

9 Kernfysica

9.0 Overzicht

9.1 Radioactieve straling

- Hoe ziet een atoom eruit en uit welke deeltjes bestaat een atoom?
- Hoe is de elektrische lading in een atoom verdeeld over de deeltjes?
- Wat is het periodiek systeem der elementen?
- Wat is de atomaire massa eenheid en met welke letter wordt dit aangeduid?
- Wat is het atoomnummer en wat is het massagetal van een atoom?
- Hoe is de massa van een atoom verdeeld over de deeltjes?
- Op welke manieren wordt een atoomkern genoteerd?
- Wat zijn isotopen?
- Welke grootte wordt uitgedrukt in elektronvolt?
- Wat is α -straling, wat is β -straling en wat is γ -straling?
- Wat is het verschil tussen β^- -straling en β^+ -straling?
- Wat is bij een kernreactie de moederkern en wat de dochterkern?
- Hoe maak je een reactievergelijking kloppend?

9.2 De snelheid van radioactief verval

- Wat is de halveringstijd?
- Waar staat de hoofdletter N voor?
- Met welke formule bereken je het aantal kernen?
- Wat is de activiteit?
- Wat is het symbool voor activiteit en wat is de eenheid?
- Met welke formule bereken je de activiteit als je weet hoeveel kernen er in een bepaalde periode zijn vervallen?
- Met welke formule bereken je de activiteit als je de activiteit op $t=0$ weet?
- Met welke formule bereken je de activiteit als je het aantal kernen weet?
- Op welke twee manieren kun je de activiteit uit een (N, t) -diagram bepalen?

9.3 Ioniserende straling

- Wat is ioniserende straling?
- Wat is de indringdiepte en wat is het ioniserend vermogen?
- Hoe verschillen de indringdiepte en het ioniserend vermogen van α -, β - en γ -deeltjes?
- Wat wordt er bedoeld met de dracht van α - en β -straling?
- Wat wordt er bedoeld met de halveringsdikte van röntgenstraling en γ -straling?
- Met welke formule bereken je hoeveel γ -straling door stof met een bepaalde dikte wordt doorgelaten?

9.4 Detectie van straling

- Waarvoor dient een stralingsbadge en wat meet je met een badge?
- Waarvoor dient een Geiger-Müllerteller en wat meet je met dit apparaat?
- Wat is een nevelkamer en wat is een bellenkamer en wat kan je ermee?

9.5 Absorptie van straling door materie

- Wat is de stralingsdosis?
- Wat is het symbool voor stralingsdosis en wat is de eenheid?
- Met welke formule bereken je de stralingsdosis?
- Wat is het dosisequivalent?
- Wat is het symbool voor dosisequivalent en wat is de eenheid?
- Wat is de stralingsweefactor?
- Waarom kan ioniserende straling gevaarlijk zijn?
- Wat is het verschil tussen bestraling en besmetting?

9.6 Kernreacties

- Wat is het verschil tussen een spontane en een gestimuleerde kernreactie?
- Aan welke voorwaarden moet een reactievergelijking voldoen?
- Wat is K-vangst?
- Welke straling komt er bij K-vangst vrij?
- Wat kun je aflezen in een (massagetal, atoomnummer)-diagram?

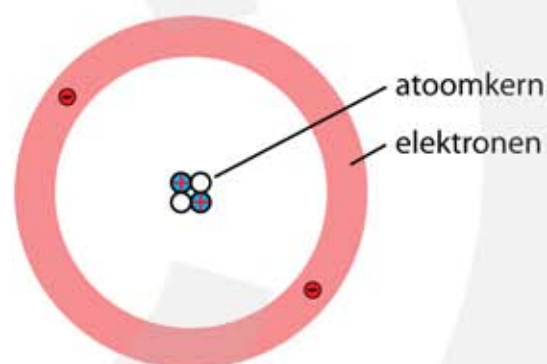
9.7 Massa en energie

- Welke formule geeft de relatie tussen massa en energie?
- Wanneer is er een massadefect?
- Wat is de bindingsenergie van een atoomkern?
- Bij welk massagetal is de bindingsenergie per nucleon het grootst?
- Bij welk massagetal is de massa per nucleon het kleinst?
- Wat is kernfusie en wat is kernsplijting?
- Hoe ontstaat de energie die een ster uitstraalt?
- Waarom zijn neutronen zo belangrijk bij de reacties in een kerncentrale?
- Hoe ontstaat een kettingreactie en wat is het sneeuwbal effect?
- Wat wordt er bedoeld met het verrijken van uranium?
- Waarvoor dienen de regelstaven in een kerncentrale?
- Waarvoor dient de moderator in een kerncentrale?
- Hoe ontstaat de blauwe straling in een kernreactor?
- Waarom ontstaat er radioactief afval en waarom moet het zo lang worden bewaard?

9.1 Radioactieve straling

De atoomkern

Een atoom bestaat uit een kern met daaromheen een aantal elektronen. Vrijwel de hele massa van het atoom bevindt zich in de kern. Een atoom bestaat voor het overgrote deel uit lege ruimte. De atoomkern bevat twee soorten deeltjes, **protonen** en **neutronen**. Dit zijn de **kerndeeltjes**, ook wel **nucleonen** genoemd. Protonen hebben een positieve lading van één elementaire ladingseenheid. Elektronen hebben een negatieve lading van één elementaire ladingseenheid. De lading van een elektron is dus gelijk maar tegengesteld aan de lading van een proton. Neutronen hebben geen lading, wat de naam van dit deeltje verklaart. Een atoom is elektrisch neutraal, omdat het aantal protonen in de kern gelijk is aan het aantal elektronen om de kern. Als er meer of minder elektronen zijn dan protonen wordt het atoom een **ion** genoemd. Bij minder elektronen dan protonen is het ion positief en bij meer elektronen negatief.



Figuur 1
De bouw van een helium atoom. De kern bevat 2 protonen en 2 neutronen. Om de kern bevinden zich 2 elektronen.

Het **atoomnummer** geeft aan hoeveel protonen de atoomkern bevat. Het **periodieke systeem** is een rangschikking van de atomen met oplopend atoomnummer. Dit worden de **elementen** genoemd. Ieder element heeft een uniek **symbool** waarmee het element kan worden aangegeven. Er zijn ongeveer honderd verschillende elementen. Bismut heeft 83 protonen in de kern en is daarmee het zwaarste stabiele element. Atomen met meer protonen in de kern zijn instabiel en vallen na verloop van tijd uit elkaar.

1	1A	2											13	14	15	16	17	18	VIIIA
1	H	2											B	C	N	O	F	Ne	
2	Li	Be											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
3	Na	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	57-71		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	89-103		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo
6	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
7	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr				

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 gelijk aan elkaar. De massa van een elektron is 1823 keer zo klein als de massa van een proton of neutron en mag daarom meestal worden verwaarloosd. Massa wordt normaalgesproken uitgedrukt in kilogram. Maar omdat een atoom erg weinig massa heeft is het kilogram geen handige eenheid voor atomen. Er is daarom afgesproken om een twaalfde deel van de massa van een koolstofatoom met 6 protonen en 6 neutronen als **atomaire massa eenheid** te gaan gebruiken met als symbool u. Zoals in onderstaande tabel is te zien zijn de massa's van het proton en van het neutron ongeveer gelijk aan 1 u. De kleine afwijkingen worden veroorzaakt doordat protonen en neutronen binnen in een atoomkern een fractie minder massa hebben dan wanneer ze los van elkaar zijn.

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Deeltje	Massa (kg)	Massa (u)
proton	$1,67262 \cdot 10^{-27}$	1,007276
neutron	$1,67493 \cdot 10^{-27}$	1,008665
elektron	$9,10938 \cdot 10^{-31}$	$5,4858 \cdot 10^{-4}$

Het **atoomnummer** van een atoom is gelijk aan het aantal protonen in de kern. Het atoomnummer wordt aangegeven met de hoofdletter Z.

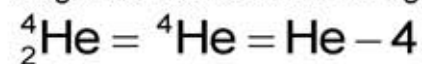
Het **aantal neutronen** in de kern van het atoom wordt aangegeven met de hoofdletter N

Het **massagetal** van een atoom is de som van het aantal protonen en het aantal neutronen in de kern. Het massagetal wordt aangegeven met de hoofdletter A. 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:



Een zelfde soort notatie gebruiken we ook voor het proton (p), het neutron (n) en het elektron (e).

- proton ${}^1_1\text{p}$
- neutron ${}^1_0\text{n}$
- elektron ${}^0_{-1}\text{e}$

Isotopen

Atomen van één element hebben altijd hetzelfde aantal 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 ${}^{14}\text{C}$. Atomen die bij hetzelfde element horen zijn de **isotopen** van dit element. Isotopen hebben dezelfde scheikundige eigenschappen en verschillen alleen in het aantal neutronen in hun kern.

Atomen die bij hetzelfde element horen zijn isotopen van elkaar.

De isotopen van een atoom hebben evenveel protonen in de kern en verschillen van elkaar als ze een verschillend aantal neutronen hebben.

Om van een atoom aan te geven welk isotoop het betreft wordt linksboven het symbool het massagetal als superscript geschreven. Voor de koolstof isotopen wordt geschreven: ${}^{10}\text{C}$, ${}^{11}\text{C}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{14}\text{C}$. Ook de volgende notatie wordt soms gebruikt: C-10, C-11, C-12, C-13, C-14 waarbij opnieuw het symbool en het massagetal zijn opgegeven.

Gegevens over een groot aantal isotopen zijn verzameld en geordend in tabellen. Als voorbeeld staan in onderstaande tabel de gegevens van koolstof.

atoom nr	syb.	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	13,003354	1,07	---	---
		14	14,003242	---	5730 jaar	β^- 0,16 MeV

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 uitgedrukt in u
- het percentage waarmee deze isotoop op aarde voorkomt
- hoe stabiel deze isotoop is uitgedrukt in de halveringstijd
- het soort straling α , β of γ dat vrijkomt bij het uiteenvallen van de isotoop

Normaal gebruiken we de joule als eenheid van energie. Maar voor processen die op de schaal van atomen afspelen is deze eenheid onhandig. De energie die één atoom kan opnemen of afstaan is immers veel kleiner dan één joule. Vandaar dat we liever met een kleinere energie-eenheid werken. Daarom wordt de elektronvolt eV of de mega-elektronvolt MeV gebruikt.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Radioactieve straling

Rond 1896 ontdekt Henri Becquerel dat er bijzondere mineralen bestaan die een vreemd soort straling uitzenden. Marie Curie wil weten waar deze straling vandaan komt en gaat op onderzoek uit. Ze onderzoekt de eigenschappen van de mysterieuze straling die zij **radioactieve straling** noemt. In 1903 krijgt ze hiervoor de Nobelprijs. In Engeland ontdekt Ernest Rutherford dat radioactieve straling wordt veroorzaakt door processen die zich binnen in een atoomkern afspelen. Verder ontdekt hij dat er drie verschillende soorten radioactieve straling zijn, **alfa** (α), **bèta** (β), en **gamma** (γ). Voor deze ontdekkingen krijgt hij in 1908 de Nobelprijs.

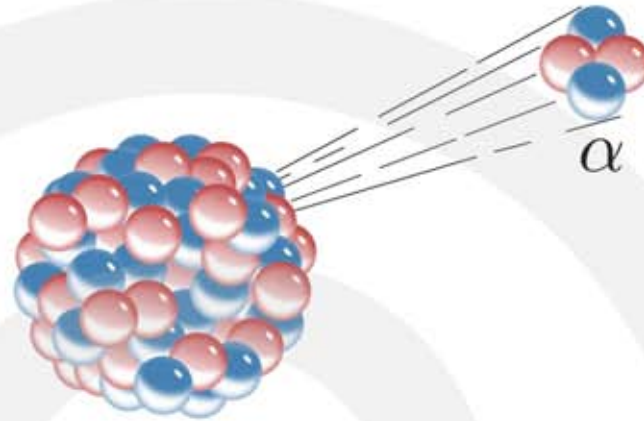
In een atoomkern zijn er aantrekkende en afstotende krachten tussen de kerndeeltjes. Vanwege hun positieve lading stoten protonen elkaar af. Door de aanwezigheid van neutronen in de kern blijven de protonen toch bij elkaar. Zijn er te weinig neutronen, dan wordt de afstotende kracht tussen de protonen onvoldoende tegengewerkt en valt de kern uit elkaar. Ook een teveel aan neutronen zorgt ervoor dat de kern uit elkaar valt. Bij de isotopen ^{10}C , ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C , ^{14}C hebben ^{10}C , ^{11}C te weinig neutronen en heeft ^{14}C te veel neutronen. Alleen bij ^{12}C en ^{13}C is het aantal protonen (6 of 7) goed. Vandaar dat op aarde alleen ^{12}C en ^{13}C voorkomen. Alle andere koolstofisotopen vallen uit elkaar. Dit uiteenvallen kan op drie manieren gebeuren, waarbij α -, β -, of γ -straling vrijkomt.

Het radioactief vervalproces verloopt op een manier die alleen met kwantummechanica kan worden beschreven. Deze theorie zegt dat de inwendige processen in een atoomkern niet veroorzaakt worden door een keten van oorzaak en gevolg, maar dat het verval **spontaan** gebeurt. Van één enkele atoomkern kan niet worden berekend hoe lang hij zal leven. Alleen de **kans** dat een atoomkern na een bepaalde tijd nog bestaat kan worden voorspeld.

