern beschiet, bijvoorbeeld met protonen, neutronen of elektronen. Stel dat je neutronen op een kern schiet, dan kunnen er één of meer neutronen door de kern worden opgenomen. De kern die ontstaat heeft nu teveel neutronen en valt uit elkaar, waarbij nieuwe kernen ontstaan.

spontane reacties	→	er is geen aanwijsbare oorzaak
gestimuleerde reacties	→	de kern wordt beschoten

Behoud van massagetal en van elektrische lading

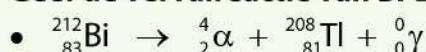
Voor kernreacties geldt behoud van **massagetal** en behoud van elektrische **lading**.

Behoud van massagetal → de som van de massagetallen voor de reactie is gelijk aan de som van de massagetallen na de reactie.

Behoud van lading → de som van de ladingsgetallen voor de reactie is gelijk aan de som van de ladingsgetallen na de reactie.

VOORBEELD spontaan verval

Geef de vervalreactie van Bi-212 (spontaan verval).



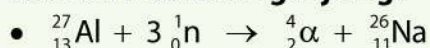
Geef de vervalketen van Bi-212 (spontaan verval).

- vervalketen → ga je door tot een stabiel isotoop ontstaat
- ${}_{81}^{208}\text{Tl} \rightarrow {}_{-1}^0\beta + {}_{82}^{208}\text{Pb} + {}_0^0\gamma$

VOORBEELD gestimuleerde reactie

Je beschiet een Al-27 kern met neutronen. Drie neutronen worden opgenomen in de Al-27 kern die daarna uiteenvalt en een α -deeltje uitzendt.

Geef de reactievergelijking.

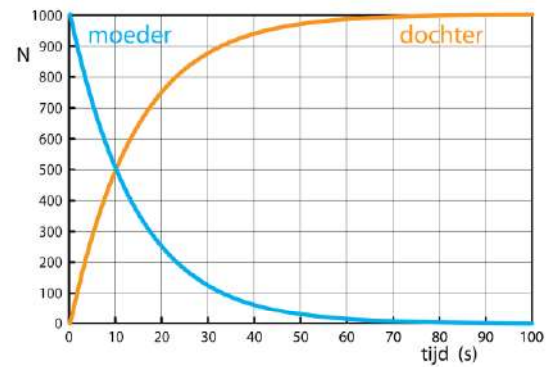


Bij spontane reacties komt altijd α -, β - of γ -straling vrij, maar bij gestimuleerde reacties kunnen ook andere deeltjes, zoals protonen of neutronen vrijkomen. Je spreekt dan van **protonstraling** of van **neutronstraling**.

Vervalreeks

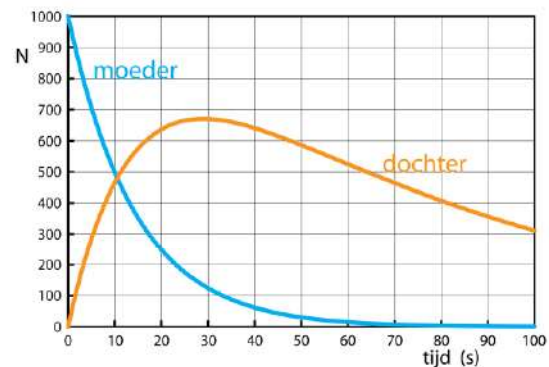
Als een atoomkern vervalft ontstaan er kernen die stabiel of instabiel kunnen zijn. In het eenvoudigste geval is de ontstane kern stabiel. In dat geval is het aantal dochterkernen gelijk aan het aantal vervallen moederkernen. In figuur 35 zie je de afname van de moederkernen en de toename van de stabiele dochterkernen.

Figuur 35 Verval van moederkernen met stabiele dochterkernen.



Als de dochterkernen zelf ook weer vervallen wordt het ingewikkelder. In het begin zijn er alleen moederkernen en uit iedere moederkern ontstaat een dochterkern. Hierdoor neemt het aantal dochterkernen in het begin toe. Maar omdat de dochters instabiel zijn vervallen ze en wordt hun aantal weer kleiner.