Bij het verval van atoomkernen blijven het massagetal en de elektrische lading behouden maar verandert de samenstelling van een atoomkern. Het veranderen van een atoomkern heet een **kernreactie**. Kernreacties lijken enigszins op chemische reacties, waarbij de massa en de lading ook behouden blijven. Het verschil tussen chemische reacties en kernreacties is dat bij chemische reacties een zuurstofatoom altijd een zuurstofatoom blijft, terwijl bij kernreacties een zuurstofatoom bijvoorbeeld in een stikstofatoom kan veranderen. Eeuwenlang hebben alchemisten tevergeefs geprobeerd om lood in goud te veranderen en met de komst van de kernfysica blijkt dit inderdaad mogelijk te zijn.

Alfastraling

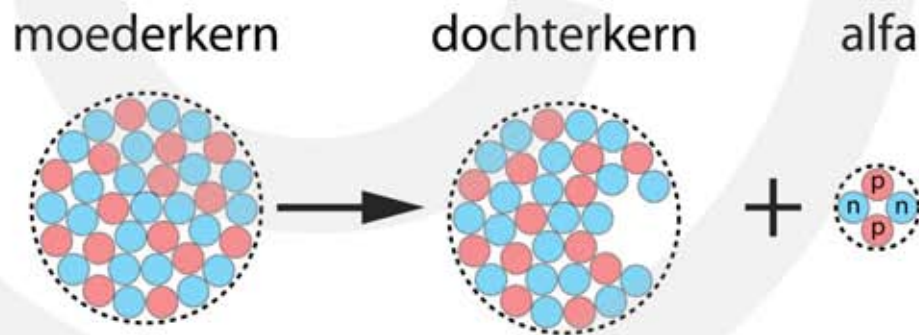
Alfastraling bestaat uit deeltjes met twee protonen en twee neutronen. Het zijn dus **${}^4\text{He}$ -kernen** die worden uitgestoten. Elementen die α -straling uitzenden worden α -stralers genoemd. Bekende voorbeelden zijn polonium (${}^{209}_{84}\text{Po}$), radon (${}^{222}_{86}\text{Rn}$) en uranium (${}^{238}_{92}\text{U}$).



Figuur 4
Een α -deeltje wordt spontaan 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 uraniumkern maar een thoriumkern. De oorspronkelijke kern wordt ook wel de **moederkern** genoemd en het vervalproduct de **dochterkern**.

Figuur 5
 α -verval. Een moederkern 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 wordt als volgt genoteerd.



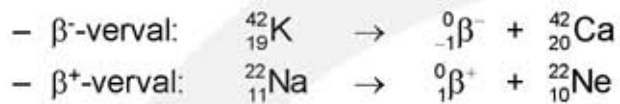
In deze **kernreactie** zijn het massagetal en het aantal protonen van alle deeltjes samen, voor en na de pijl hetzelfde. Dit is eenvoudig te controleren.

- 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.

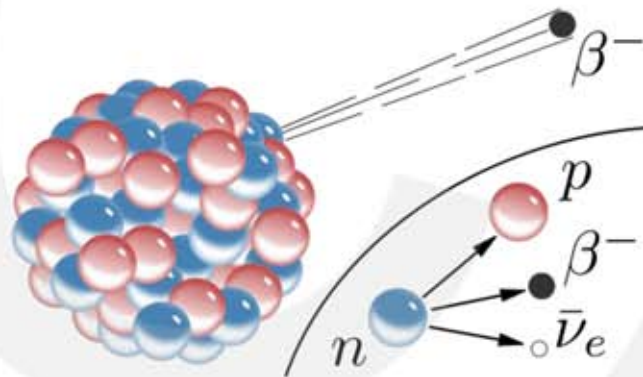
Bètastraling

Bij bètastraling wordt onderscheid gemaakt tussen β^- -straling en β^+ -straling. β^- -straling bestaat uit **elektronen** en β^+ -straling uit **positronen**. Het positron is het **antideeltje** van het elektron. Een positron is even zwaar als het elektron maar heeft een positieve lading (vandaar de naam). Elementen die β^- of β^+ -straling uitzenden worden β -stralers genoemd. Bekende voorbeelden zijn de β^- -straler kalium (${}^{42}_{19}\text{K}$) en de β^+ -straler natrium (${}^{22}_{11}\text{Na}$).

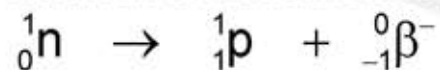


Bij het uitzenden van een β^- -deeltje verdwijnt er nauwelijks massa maar wel negatieve lading uit de kern. Bij het uitzenden van een β^+ -deeltje verdwijnt er positieve lading uit de kern. Behalve een β^- -deeltje of een β^+ -deeltje wordt er ook een **neutrino** $\bar{\nu}_e$ uitgezonden. Een neutrino is een mini-neutron, het lijkt op een ongeladen elektron. Over neutrino's gaan we het in dit hoofdstuk verder niet hebben.

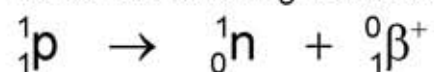
Figuur 6
 Een β^- -deeltje wordt spontaan uitgestoten. Hierbij wordt een neutron omgezet in een proton.



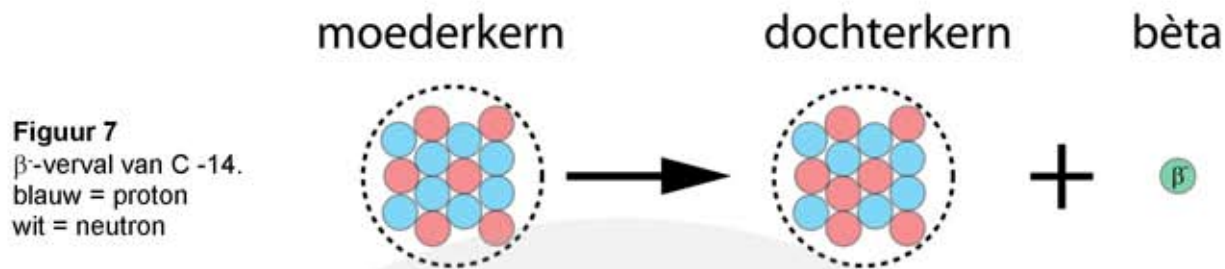
β^- -straling wordt veroorzaakt doordat een neutron wordt omgezet in een proton. Het aantal neutronen in de kern neemt hierdoor met één af en het aantal protonen met één toe. Het atoomnummer van het element wordt groter. β^- -straling treedt op in kernen die teveel neutronen bevatten.



β^+ -straling wordt veroorzaakt doordat een proton wordt omgezet in een neutron. Het aantal neutronen in de kern neemt hierdoor met één toe en het aantal protonen met één af. Het atoomnummer van het element wordt kleiner. β^+ -straling treedt op in kernen die te weinig neutronen bevatten.

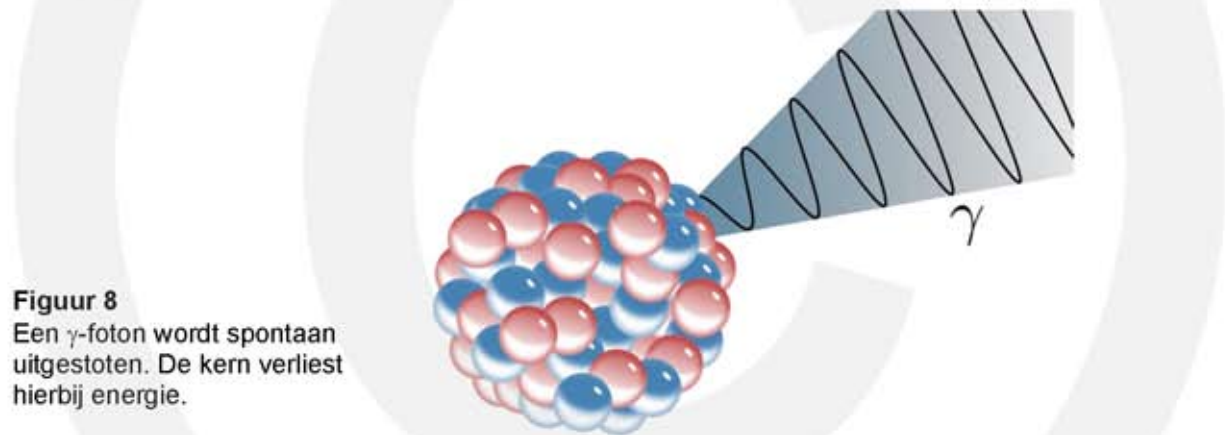


In figuur 7 zie je het β^- -verval van koolstof-14: ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^0_{-1}\beta^- + {}^{14}_7\text{N}$. Een neutron verandert in een proton waardoor de koolstofkern verandert in een stikstofkern.

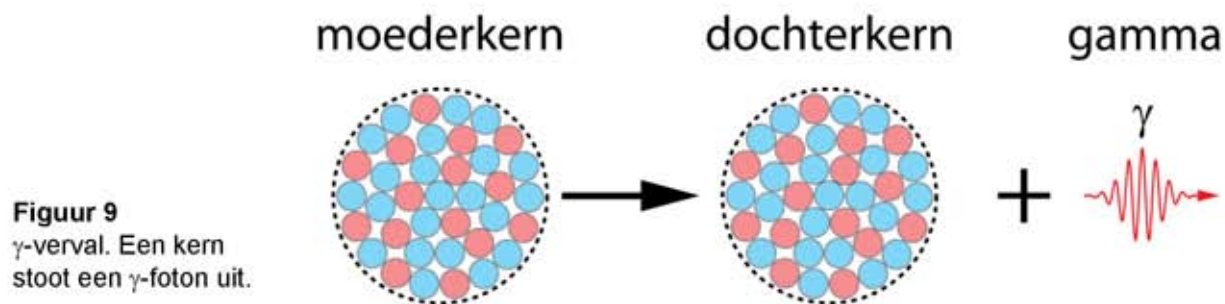
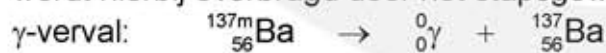


Gammastraling

Gammastraling bestaat uit fotonen (lichtdeeltjes) met hoge energie. Net als de elektronen om de kern kunnen atoomkernen zich in verschillende energietoestanden bevinden. In de **aangeslagen toestand** heeft een atoomkern meer energie dan in de **grondtoestand**. Als een kern zich in een aangeslagen toestand bevindt vervalt het naar de grondtoestand door energie uit te zenden in de vorm van gammafotonen. De energie van een gammafoton is ongeveer een miljoen keer groter dan de energie van zichtbaar licht.



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. Meestal gebeurt dit in enkele stappen. Het energieverschil tussen de aangeslagen toestand en de grondtoestand wordt hierbij overbrugd door het stapsgewijs na elkaar uitstoten van gammafotonen.



9.2 De snelheid van radioactief verval

Halveringstijd

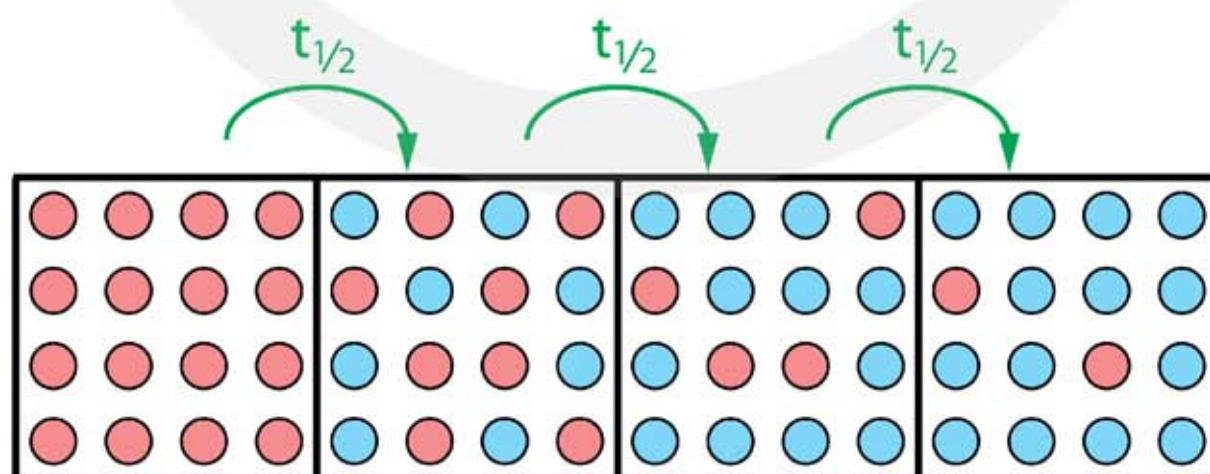
De snelheid waarmee radioactief verval plaatsvindt wordt bepaald door de **halveringstijd**. De halveringstijd $t_{1/2}$ is de tijd waarin de helft van een **grote hoeveelheid** instabiele kernen verval. Dit zegt niets over hoe lang een **individuele** kern leeft. Het is best mogelijk dat een individuele kern veel korter leeft dan de halveringstijd, maar het kan ook veel langer zijn. Er valt niets over de toekomst van een individuele kern te zeggen. Alleen als er een groot aantal instabiele kernen zijn kun je zeggen dat na de halveringstijd de helft van de kernen is vervallen.

Zijn er in het begin N instabiele kernen dan zijn er na een periode $t_{1/2}$ nog $\frac{1}{2}N$ over. Na weer een periode $t_{1/2}$ is opnieuw de helft van de aanwezige kernen vervallen, en zijn er nog $\frac{1}{4}N$ over, etc.

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

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

In figuur 10 is dit proces uitgebeeld. De instabiele kernen zijn in rood aangegeven. Als een instabiele kern verval 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.

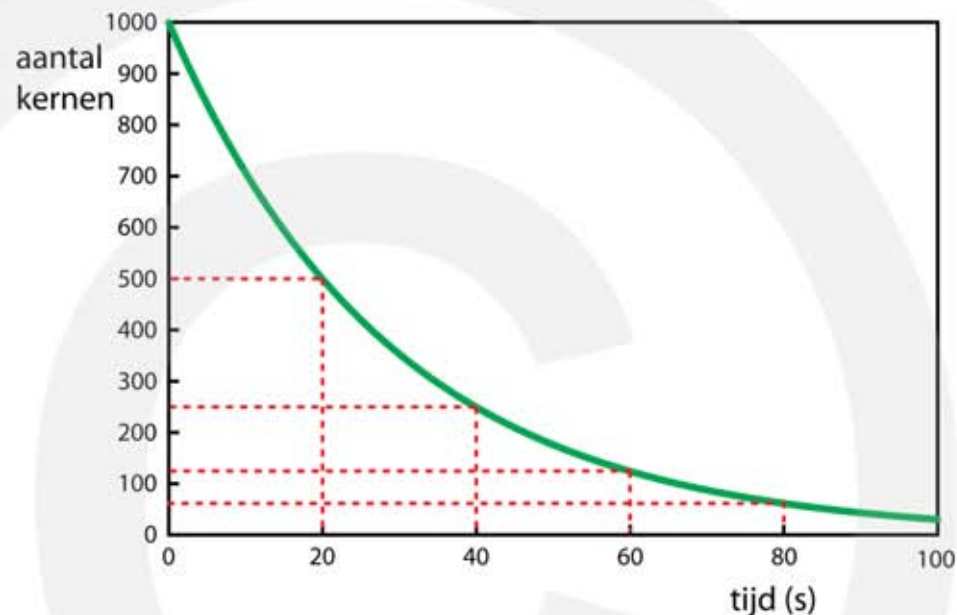


Figuur 10 Radioactief verval. Bij het verval verandert een instabiele kern (rood) in een stabiele kern (blauw). In de halveringstijd $t_{1/2}$ vervalt de helft van het aantal aanwezige instabiele kernen.

We kunnen van dit vervalproces een diagram maken. Op de verticale as staat het aantal aanwezige instabiele 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 seconde zijn er nog 125 over, enzovoort.

Figuur 11
(N, t)-diagram van radioactief verval. Op $t=0$ is zijn er 1000 instabiele kernen. De halveringstijd is 20 seconden.



Met de volgende formule wordt dit proces beschreven.

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

- 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 $t_{1/2}$ moeten in dezelfde eenheid)

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 er na 32 dagen zijn vervallen.

- $32 / 8 = 4$
- in 32 dagen is het aantal aanwezige kernen 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 niet vervallen
- $\frac{1,0 \cdot 10^{15}}{16} = 6,25 \cdot 10^{13}$ kernen zijn er over
- $1,0 \cdot 10^{15} - 6,25 \cdot 10^{13} = 9,375 \cdot 10^{14} = 9,4 \cdot 10^{14}$ 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
- $8 = 2^3$
- het aantal kernen is 3 keer gehalveerd
- dit kost 3 keer de halveringstijd
- 3 keer $t_{1/2} = 3 \cdot 14 = 42$ jaar

Activiteit

De activiteit geeft aan hoeveel atoomkernen er per seconde vervallen.

**De activiteit A is het aantal atoomkernen dat per seconde vervalt.
De eenheid van activiteit is de becquerel (Bq).
1 Bq = 1 atoomkern per seconde.**

De (gemiddelde) activiteit kun je berekenen door het aantal vervallen kernen ΔN te delen door de tijd waarin deze kernen zijn vervallen.

$$A = - \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

- A is de activiteit in becquerel (Bq) (kernen per seconde)
- ΔN is de verandering van het aantal aanwezige kernen (aantal)
- Δt is de tijd waarin deze verandering heeft plaatsgevonden in seconden (s)

Omdat bij ieder atoom dat vervalft een α -, β - of γ -deeltje vrijkomt is de activiteit gelijk aan het aantal α -, β - of γ -deeltjes dat per seconde wordt uitgezonden. Een grote activiteit betekent veel deeltjes per seconde en dus een intense straling. De halveringstijd wordt soms opgegeven in minuten, soms in dagen en soms in jaren. Om de activiteit te berekenen moet je de tijd altijd in seconden invullen.

Bij de berekening van de activiteit moet de tijd in seconden.

Weet je de activiteit op $t=0$ dan kun je met de volgende formule de activiteit voor ieder tijdstip uitrekenen.

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

- 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 $t_{1/2}$ moeten in dezelfde eenheid*)

De activiteit is **recht evenredig** met het aantal aanwezige radioactieve kernen. Als er bijvoorbeeld x keer meer kernen zijn is het aantal kernen dat per seconde vervalft ook x keer groter. De activiteit A, het aantal aanwezige kernen N en het aantal vervallen kernen zijn aan elkaar gerelateerd, zoals duidelijk wordt in onderstaande tabel.

Tijd	$0 \cdot t_{1/2}$	$1 \cdot t_{1/2}$	$2 \cdot t_{1/2}$
A	100 %	50 %	25 %
N	100 %	50 %	25 %
aantal vervallen	0 %	50 %	75 %

Weet je voor een tijdstip het aantal kernen N en de halveringstijd $t_{1/2}$ dan kun je de activiteit op datzelfde tijdstip berekenen. Je gebruikt daarvoor onderstaande formule.

$$A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N$$

- A is de activiteit in becquerel (Bq)
- $\ln 2 = 0,693$ (een vast getal)
- $t_{1/2}$ is de halveringstijd in seconden (s) (**MOET IN SECONDEN**)
- N is het aantal aanwezige instabiele kernen

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

Uit een (N, t)-diagram kun je de activiteit op tijdstip t op twee verschillende manieren bepalen.

- Teken een raaklijn op tijdstip t en bepaal de steilheid van deze lijn.
- Lees het aantal kernen op tijdstip t én de halveringstijd af en gebruik $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N$.

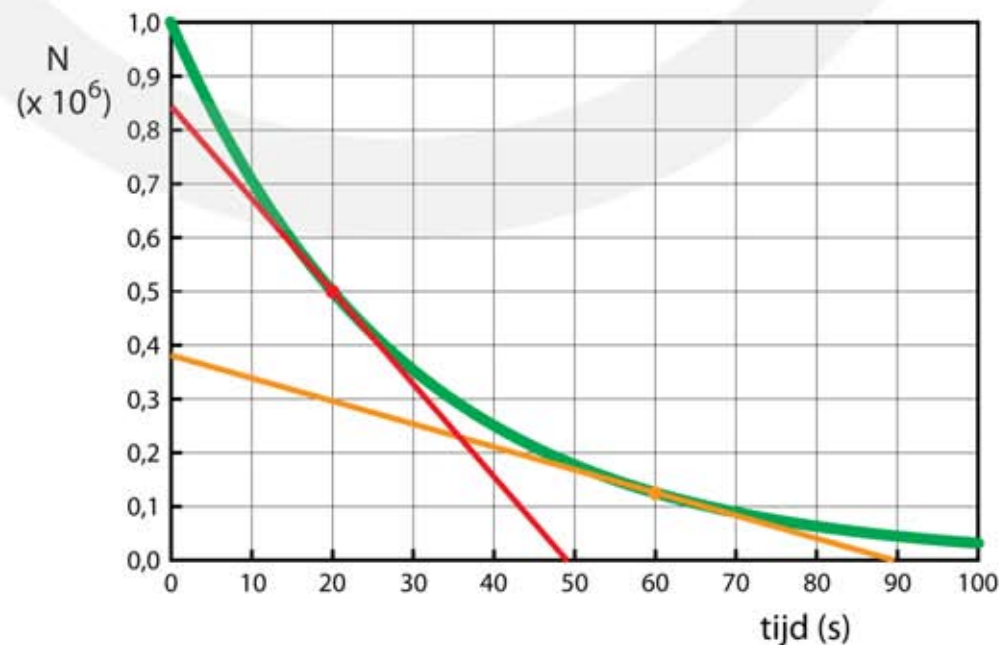
Raaklijn methode

Om de activiteit van een vervalproces op tijdstip t te bepalen moet je de raaklijn tekenen aan de (N,t)-grafiek op tijdstip t en daarvan de steilheid $\Delta N / \Delta t$ berekenen. Hierbij moet je de tijd in seconde invullen.

De activiteit is de steilheid van raaklijn aan een (N, t)-grafiek.

We kijken opnieuw naar het vervalproces van instabiele isotopen met een halveringstijd van 20 seconden. Op $t=0$ zijn er 10^6 kernen aanwezig. In figuur 12 is het (N, t)-diagram gegeven. De activiteit bepaal je door een raaklijn te tekenen en daarvan de steilheid: $\Delta N / \Delta t$ te bepalen, zie figuur 12. 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: $A = \frac{0,84 \cdot 10^6}{49} = 1,7 \cdot 10^4$ Bq (steilheid van rode lijn)
- Activiteit op $t = 60$ s: $A = \frac{0,38 \cdot 10^6}{89} = 4,3 \cdot 10^3$ Bq (steilheid van oranje lijn)



Figuur 12
(N, t)-diagram van radioactief verval. Op $t=0$ is het aantal kernen $1,0 \cdot 10^6$. De halveringstijd is 20.

Afleece methode

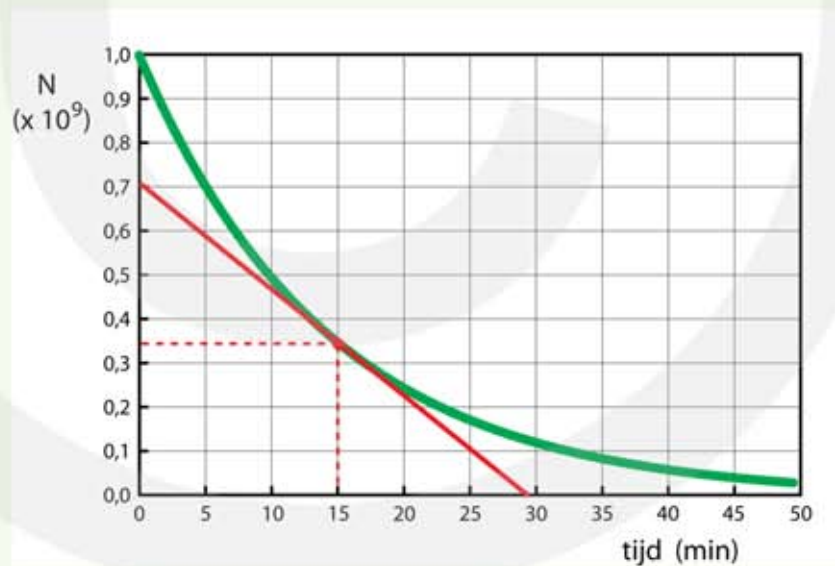
Uit een (N, t)-diagram kun je de activiteit ook bepalen door de halveringstijd en de hoeveelheid aanwezige kernen af te lezen. Vervolgens gebruik je: $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N$

Uitgaande van figuur 12 gaat dit als volgt:

- op $t=0$ is het aantal kernen $1 \cdot 10^6$
- na 20 s is de helft hiervan vervallen en zijn er nog $0,5 \cdot 10^6$ kernen
- de halveringstijd is 20 seconden
- $t = 20 \text{ s}$: $A = \frac{0,693}{20} \cdot 0,5 \cdot 10^6 \rightarrow A = 1,73 \cdot 10^4 \text{ Bq}$
- op $t = 60 \text{ s}$ zijn er $1,25 \cdot 10^5$ kernen ($\frac{1}{8}$ van de oorspronkelijke hoeveelheid)
- $t = 60 \text{ s}$: $A = \frac{0,693}{20} \cdot 1,25 \cdot 10^5 \rightarrow A = 4,33 \cdot 10^3 \text{ Bq}$

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 9,97 minuten.



Figuur 13

Bepaal de activiteit op $t = 15$ minuten met een raaklijn.

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

Bepaal de activiteit op t = 15 minuten door af te lezen.