In figuur 36 zie je een voorbeeld. We beginnen met 1000 moederkernen met een halveringstijd van 10 seconden. Er ontstaan dochterkernen met een halveringstijd van 50 seconden. De halveringstijd van de dochters is niet goed af te lezen uit het diagram, maar je kunt het nog wel schatten, want na 50 seconden zijn er niet veel moeders meer en ontstaan er dus niet veel nieuwe dochters. Na 50 s zijn er ongeveer 600 dochters en na 100 s zijn daar nog 300 van over. In 50 s is het aantal dochters dus gehalveerd.



Figuur 36 Verval met instabiele moeder- en dochterkernen.

10.7 Samenvatting

Grootheden en eenheden

- Q is de elektrische lading in coulomb (C) *ook kleine letter q wordt gebruikt*
- N is het aantal kernen | N_0 is het aantal kernen op $t=0$
- t is de tijd in seconden (s), minuten (min), dagen (d) of jaren (y)
- $t_{1/2}$ is de halveringstijd in seconden (s), minuten (min), dagen (d) of jaren (y)
- A is de activiteit in becquerel (Bq) | A_0 is de activiteit op $t=0$
- d is de dikte in centimeter (cm)
- $d_{1/2}$ is de halveringsdikte in centimeter (cm)
- D is de dosis in gray (Gy) *$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$*
- E_{abs} is de geabsorbeerde energie in joule (J)
- m is de bestraalde massa in kilogram (kg)
- H is de equivalente dosis in sievert (Sv) *$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$, gecorrigeerd met w_R*
- w_R is de stralingsweegfactor (geen eenheid) *$w_R = 20$ voor α en 1 voor β, X, γ*

Weten

- Een atoomkern bevat protonen en neutronen. *kerndeeltjes of nucleonen*
- Het atoomnummer is gelijk aan het aantal protonen in de kern.
- De massa van een proton en van een neutron is ongeveer $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.
- ${}^4_2\text{He} = {}^4\text{He} = \text{He} - 4$
 proton ${}^1_1\text{p}$ | neutron ${}^1_0\text{n}$
 elektron ${}^0_{-1}\text{e}$ | positron ${}^0_{+1}\text{e}$



- De isotopen van een element hebben evenveel protonen maar een verschillend aantal neutronen in de kern.

atoom nr	sybm.	massa- getal	atoommassa (u)	percent. (%)	halverings- tijd	soort verval
6	C	10	10,016853	---	19,2 sec	β^+ 2,2 MeV
		11	11,011433	---	20,4 min	β^+ 0,95 MeV
		12	12,000000	98,93	---	---
		13	13,003355	1,07	---	---
		14	14,003242	---	5730 jaar	β^- 0,16 MeV

– $1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J} \rightarrow 1 \text{ MeV} = 1,6022 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

- spontaan verval
 - α -straling $\rightarrow$ He-kernen
 - β^- -straling $\rightarrow$ elektronen
 - β^+ -straling $\rightarrow$ positronen
 - γ -straling $\rightarrow$ fotonen

- De halveringstijd $t_{1/2}$ is de tijd waarin de helft van de kernen vervalst.
- Het aantal vervallen kernen is het aantal kernen in het begin min het aantal vervallen kernen: $N_{\text{vervallen}} = N_0 - N$.
- Ioniserend vermogen → een elektron wordt uit een schil verwijderd.
- Doordringend vermogen → een α -, β -, of γ -deeltje dringt door in een stof.

soort straling	deeltje	ioniserend vermogen	doordringend vermogen
α	helium-4 kernen	groot	klein
β^- β^+	elektronen positronen	gemiddeld gemiddeld	gemiddeld gemiddeld
γ	fotonen	klein	groot

- De halveringsdikte $d_{1/2}$ is de dikte waarbij de helft van de straling wordt doorgelaten.
- Een badge meet de straling die over een periode is ontvangen → stralingsdosis.
Een GM-teller meet de straling die op dit moment aanwezig is → activiteit.
- Een voorwerp dat wordt bestraald wordt niet zelf radioactief.
- Je wordt radioactief besmet als je een radioactieve bron in je lichaam krijgt, bijvoorbeeld door het eten van besmet voedsel of het inademen van besmet gas.
- Kernreacties
 - spontane reacties → er is geen aanwijsbare oorzaak
 - gestimuleerde reacties → de kern wordt beschoten
- Kloppende reactievergelijking
 - massagetal begin = massagetal eind
 - lading begin = lading eind