- aflezen: aantal kernen op t = 15 min is $0,34 \cdot 10^9$
- aflezen: de halveringstijd is 10 minuten
- 10 min = 600 seconden $\rightarrow t_{1/2} = 600$ s

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

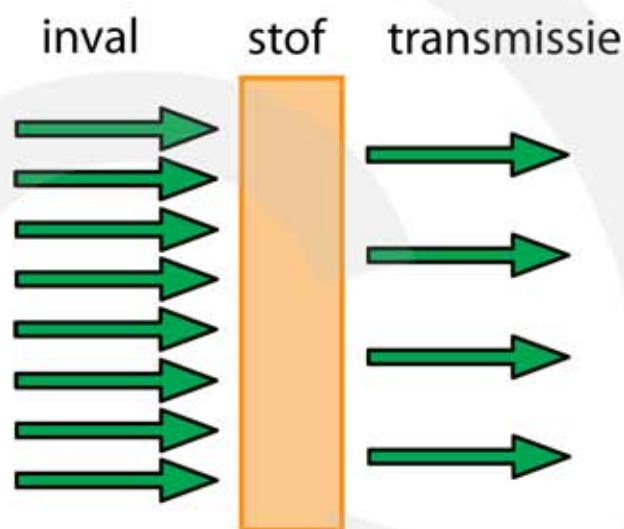
- $A = \frac{0,693}{600} \cdot 0,34 \cdot 10^9 = 3,9 \cdot 10^5$ Bq

9.3 Ioniserende straling

Ioniserend vermogen en doordringend vermogen

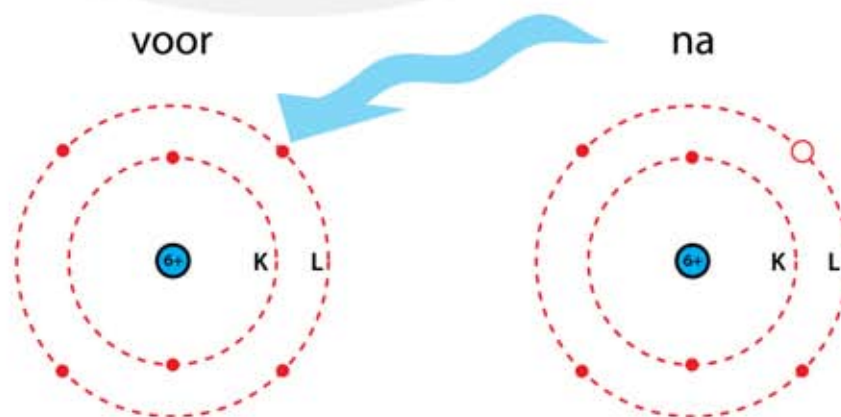
Bestraal je een stof met α -, β - of γ -deeltjes, dan botsen de stralingsdeeltjes tegen de atomen en tegen de elektronen van de stof. Stralingsenergie wordt hierbij overgedragen op de stof. Als de stof dik genoeg is worden alle stralingsdeeltjes door de stof opgenomen. Bij een dun plakje stof wordt een deel opgenomen en gaat de rest er doorheen. Zie figuur 14.

Figuur 14
Een stof wordt bestraald met α -, β - of γ -straling. In de stof botsen de stralingsdeeltjes met de atomen, waarbij een deel van de stralingsenergie wordt opgenomen.



Het overdragen van energie gebeurt als volgt. Een atoom heeft een kleine kern met daaromheen een grote elektronenwolk. Radioactieve straling van α -, β - of γ -deeltjes 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 helemaal los raken 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 15.

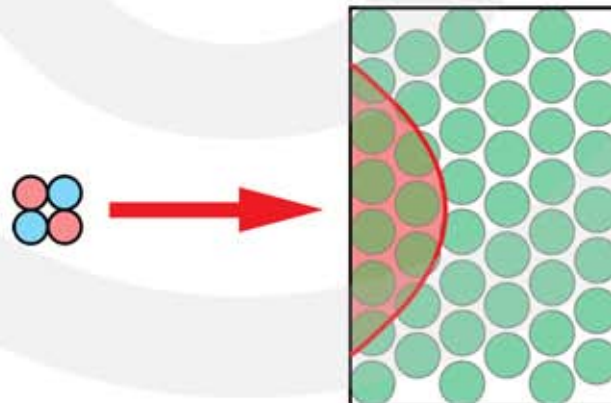
Figuur 15
Door ioniserende straling wordt een elektron losgemaakt van de kern. Het atoom wordt dan een positief geladen ion.



Bij α -, β -, γ -, en röntgenstraling hebben de stralingsdeeltjes ruim voldoende energie om een atoom te ioniseren. De energie van α - en β -deeltjes is gelijk aan de kinetische energie (bewegingsenergie): $E_K = \frac{1}{2}m \cdot v^2$. 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. Dit komt 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 een zichtbaar licht, heeft een γ -foton een miljoen keer meer energie.

Bestraling met α -deeltjes

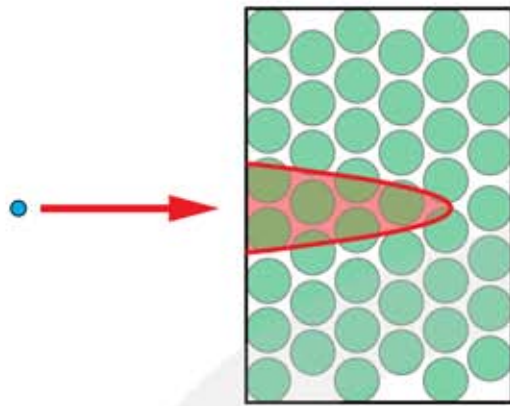
Omdat α -straling uit zware deeltjes (twee protonen + twee neutronen) bestaat en bovendien een dubbele positieve lading heeft is de kans dat ze botsen met atomen in een stof groot. Wordt een bundel α -deeltjes op een stof afgeschoten dan zullen de α -deeltjes snel achter elkaar botsen. Bij iedere botsing verliezen ze energie en wordt er een atoom geïoniseerd. Omdat het α -deeltje op korte afstand al zijn energie verliest kan het niet ver in de stof binnendringen. Het doordringend vermogen is daarom klein. De afstand die een α -deeltje aflegt in een stof wordt de **dracht** genoemd. De dracht van een α -deeltje in lucht is ongeveer 3 - 10 cm. In vaste stof is de dracht van α -deeltjes minder dan een millimeter.



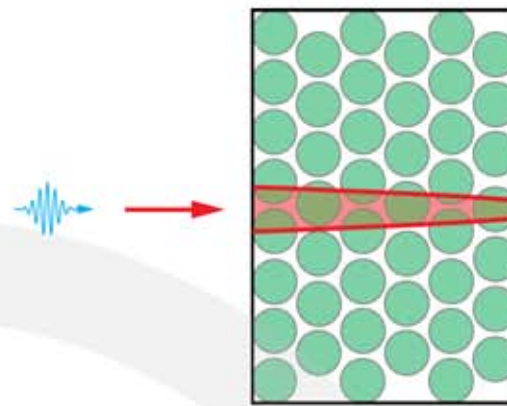
Figuur 16
Bestraling met
 α -deeltjes.

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; ze hebben een grotere dracht dan α -deeltjes. De dracht van een β -deeltje in lucht is enkele meters. Hoewel β -deeltjes verder een stof binnendringen richten ze minder schade aan. Zie figuur 17.



Figuur 17 Bestraling met β -deeltjes.



Figuur 18 Bestraling met γ -fotonen.

Bestraling met γ -fotonen

Net als zichtbaar licht maakt γ -straling, deel uit van het elektromagnetisch spectrum. Gamma-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; ze hebben een grote **indringdiepte**. De indringdiepte van γ -fotonen in lucht is kilometers groot. Zie figuur 18.

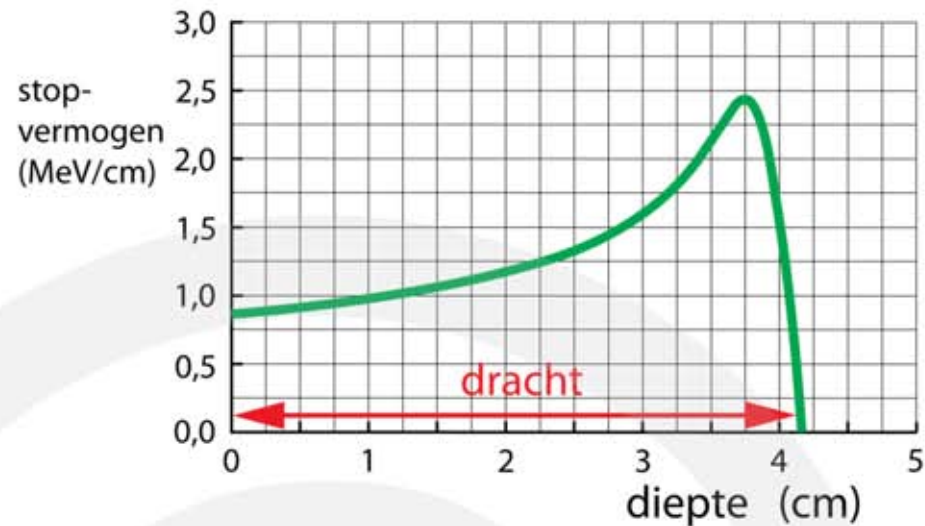
Onderstaande tabel geeft het overzicht over het ioniserend vermogen en het doordringend vermogen van α -, β - en γ -straling.

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

Het doordringend vermogen van α - 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.

Figuur 19
 α -deeltjes met een kinetische energie van 5,49 MeV verliezen in lucht hun energie. Na ongeveer 4 cm staan ze stil.



In figuur 19 zie je hoe α -deeltjes met een kinetische-energie van 5,49 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 kinetische energie (snelheid) verloren en staan ze stil.

Halveringsdikte voor röntgenstraling en gammastraling

Omdat α - en β -straling uit geladen deeltjes bestaan kunnen ze niet zo diep doordringen in een materiaal. Röntgen- en gammafotonen zijn geen geladen deeltjes en dringen veel dieper door in een stof.

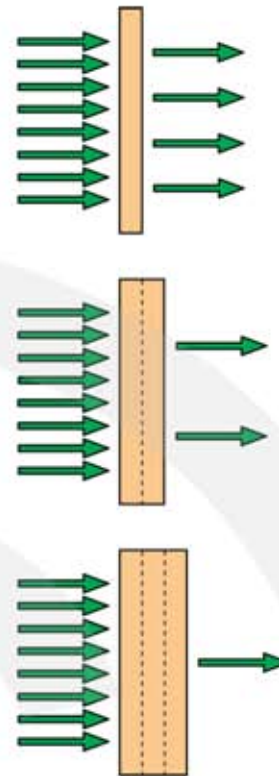
De hoeveelheid doorgelaten **elektromagnetische straling** hangt af van de energie van de fotonen, het soort materiaal en de dikte van het voorwerp. Voor elektromagnetische straling, waartoe röntgen en gammafotonen behoren, kan een halveringsdikte worden gedefinieerd. De **halveringsdikte** $d_{1/2}$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

De halveringsdikte $d_{1/2}$ is de dikte waarbij de helft van de opvallende 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:

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

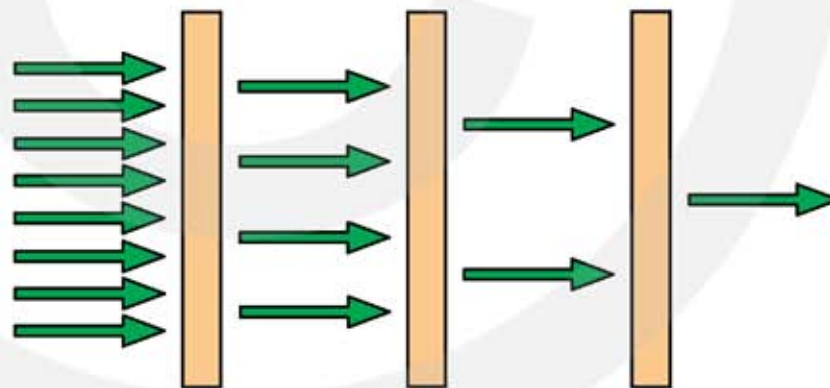
In figuur 20 zie je een plaatje dat wordt bestraald met fotonen. De dikte van het bovenste plaatje is gelijk aan $d_{\frac{1}{2}}$ die bij deze straling hoort. Achter het plaatje is de intensiteit van de straling gehalveerd (= 50%). Het middelste plaatje is twee keer zo dik en heeft dus een dikte van $2 \cdot d_{\frac{1}{2}}$. 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%).



Figuur 20
Het doorlaten van elektromagnetische straling.
Boven $d = d_{\frac{1}{2}}$
Midden $d = 2 \cdot d_{\frac{1}{2}}$
Onder $d = 3 \cdot d_{\frac{1}{2}}$

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 21.

Figuur 21
Elektromagnetische straling passeert drie keer achter elkaar een plaatje met dikte $d_{\frac{1}{2}}$. Er wordt evenveel straling doorgelaten als één plaatje met een dikte $3 \cdot d_{\frac{1}{2}}$.



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

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

- 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: $n = d / d_{\frac{1}{2}}$ (d en $d_{\frac{1}{2}}$ moeten in dezelfde eenheid)

In onderstaande tabel is de **halveringsdikte voor röntgen- en gammafotonen** van enkele materialen gegeven. Het doordringende vermogen is groter bij hogere foton-energie. De halveringsdikte wordt opgegeven in **centimeters** behalve voor lucht waarbij $d_{1/2}$ in meters staat.

Materiaal	0,05 MeV	0,1 MeV	1,0 MeV	2,0 MeV	5,0 MeV	10 MeV
lucht (p_0, T_0)	28 m	37 m	91 m	130 m	208 m	281 m
water	3,08	4,1	9,8	14,1	22,9	31,2
bot	1,08	2,07	5,6	7,9	12,6	16,6
beton	0,75	1,66	4,6	6,6	10,2	12,8
aluminium	0,70	1,51	4,2	6,0	9,0	11,1
ijzer	0,049	0,24	1,5	2,1	2,8	2,9
lood	0,0079	0,0106	0,86	1,34	1,44	1,23

9.4 Detectie van straling

De stralingsbadge

Radioactieve straling kan niet door onze zintuigen worden waargenomen. Vandaar dat er speciale instrumenten zijn ontwikkeld om de aanwezigheid van radioactieve straling te registreren. Deze instrumenten maken gebruik van het ioniserend en doordringend vermogen van de straling.

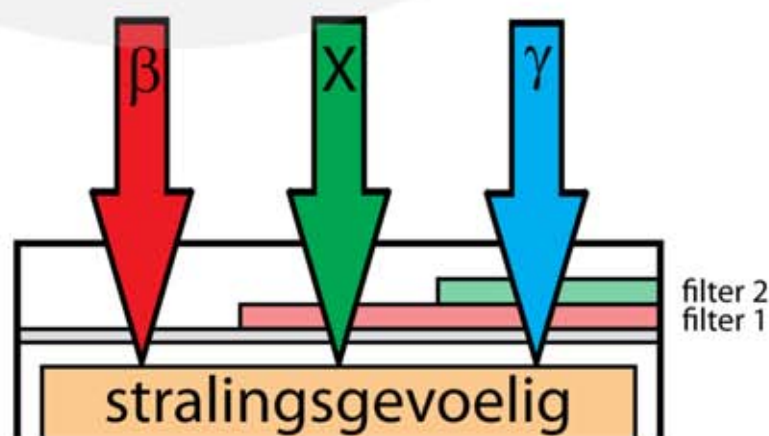
Mensen die in de nabijheid van stralingsbronnen werken moeten altijd een **stralingsbadge** dragen. Hiermee kan worden vastgesteld hoeveel straling iemand gedurende een bepaalde periode heeft gekregen. Omdat de dracht van α -straling in de lucht maar enkele centimeters is heeft het geen zin om een badge 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 over een periode is ontvangen.

Een badge meet de stralingsdosis.

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 onderscheid gemaakt worden tussen verschillende type straling. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het verschil in doordringend vermogen van β -straling, röntgenstraling (x-straling) en γ -straling. In figuur 22 wordt de werking van een stralingsbadge uitgelegd. De badge bevat 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 22
Een stralingsbadge wordt gebruikt om de hoeveelheid straling waaraan iemand is blootgesteld te meten.

Figuur 23
Een stralingsbadge.



De Geiger-Müllerteller

Met een Geiger-Müllerteller (GM-teller) kan de aanwezigheid van radioactieve straling worden gedetecteerd. Als er straling is slaat er een wijzer uit en klinkt er een knetterend geluid. Een GM-teller zegt dus niets over de hoeveelheid straling die in het verleden is ontvangen.

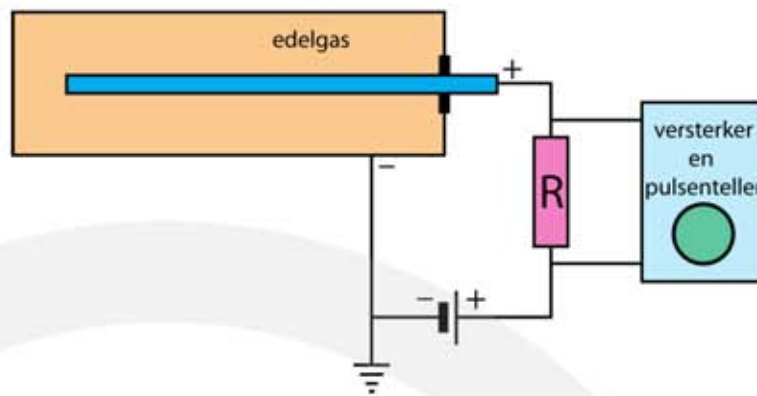
Een GM-teller meet de straling die op dit moment aanwezig is.

Een GM-teller meet de activiteit.

De werking van een GM-teller wordt uitgelegd in figuur 24. Een buisje is gevuld met edelgas onder lage druk. In het buisje bevindt zich een elektrode die op ongeveer 500 volt wordt gebracht. De elektrode en de buitenkant van het buisje zijn door een weerstand R verbonden. De spanning over de weerstand wordt gemeten. De aangelegde spanning is zo gekozen dat het gas nog *nét* niet ioniseert. Bij afwezigheid van radioactieve straling is de elektrische weerstand van het edelgas hoog. Er loopt dan geen stroom door de weerstand en de gedetecteerde spanning $U = I \cdot R$ is nul.

Maar zodra er een radioactief deeltje in het buisje komt wordt de weerstand van het edelgas plotseling kleiner. Dit gebeurt omdat enkele edelgasatomen door het radioactieve deeltje geïoniseerd raken. De losgeslagen elektronen worden aangetrokken door de positieve elektrode en op weg naar de elektrode botsen ze met andere edelgasatomen die daardoor ook geïoniseerd raken. Er ontstaat een lawine van elektronen, waardoor de elektrische weerstand van het gas plotseling veel kleiner wordt. De stroom door weerstand R neemt hierdoor toe en daarmee de gemeten spanning.

Op ieder radioactief deeltje dat het buisje binnen komt volgt een spanningspuls. Iedere keer als een puls wordt waargenomen is er één ioniserend deeltje in het buisje gekomen. Vaak wordt er ook een luidspreker aangesloten, waardoor er bij iedere spanningspuls een korte tik klinkt. Bij veel ionisaties achter elkaar hoor je een knetterend geluid en weet je dat de stralingsintensiteit hoog is.



Figuur 24
Een geigermüllerteller wordt gebruikt om de aanwezigheid van α -, β - en γ -straling te detecteren.

Bèta- en gammastraling kan door de metalen wand heen in het buisje komen. Alfa straling kan niet door de metalen wand. Om een GM-teller toch gevoelig te maken voor α -straling wordt er een venster aangebracht van het materiaal mica. Dit is een soort glas waar α -straling gemakkelijk doorheen kan.



Figuur 25
Geigermüllerteller (GM-teller)

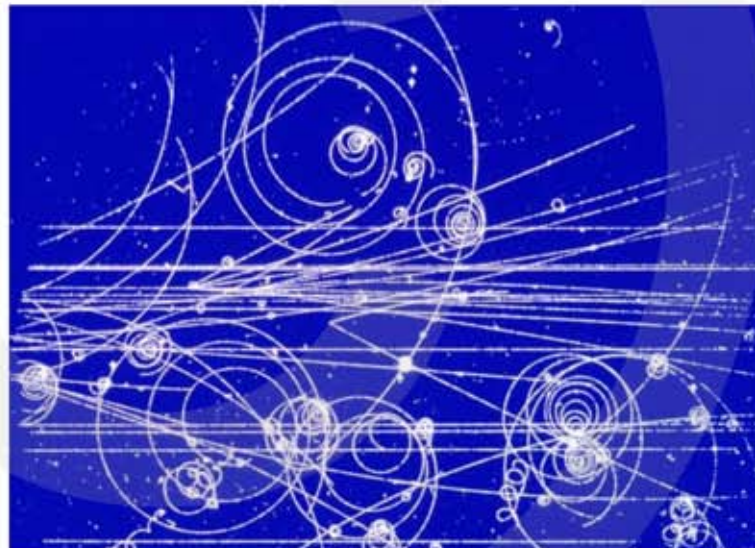
Nevelkamer en bellenkamer

In een nevelkamer en in een bellenkamer kan de baan van een ioniserend deeltje zichtbaar worden gemaakt. Het principe hiervan is hetzelfde als de witte strepen die soms in de lucht ontstaan als er een vliegtuig voorbij komt. De oorzaak van deze strepen is de aanwezigheid van waterdamp in de lucht. Soms is er zoveel waterdamp dat het op het punt staat te condenseren tot waterdruppeltjes. De waterdamp is **verzadigd**. Om de condensatie te starten is een kleine verstoring nodig en het uitlaatgas van een vliegtuig is zo'n verstoring. Waar het vliegtuig voorbij komt ontstaan waterdruppeltjes die het zonlicht verstrooien en als witte strepen zichtbaar zijn. Deze strepen zijn dus niet de uitlaatgassen van het vliegtuig maar waterdruppeltjes die zich om roetdeeltjes in het uitlaatgas hebben gevormd.

In een **nevelkamer**, ook wel Wilsonvat genoemd, gebeurt hetzelfde. In plaats van waterdamp gebruik je een damp van alcohol. De alcohol damp wordt afgekoeld totdat het op het punt staat te condenseren tot alcohol druppeltjes. Komt er een α -, β - of γ -deeltje voorbij dan start op die plaats de condensatie. Het gevolg is een wit spoor op de plaatsen waar het deeltje voorbij komt.

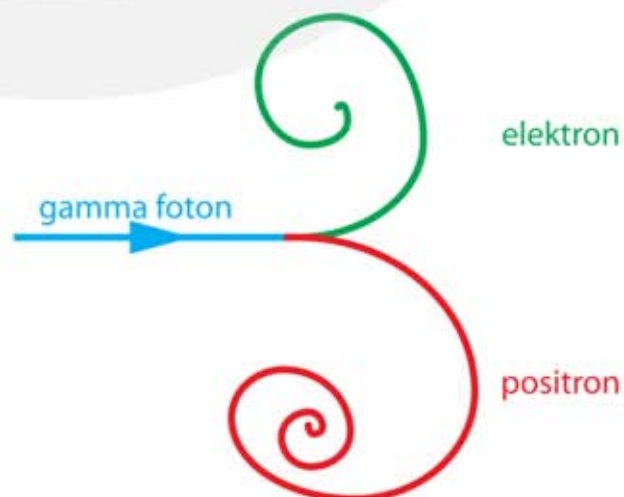
In een **bellenkamer** zit geen gas dat op het punt staat te condenseren, maar een vloeistof dat op het punt staat te verdampen. Komt er een α - , β - of γ -deeltje voorbij dan start op die plaats de verdamping. Er ontstaan dan kleine gasbelletjes. Het gevolg is een wit spoor op de plaatsen waar het deeltje voorbij komt. Meestal wordt er een magnetisch veld aangebracht, waardoor geladen deeltjes, zoals α - β - en β^+ -deeltjes in een cirkelvormige beweging gaan bewegen. Uit de straal van de baan kan de snelheid en de lading van het deeltje worden berekend. Door botsingen verliezen de deeltjes hun kinetische energie. Ze gaan steeds langzamer bewegen, waardoor de straal van de cirkels afneemt. Er ontstaat dan een spiraalvormige baan die eindigt in een punt.

In figuur 26 komen de deeltjes aan de linkerkant de kamer binnen. γ -deeltjes hebben geen lading en bewegen in rechte lijnen totdat ze al hun energie hebben verloren. Deeltjes met een elektrische lading, zoals α - β - en β^+ - deeltjes, bewegen in cirkelbanen. Er zijn banen die linksom en banen die rechtsom draaien. Deze banen horen bij deeltjes met een tegengestelde lading, zoals elektronen en positronen.



Figuur 26
Een foto van verschillende deeltjes in een bellenkamer.

Figuur 27
Het spoor van een gebeurtenis in een bellenkamer. Links komt een gamma-foton de kamer binnen. Op zeker moment verdwijnt het foton en ontstaat er een elektron en een positron. Omdat deze deeltjes een tegengestelde lading hebben, spiralisert het elektron omhoog en het positron omlaag.



9.5 Absorptie van straling door materie

Stralingsdosis

De stralingsdosis is de hoeveelheid **stralingsenergie** die door één kilogram stof is geabsorbeerd. De eenheid van stralingsdosis is de gray, Gy, wat gelijk is aan joule per kilogram J/kg. De **stralingsdosis** is ingevoerd om de schade aan weefsel ten gevolge van radioactieve straling te bepalen.

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

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

VOORBEELD

Een steen met uraniumoxide (isotoop U-238) zendt α -deeltjes uit met een energie van 4,18 MeV = $6,697 \cdot 10^{-13}$ J. Per seconde worden 80 van deze α -deeltjes door een voorwerp van 15 gram geabsorbeerd.

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

- A = 80 deeltjes per seconde
- energie per deeltje is $6,697 \cdot 10^{-13}$ J
- per seconde absorbeert het voorwerp $80 \cdot 6,697 \cdot 10^{-13} = 5,3576 \cdot 10^{-11}$ J
- na 24 uur: $E_{\text{abs}} = 5,3576 \cdot 10^{-11} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 4,629 \cdot 10^{-6}$ J
- $D = \frac{E_{\text{abs}}}{m}$
- stralingsdosis na 24 uur: $\frac{E_{\text{abs}}}{m} = \frac{4,629 \cdot 10^{-6}}{0,015} = 3,086 \cdot 10^{-4} = 3,1 \cdot 10^{-4}$ Gy

Dosisequivalent

Het ioniserende vermogen van een radioactief deeltje hangt niet alleen af van de energie van het deeltje, maar ook van andere factoren zoals de massa en de lading. Een α -deeltje van 4,18 MeV dat wordt geabsorbeerd veroorzaakt 20 keer zoveel ionisaties als een β -deeltje met dezelfde energie. Om hiervoor te corrigeren is de **stralingsweegfactor** ingevoerd met als symbool w_R . De stralingsweegfactor heeft geen eenheid. Het **dosisequivalent** is de stralingsdosis vermenigvuldigd met de stralingsweegfactor w_R .

$$H = w_R \cdot D$$

- H is het dosisequivalent in joule per kilogram (J/kg) = (Sv) (sievert)
- w_R is de stralingsweegfactor (heeft geen eenheid)
- D is de stralingsdosis in joule per kilogram (J/kg) = (Gy) (gray)

één gray (Gy) gecorrigeerd met factor w_R is gelijk aan één sievert (Sv)

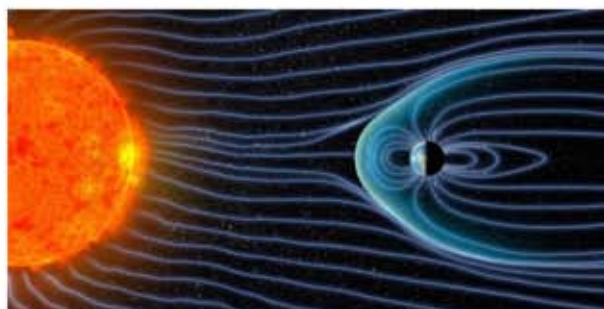
De (stralings)weegfactoren voor α -, β -, γ - en röntgenstraling staan in de tabel hiernaast.