Formules

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

t en $t_{1/2}$ in dezelfde eenheid

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

t en $t_{1/2}$ in dezelfde eenheid

$$A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

gemiddeld aantal vervallen kernen per seconde

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

richtingscoëfficiënt van de raaklijn

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

d en $d_{1/2}$ in dezelfde eenheid

$$D = \frac{E_{\text{abs}}}{m}$$

dosis in gray (Gy)

$$H = w_R \cdot D$$

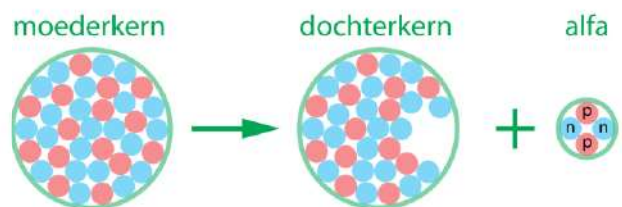
dosisequivalent in sievert (Sv)

$$P_{\text{bron}} = A \cdot E_{\text{deeltje}}$$

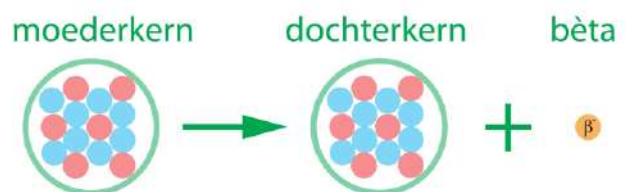
vermogen van de stralingsbron

Figuren

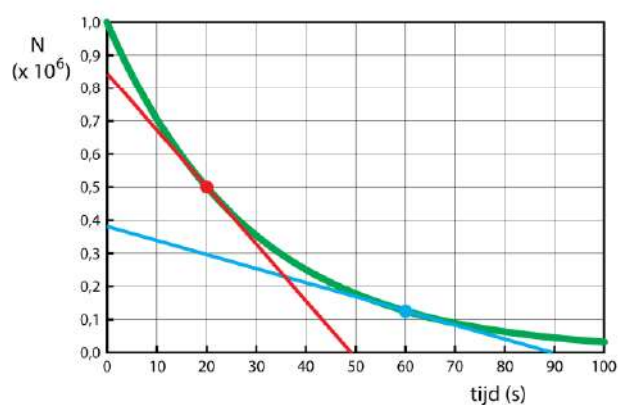
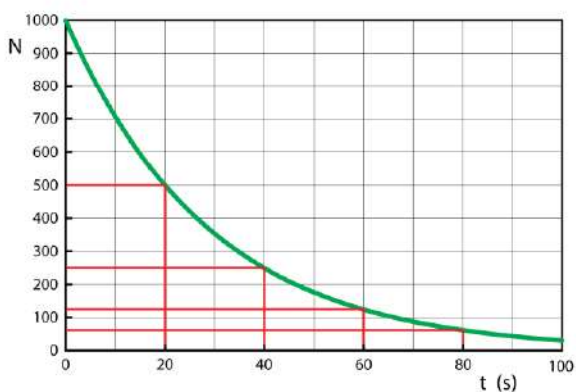
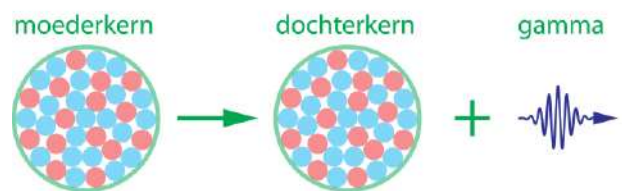
α -verval



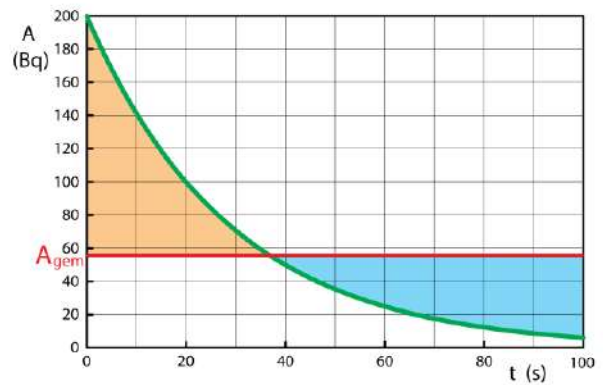
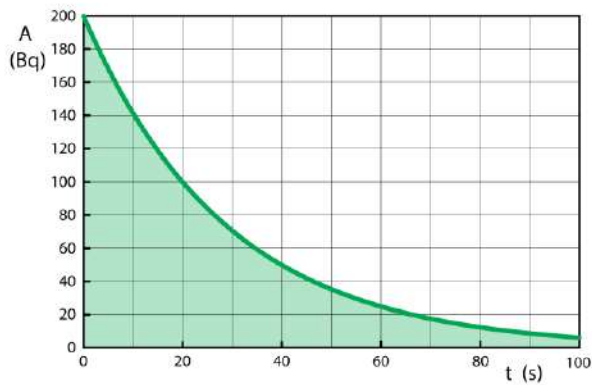
β^- -verval