Straling	Weegfactor
α	20
β	1
γ	1
röntgen	1

Biologische effecten van ioniserende straling

Biologisch weefsel wordt beschadigd als het met ioniserende straling in aanraking komt. Door ionisaties worden er moleculen afgebroken en uit de brokstukken kunnen weer nieuwe moleculen worden gevormd. Dit kan schadelijke effecten veroorzaken, zeker als het molecuul in kwestie een DNA molecuul is. Biologische cellen die teveel straling hebben 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.

Er zijn normen vastgelegd voor het dosisequivalent waaraan een persoon jaarlijks mag worden blootgesteld. Dit heet de **stralingsbelasting** en wordt uitgedrukt in millisievert (mSv) per jaar. De aarde ontvangt uit de ruimte voortdurend **kosmische straling**. Een gemiddeld persoon ontvangt hierdoor in Nederland 0,3 mSv aan kosmische straling. Dit is een lage dosis die verder geen schadelijke gevolgen heeft.



Figuur 28 Kosmische straling.



Je staat voortdurend bloot aan ioniserende straling. Per jaar ontvang je ongeveer 1,6 mSv aan ioniserende straling door kosmische straling en door natuurlijke bronnen uit de omgeving. Daar bovenop ontvang je gemiddeld zo'n 0,8 mSv per jaar door röntgenstraling voor medische diagnostiek. Het totaal van 2,6 mSv per jaar is zo weinig dat je lichaam in staat is om de opgelopen schade aan het weefsel te repareren. Een gezond lichaam heeft immers een goed ontwikkeld herstellend vermogen, zodat de kapotte chemische bindingen snel worden gerepareerd. Als de stralingsdosis veel groter is, bijvoorbeeld duizend keer zo groot, dan is je lichaam niet meer in staat om alle schade te herstellen en heb je een grote kans dat je afweermechanisme onherstelbaar wordt beschadigd en je na enige tijd overlijdt. Bij een stralingsdosis van 50 sievert overlijdt je al na een paar dagen.

In Nederland is de wettelijke **stralingsbelastingsnorm** voor een volwassene is 1 mSv per jaar. Werk je beroepshalve met stralingsbronnen, dan is de wettelijke norm 20 mSv per jaar.

Onderstaande tabel geeft een indruk van de stralingsbelasting die je oploopt.

Bijdrage uit	Stralingsbron	milli-sievert (mSv)
Leefomgeving	kosmische straling	0,3 / jaar
	bodem	0,2 / jaar
	water en voedsel	0,4 / jaar
	lucht	0,3 / 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	0,1 / 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	1,2 / keer
	CT-scan lichaam	1,2 / keer

Radioactieve besmetting

Radioactieve α -, β - en γ -straling blijft niet in het lichaam zitten. Geabsorbeerde alfadeeltjes nemen elektronen op en worden onschadelijke heliumatomen, bètadeeltjes zijn elektronen en gammastraling is energie. Maar als er radioactief materiaal in je lichaam komt, bijvoorbeeld door het eten van besmet voedsel, dan word je voortdurend van binnenuit bestraald. Je spreekt dan van **radioactieve besmetting**. Er zijn speciale medische behandelingen waarbij een radioactieve stof wordt toegediend. Gedurende een bepaalde tijd word je dan van binnenuit bestraald.

9.6 Kernreacties

Spontane en gestimuleerde reacties

Er zijn drie soorten kernreacties: spontane reacties, gestimuleerde reacties en K-vangst. Spontane reacties gebeuren zonder aanwijsbare oorzaak. Zonder reden zendt een atoomkern een α - een β -, of een γ -deeltje uit.

Gestimuleerde reacties gebeuren als de kern wordt beschoten met protonen, neutronen, elektronen of positronen. Stel dat een kern wordt beschoten door neutronen, dan kunnen één of meer neutronen met de kern versmelten. De instabiele kern die hierbij ontstaat heeft teveel neutronen en valt uit elkaar, waarbij twee nieuwe kernen ontstaan.

spontane reacties	→	er is geen aanwijsbare oorzaak
gestimuleerde reacties	→	de kern wordt beschoten
K-vangst	→	K-schil elektron wordt opgenomen in de kern

Behoud van massagetal en behoud van elektrische lading

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

Behoud van massagetal → de som van de massagetallen verandert niet.

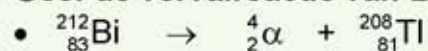
Behoud van elektrische lading → de som van de ladingsgetallen verandert niet.

$$\text{massagetal begin} = \text{massagetal eind}$$

$$\text{lading begin} = \text{lading eind}$$

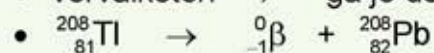
VOORBEELD spontaan verval

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



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

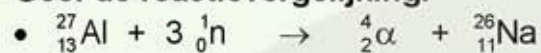
• vervalketen → ga je door tot er een stabiel isotoop ontstaat.



VOORBEELD gestimuleerde reactie

We beschieten een Al-27 kern met neutronen. Drie neutronen versmelten met de kern Al-27 kern die daarna uiteen valt 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**.

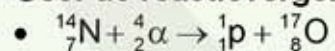
Protonstraling → bij een kernreactie komen protonen vrij.

Neutronstraling → bij een kernreactie komen neutronen vrij.

VOORBEELD protonstraling

We beschieten een N-14 kern met een α -deeltje. Hierbij komt protonstraling vrij.

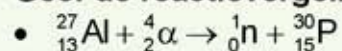
Geef de reactievergelijking.



VOORBEELD neutronstraling

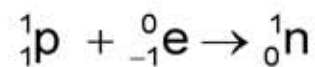
We beschieten een Al-27 kern met een α -deeltje. Hierbij komt neutronstraling vrij.

Geef de reactievergelijking.



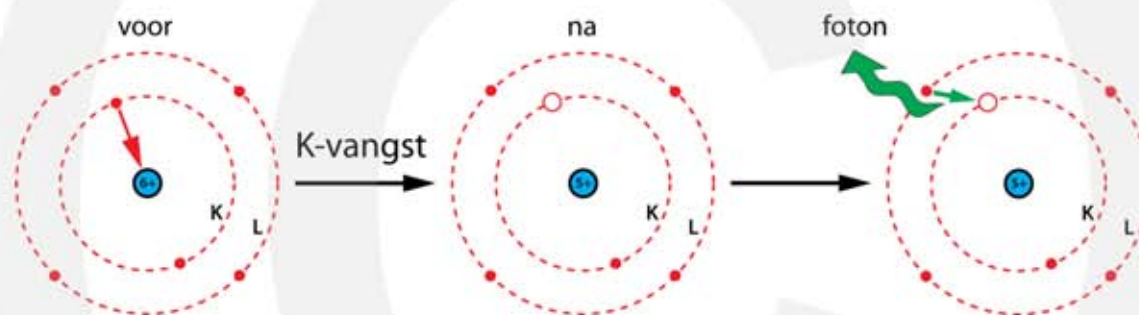
K-vangst

K-vangst is het proces waarbij een elektron spontaan uit de K-schil wordt opgenomen in de kern. Hierbij wordt een proton veranderd in een neutron, waardoor de kern stabiel wordt.



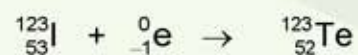
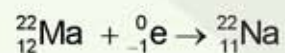
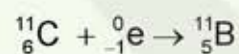
Door K-vangst ontstaat er een gat in de K-schil. Een elektron uit een hogere schil valt terug in deze lege plaats, waarbij röntgenstraling wordt uitgezonden.

K-vangst treedt op in C-11 atomen. In de kern van een C-11 atoom bevinden zich 6 protonen en 5 neutronen. Door het invangen van een elektron uit de K-schil neemt het aantal protonen met één af en het aantal neutronen met één toe. Het resultaat is een B-11 atoom met 5 protonen en 6 neutronen. Een elektron uit een hogere schil vult het gat in de K-schil op, waarbij een röntgenfoton wordt uitgezonden.



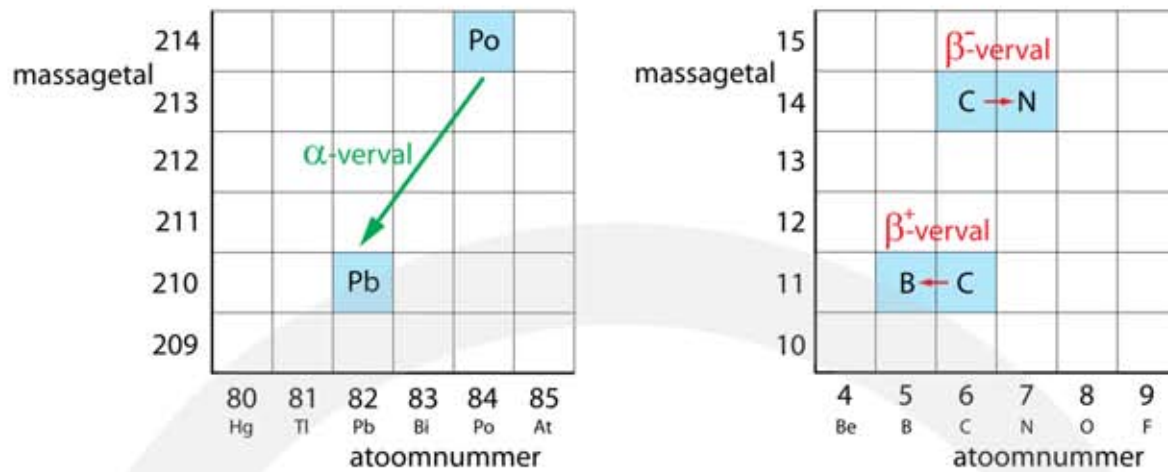
Figuur 29 K-vangst in een C-11 atoom.

VOORBEELDEN K-vangst



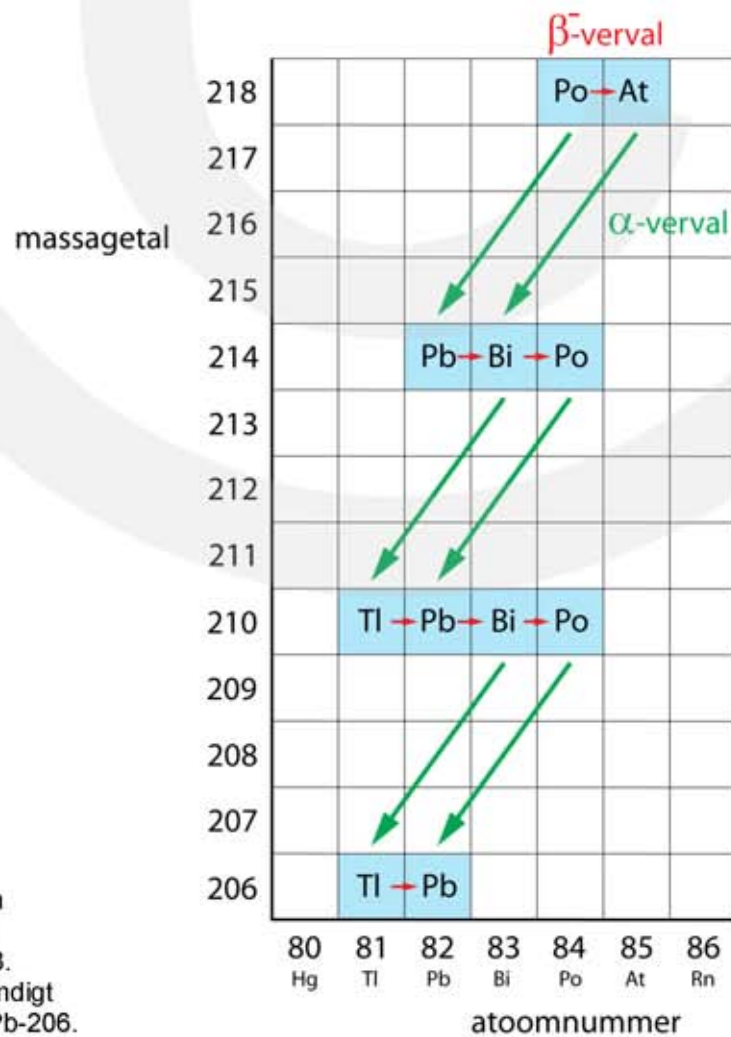
Het (massagetal, atoomnummer)-diagram

Een overzichtelijke manier om spontane kernreacties weer te geven is het (massagetal, atoomnummer)-diagram. Omdat het massagetal wordt aangegeven met letter A en het atoomnummer met letter Z wordt dit ook een (A, Z)-diagram genoemd. In dit diagram staat massagetal op de verticale as en het atoomnummer op de horizontale as. In figuur 30 zie je hoe het α -verval en het β -verval in een (A, Z)-diagram wordt weergegeven.



Figuur 30 Het (massagetal, atoomnummer)-diagram met α -verval en β^- -verval en β^+ -verval.

Het (A, Z)-diagram is vooral handig als er een keten van vervalprocessen plaatsvindt. In figuur 31 zie je hoe Po-218 vervalft naar Pb-206. Het proces bestaat uit verschillende stappen en verschillende routes, waarbij steeds een α -deeltje of een β^- -deeltje wordt uitgezonden. Bij sommige stappen wordt er ook een γ -foton uitgezonden, maar dat is in het (A, Z)-diagram niet aangegeven.