γ -verval

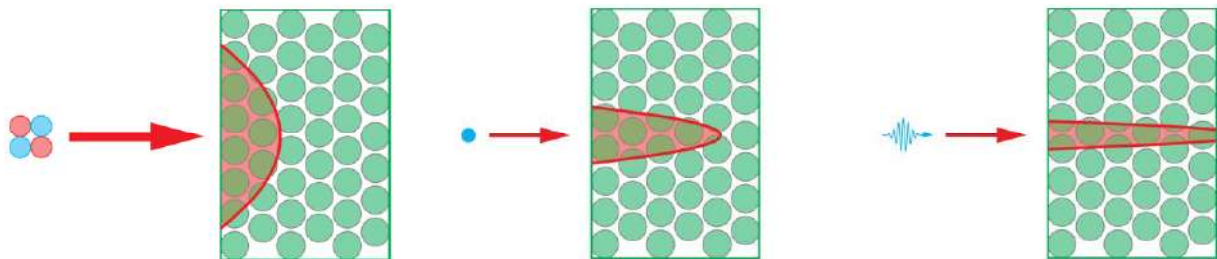
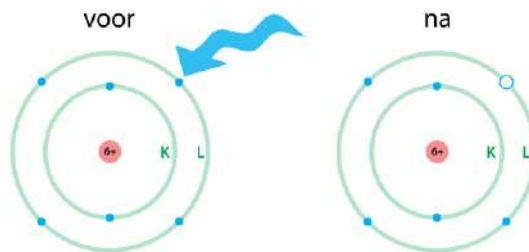


(N, t)-diagram. De halveringstijd is 20 seconden. De activiteit is de richtingscoëfficiënt van de raaklijn keer -1 .



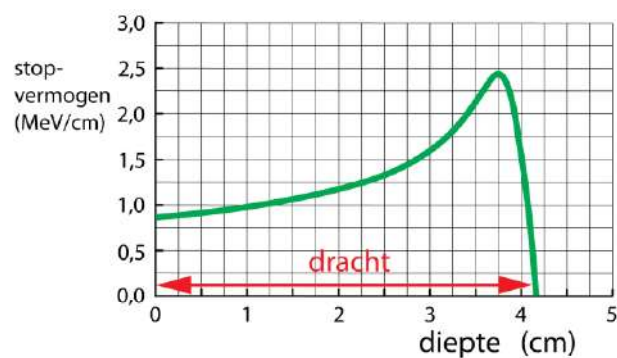
Het aantal vervallen kernen is gelijk aan de oppervlakte onder de (A, t) -grafiek. Deze oppervlakte kun je bepalen door hokjes te tellen of door A_{gem} te schatten. Bij A_{gem} is het oranje oppervlakte gelijk aan het blauwe oppervlakte.

α -, β - en γ -straling zijn ioniserend. Elektronen worden uit hun schil gestoten zodat er een positief ion ontstaat.

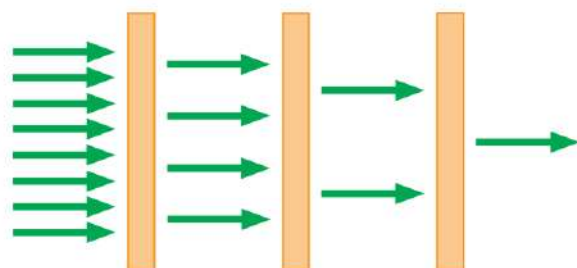


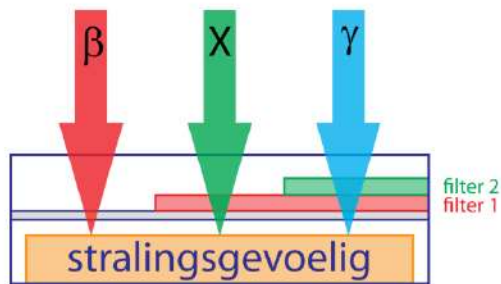
Links α -deeltjes kleine indringdiepte veel ionisatie.
Midden β -deeltjes gemiddelde indringdiepte gemiddelde ionisatie.
Rechts γ -fotonen grote indringdiepte weinig ionisaties.

α -deeltjes met een kinetische energie van 5,5 MeV verliezen in lucht hun energie. Na ongeveer 4 cm staan ze stil.

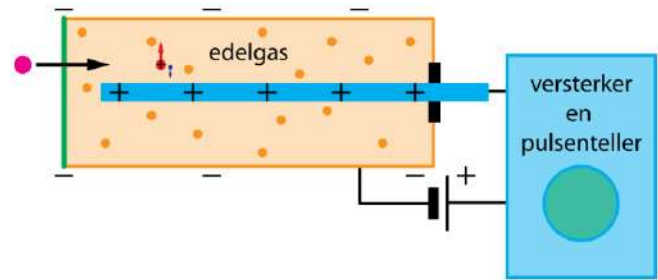


Fotonen (γ - of röntgenfotonen) worden geabsorbeerd. Na de halveringsdikte $d_{1/2}$ is de helft geabsorbeerd en gaat de andere helft verder. Drie keer achter elkaar een plaatje met dikte $d_{1/2}$ is gelijk aan één plaatje met een dikte $3 \cdot d_{1/2}$. Alleen waar als er geen reflectie is.



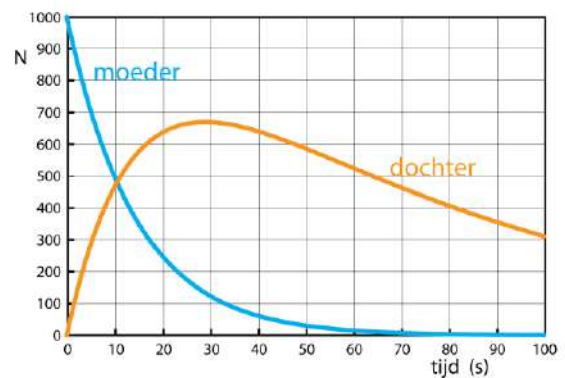
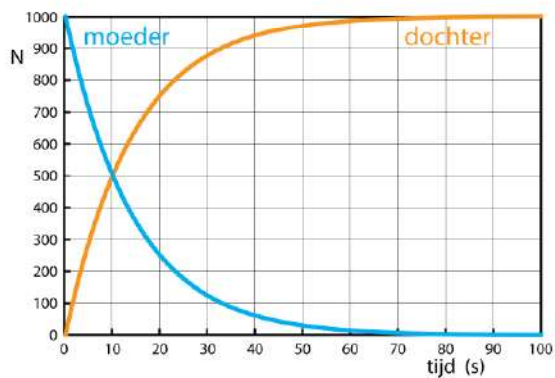
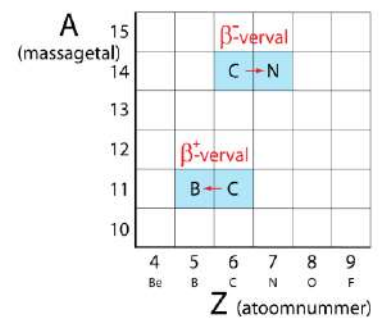
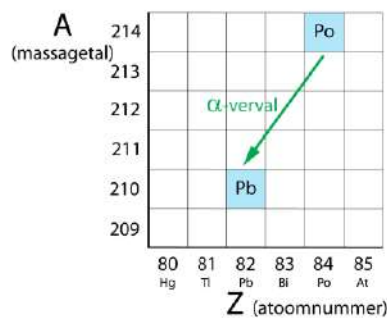


Een stralingsbadge wordt gebruikt om de hoeveelheid opgelopen straling te meten.



Een geigerteller wordt gebruikt om de aanwezigheid van α -, β - en γ -straling te meten.

Het (massagetal, atoomnummer)-diagram met α -verval en β -verval.



Bij een vervalreeks is de dochterkern niet stabiel. In het begin zijn er alleen moederkernen en als een moederkern vervalst ontstaat er een dochterkern. Maar die vervalst na een tijdje ook en dan ontstaat er een kleindochter.