Figuur 31
Het (A, Z)-diagram van het spontane verval van Po-218. De vervalketen eindigt met het stabiele Pb-206.

9.7 Massa en energie

Equivalentie van massa en energie

Bij de uitwerking van de speciale relativiteitstheorie ontdekt Albert Einstein min of meer bij toeval de formule $E = m \cdot c^2$. Deze formule is één van de belangrijkste uit de natuurkunde. De formule legt een relatie tussen de grootheden massa en energie. Massa correspondeert met een hoeveelheid energie. Massa en energie kunnen in elkaar worden omgezet. Als massa verdwijnt ontstaat er energie en als er energie verdwijnt ontstaat er massa.

$$E = m \cdot c^2$$

- E is de energie in joule (J)
- m is de massa in kilogram (kg)
- c is de lichtsnelheid in meter per seconde (m/s) ($c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s)

Omdat we bij kernreacties vaak werken met de elementaire massa eenheid u in plaats van met kg is het handig om te weten dat 1 u aan massa correspondeert met 931,49 MeV aan energie.

Bij kernreacties die spontaan verlopen komt altijd energie vrij. Bij spontane kernreacties is de totale massa vóór de reactie altijd groter dan de totale massa na de reactie. Bij de reactie wordt er dus massa omgezet in energie. Het verdwijnen van massa heet het **massadefect**.

Massadefect → massa wordt omgezet in energie.

Bindingsenergie van een atoomkern

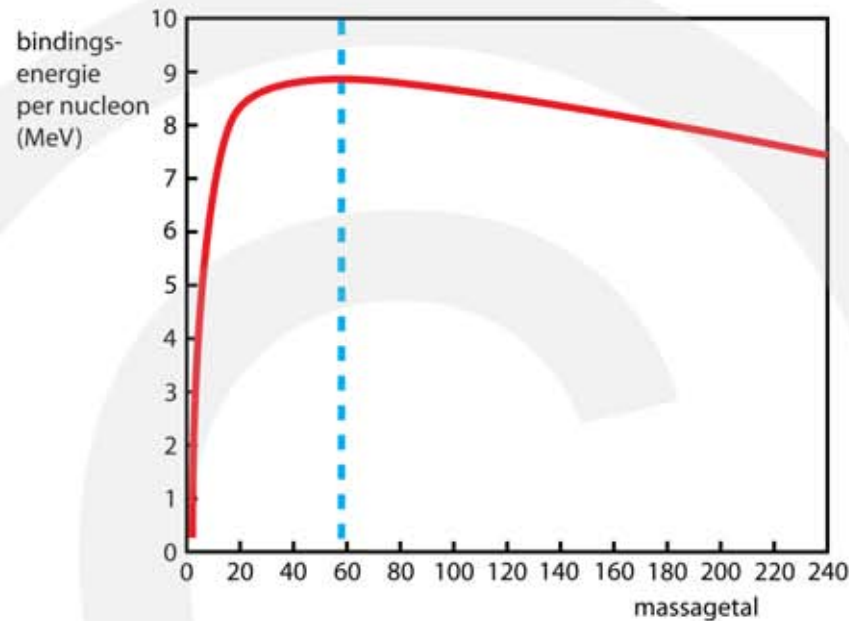
De ontstane energie kan worden gebruikt om de kern stabiel te maken. Massa is dan omgezet in **bindingsenergie**. De **bindingsenergie** is de energie die nodig is om een kern te splitsen in losse protonen en losse neutronen. Hoe meer bindingsenergie, hoe steviger de kern in elkaar zit.

De bindingsenergie is de energie die nodig is om een kern te splitsen in losse protonen en losse neutronen.

Bereken je de bindingsenergie per kerndeeltje (nucleon) dan vind je dat dit verschillend is voor de verschillende atomen. De bindingsenergie per nucleon is afhankelijk van het massagetal. Lichte atoomkernen en zware atoomkernen hebben

weinig bindingsenergie per nucleon. Bij kernen met massagetal tussen 60 – 80 is de bindingsenergie het grootst. Deze kernen hebben de grootste stabiliteit.

In figuur 32 zie je het diagram met op de verticale as de bindingsenergie per nucleon en op de horizontale as het massagetal. Het ijzer-isotoop met massagetal 56 heeft de meeste bindingsenergie per nucleon en heeft daardoor de grootste stabiliteit.

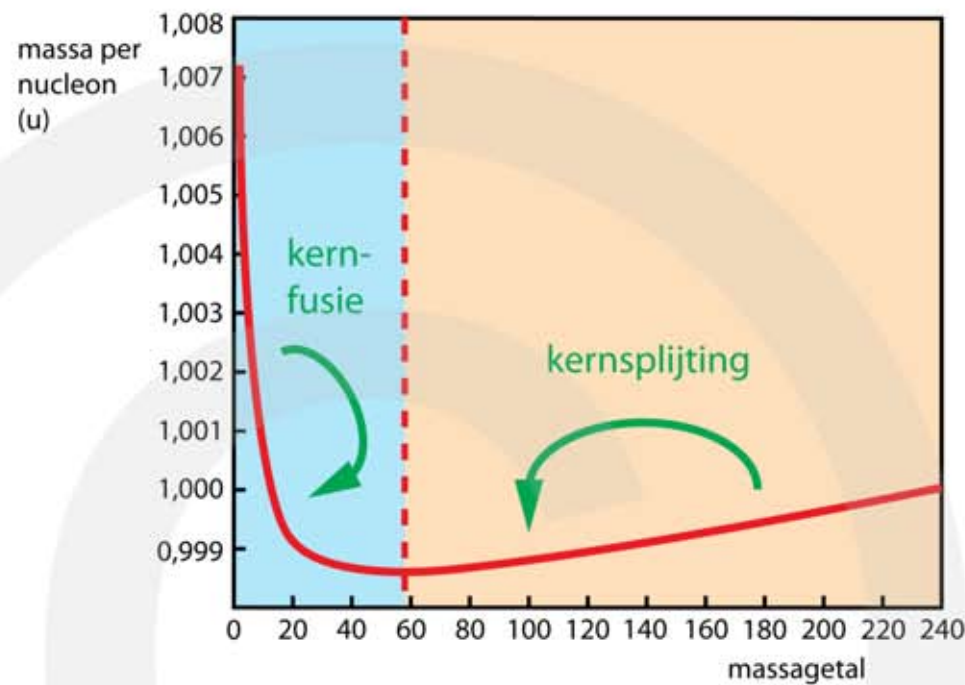


Figuur 32
 Bindingsenergie per kerndeeltje.

Omdat $E = m \cdot c^2$ correspondeert een toename van de bindingsenergie met een afname van de massa. Van een atoom kunnen we de massa van de kern delen door het aantal kerndeeltjes en vinden dan de massa per nucleon. We kunnen deze verhouding ook uitrekenen voor andere isotopen. Het resultaat van deze berekening vind je in onderstaande tabel.

atoom	kernmassa (u)	kerndeeltjes	massa per kerndeeltje (u)
${}^1_1\text{H}$	1,00728	1	1,00728
${}^2_1\text{H}$	2,01355	2	1,00678
${}^4_2\text{He}$	4,00151	4	1,00038
${}^{12}_6\text{C}$	11,99671	12	9,99726
${}^{56}_{26}\text{Fe}$	55,92068	56	0,99858
${}^{208}_{82}\text{Pb}$	207,93165	208	0,99967
${}^{238}_{92}\text{U}$	238,00031	238	1,00000

Op basis van deze tabel kunnen we een diagram maken met op de verticale as de massa per nucleon, uitgedrukt in u, en op de horizontale as het massagetal. In figuur 33 zie je het resultaat. De gebieden waar kernfusie en kernsplijting energie opleveren zijn aangegeven.



Figuur 33
Massa per kerndeeltje.

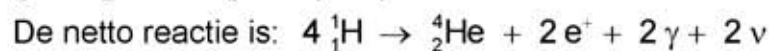
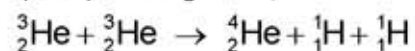
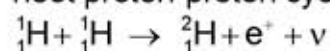
Kernfusie en kernsplijting

Als twee lichte kernen met elkaar samensmelten tot een grotere kern neemt de massa per nucleon af en ontstaat er energie. Dit gebeurt in het blauwe gebied in figuur 33. Het samensmelten van kleine kernen heet **kernfusie**. Kernfusie levert energie op zolang het massagetal van de kern die ontstaat minder dan 56 is.

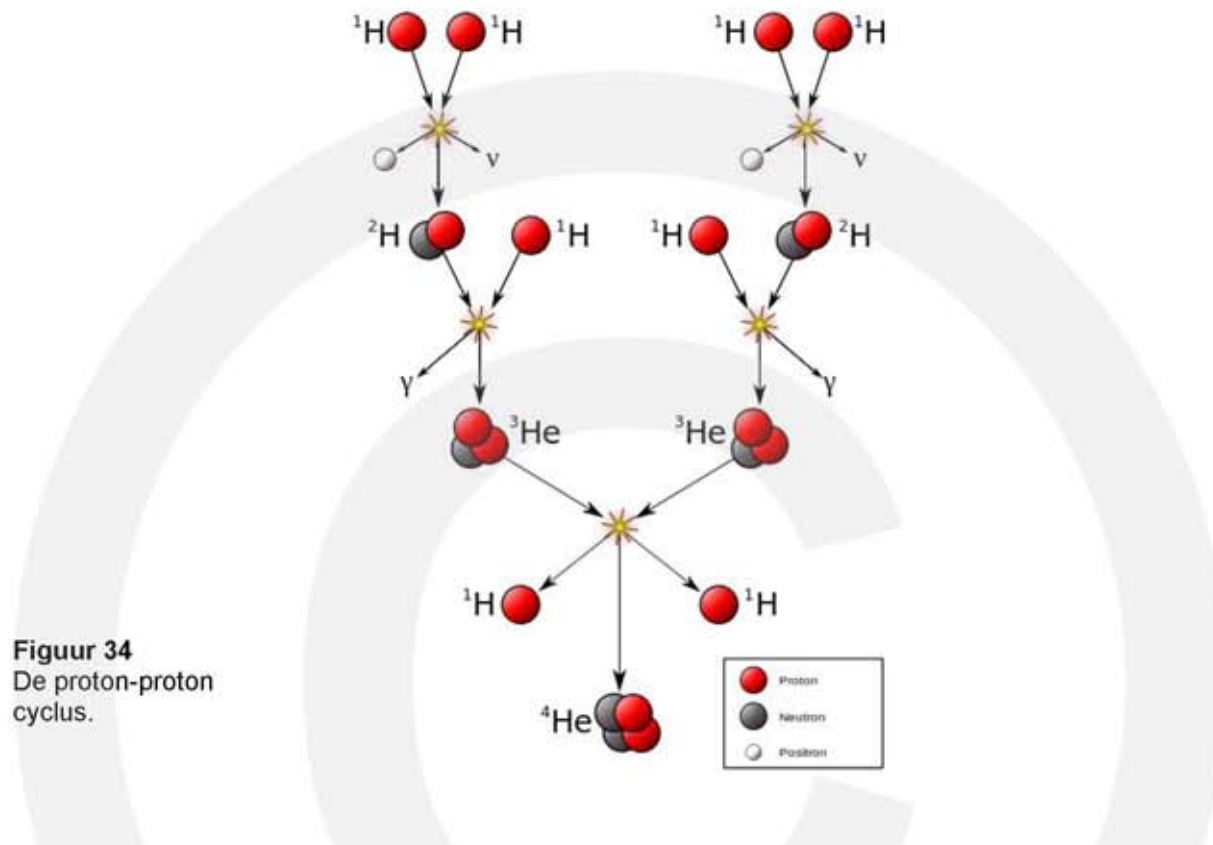
Als een grote atoomkern wordt gesplitst in twee kleinere kernen neemt de massa per nucleon ook af en ontstaat er ook energie. Dit gebeurt in het oranje gebied in figuur 33. Het splitsen van grote kernen heet **kernsplijting**. Kernsplijting levert energie op zolang de kernen die ontstaan een massagetal van meer dan 56 hebben.

Kernfusie in een ster

Een ster, zoals de zon, straalt een grote hoeveelheid energie uit. Deze energie ontstaat doordat protonen onder hoge druk en temperatuur in een aantal stappen met elkaar fuseren tot helium. De oppervlakte van de ster krijgt hierdoor een hoge temperatuur en gaat zichtbaar licht uitstralen. Het fusieproces gaat in drie stappen en heet proton-proton cyclus:



Vier protonen smelten samen en vormen één He-4 kern. Verder ontstaan er twee positronen (e⁺-deeltjes), twee gamma-fotonen en twee neutrino's (ν-deeltjes). In figuur 34 zie je een schematische weergave van de proton-proton cyclus.



Figuur 34
De proton-proton
cyclus.

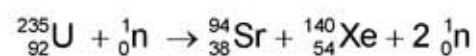
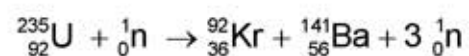
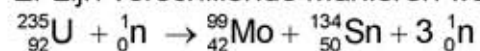
Splijting van uranium-235 in een kerncentrale

Om een uranium-235 kern te splijten moet deze eerst in een aangeslagen toestand worden gebracht. Dit gebeurt door de kern te beschieten met neutronen. De kinetische energie van de neutronen moet binnen bepaalde grenzen liggen. Hebben de neutronen te weinig of te veel kinetische energie dan treedt er geen kernsplijting op.

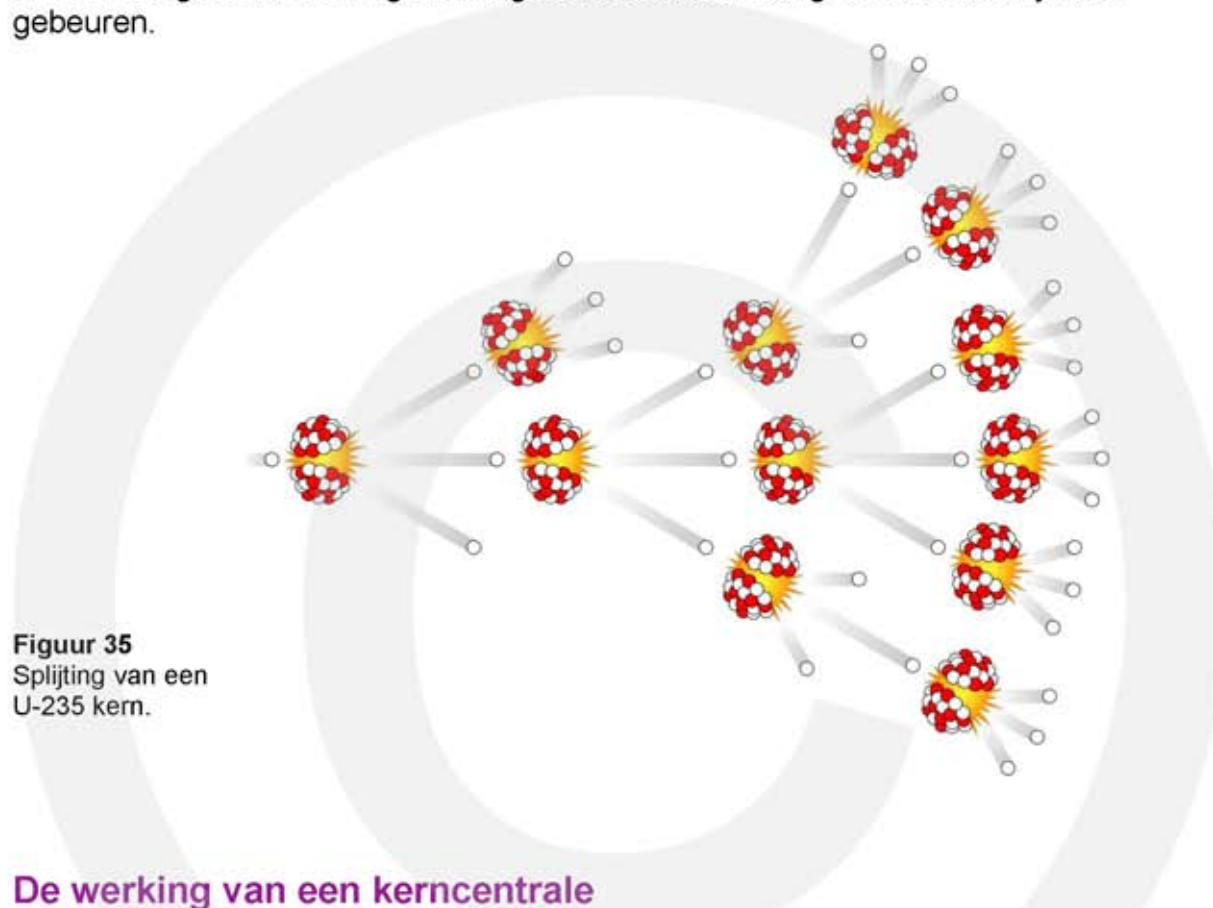
Bij de splijting van U-235 gebeurt het volgende:

- Een U-235 kern wordt beschoten door een neutron.
- Het neutron wordt in de U-235 kern opgenomen en er ontstaat een instabiele U-236 kern.
- De U-236 kern valt uiteen in twee middelzware kernen en twee of drie neutronen.

Er zijn verschillende manieren waarop de U-236 kern kan splitsen.



Bij iedere reactie komen er meer neutronen vrij dan het gekost heeft om de reactie op gang te brengen. De vrijkomende neutronen kunnen een nieuwe kernsplijting veroorzaken. Er ontstaat een **kettingreactie**. Omdat er meer neutronen ontstaan dan er worden opgenomen kan de kettingreactie ontaarden in een **sneeuwbaaleffect**, waarbij de reactiesnelheid explosief toeneemt. Een atoombom is hierop gebaseerd. In een energiecentrale mag een ongecontroleerde kettingreactie natuurlijk niet gebeuren.

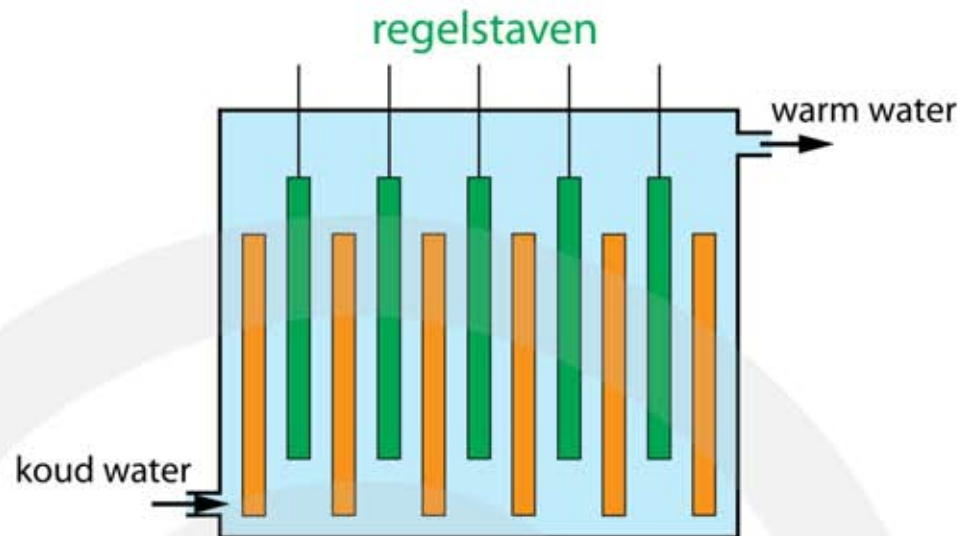


De werking van een kerncentrale

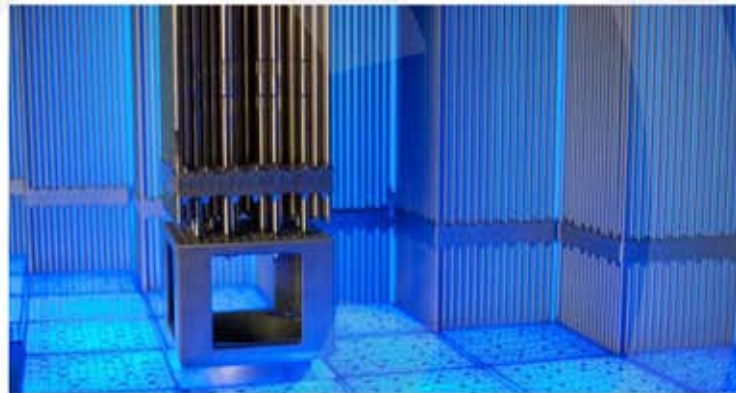
In een kerncentrale wordt elektrische energie opgewekt door U-235 kernen te splijten. Uraniumoxide UO_2 wordt als delfstof gewonnen en chemisch bewerkt tot zuiver uranium metaal. Dit heeft een samenstelling van 99,28% U-238, 0,72% U-235 en 0,0006% U-234. Om als brandstof in een kerncentrale te dienen moet het percentage U-235 tenminste 4% zijn. Vandaar dat het uranium eerst wordt **verrijkt**. Met behulp van zeer snel roterende centrifuges wordt het U-235 gescheiden van U-238. Op deze manier worden **brandstofstaven** gemaakt met een samenstelling van 96% U-238 en 4% U-235. Deze brandstofstaven worden geplaatst in een kernreactor. Om de splijtingsreacties op gang te brengen worden ze eenmalig kort beschoten met neutronen afkomstig van een externe bron.

Bij splijting van U-235 kernen komen hoog-energetische neutronen vrij die een kettingreactie kunnen veroorzaken. Door tussen de uranium brandstofstaven **regelstaven** te plaatsen, die ondoordringbaar zijn voor neutronen, kan de kettingreactie worden gecontroleerd. Tijdens het normale bedrijf van een kernreactor mag het aantal neutronen dat beschikbaar komt voor een nieuwe reactie niet toe of afnemen. Dit kan bereikt worden door de regelstaven verder of minder ver tussen de brandstofstaven te schuiven.

Figuur 36
Reactorvat van een kerncentrale. Met brandstofstaven (oranje) en regelstaven (groen).

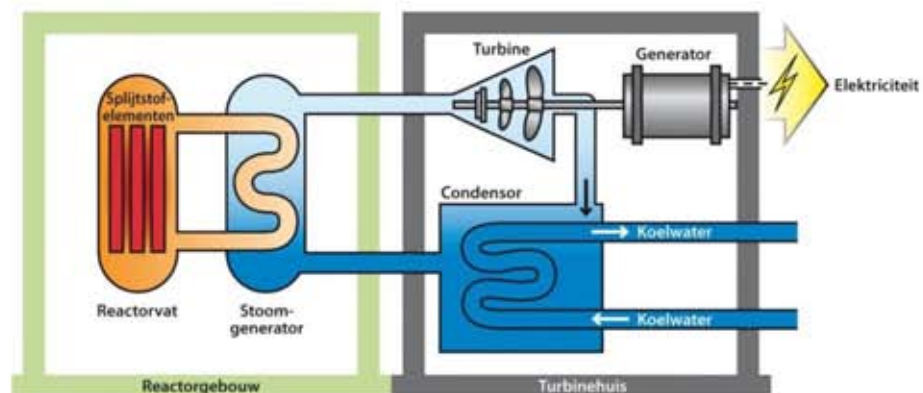


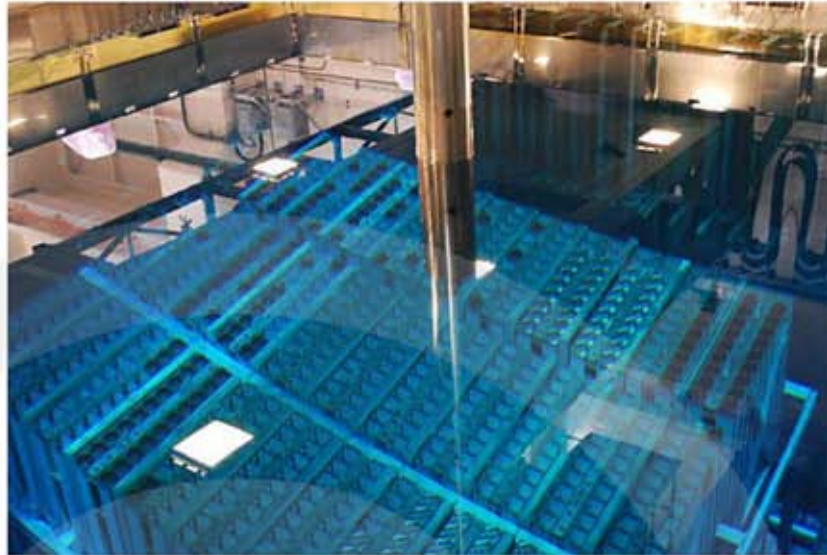
Figuur 37
Brandstofstaven en regelstaven.



De vrijkomende neutronen hebben te veel kinetische energie om een kettingreactie te veroorzaken. Ze moeten eerst worden afgeremd. Dit gebeurt door tussen de brandstof- en regelstaven een **moderator** aan te brengen. Meestal wordt water als moderator gebruikt. De brandstof- en regelstaven worden onder water geplaatst. De vrijkomende neutronen botsen met de protonkernen in het water, waarbij ze het grootste deel van hun kinetische energie verliezen. Dit energieverlies wordt omgezet in warmte. Hierdoor neemt de temperatuur van het water toe en door het water rond te pompen wordt de warmte via een stoomgenerator afgevoerd naar een stoomturbine. Deze drijft op zijn beurt een generator aan die elektriciteit produceert.

Figuur 38
De werking van een kerncentrale.





Figuur 39
Reactorvat van een kerncentrale.

In een kerncentrale vinden de volgende energieomzettingen plaats:

- kernenergie (U-235) →
- warmte (stoom) →
- beweging (turbine) →
- elektriciteit (generator)

Tijdens de kernreactie komen behalve neutronen ook α -, β - en γ -deeltjes vrij. Om er voor te zorgen dat deze straling wordt afgevangen wordt het reactorvat in zijn geheel (brandstofstaven, regelstaven en koelwater) in een groot waterbassin geplaatst. De vrijkomende β -deeltjes en neutronen worden door het water in het bassin afgeremd. De β -deeltjes veroorzaken hierbij blauw licht, bekend onder de naam **cherenkovstraling**. Zie figuur 39.

Als de U-235 van de reactorstaven is verbruikt moeten er nieuwe staven worden geplaatst. De oude staven zijn radioactief afval en omdat de halveringstijd van sommige reactieproducten lang is moet het radioactief afval voor duizenden jaren veilig worden opgeborgen.



Figuur 40
Radioactief afval.