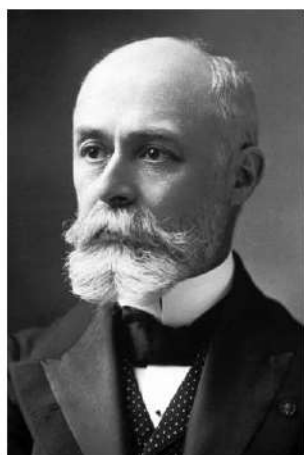


14 Kernfysica

vwo

14.0 Inleiding

Snel nadat **Wilhelm Conrad Röntgen** (1845–1923) in 1896 de door hem ontdekte x-stralen publiceert legt **Henri Becquerel** (1852–1908) een verband tussen deze x-stralen en de straling die spontaan wordt uitgezonden door uraniumzouten. Ook van deze straling heeft op dat moment niemand een idee waar het vandaan komt en wat de eigenschappen zijn. **Maria Salomea Skłodowska** (1867–1934), die bekend is onder de naam **Marie Curie**, is net op zoek naar een onderwerp om op te promoveren en besluit om de uraniumzouten te gaan onderzoeken. Met behulp van de elektrometer die haar man **Pierre Curie** (1859–1906) heeft uitgevonden komt ze erachter dat de lucht om uraniumzout elektrisch geleidend is en dat de activiteit van een uraniumverbinding alleen afhankelijk is van de hoeveelheid uranium. Ze bedenkt dat de straling afkomstig moet zijn van het uraniumatoom en niet afkomstig van een chemische reactie.



Henri Becquerel



Marie Curie

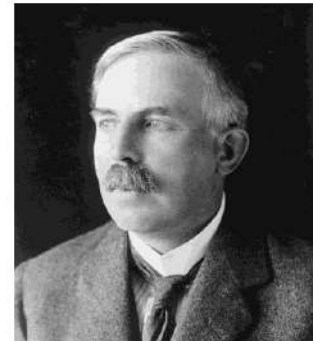


Pierre Curie

Het onderzoek van Marie aan uraniumzouten toont aan dat er soms verontreinigingen zijn waarvan de activiteit veel groter is dan die van uranium en in 1898 ontdekt ze dat het element thorium ook actief is. Pierre Curie begrijpt het belang van de ontdekkingen van zijn vrouw Marie en laat zijn onderzoek aan kristallen los om zich volledig te richten op het onderzoek van Marie. Niet lang daarna publiceren ze samen een artikel met de ontdekking van het nieuwe element dat ze polonium noemen, naar het geboorteland van Marie. Een paar maanden later ontdekken ze weer een ander element dat ze radium noemen, naar het Latijnse woord voor straling. Ze introduceren de begrippen radioactieve stoffen en radioactiviteit. Om de nieuwe elementen verder te onderzoeken proberen ze polonium en radium in zuivere vorm te isoleren.

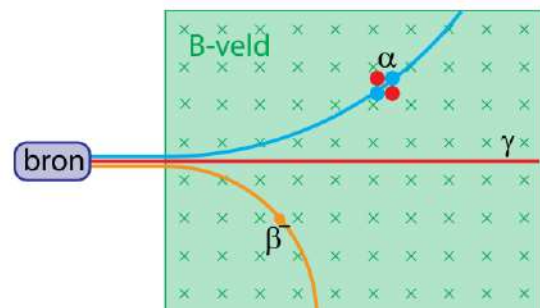
Kort na de ontdekking van radioactieve straling merken Pierre Curie en Henri Becquerel dat hun huid door straling wordt beschadigd. Ze merken dat glas de straling niet tegenhoudt maar lood wel. Röntgenstralen worden dan al gebruikt als radiotherapie tegen huidkanker en in 1901 wordt hiertoe voor het eerst ook radioactieve straling gebruikt.

Uit onderzoek aan radioactieve straling blijkt al snel dat er verschillende soorten straling zijn. **Ernest Rutherford** (1871–1937) laat radioactieve straling door metalen platen van verschillende dikte gaan. Hij onderscheidt twee type straling. Het eerste type dat zeer snel wordt geabsorbeerd noemt hij α -straling en het tweede type dat verder doordringt noemt hij β -straling. Snel daarna wordt ook de γ -straling ontdekt. Om hier meer over te weten onderzoeken Becquerel en Rutherford de invloed van elektrische en magnetische velden op radioactieve straling.



Ernest Rutherford

Joseph Thomson (1856–1940) toont aan dat kathodestralen een bundel elektronen is en Becquerel ontdekt dat β -straling zich gedraagt als elektronen met dezelfde verhouding van de lading en de massa. Rutherford laat in 1903 zien dat ook α -deeltjes afbuigen en dat ze een positieve lading hebben. In 1906 stelt hij vast dat α -deeltjes heliumkernen zijn. Hij ontwikkelt de theorie dat radioactiviteit het uiteenvallen van atoomkernen is en dat er een halveringstijd is waarin steeds de helft van de kernen verval.



Radioactieve stralen in een magneetveld

Rutherford begrijpt dat je met radioactiviteit elementen kunt veranderen. In 1917 schiet hij α -deeltjes op stikstof waardoor zuurstof ontstaat: $^{14}\text{N} + \alpha = ^{17}\text{O} + \text{p}$. Dit is de start van het onderzoek aan kernreacties. In 1932 ontdekt **James Chadwick** (1891–1974) het neutron en in 1934 onderzoeken **Irène Curie** (dochter van Marie en Pierre Curie) en haar man **Frédéric Joliot** de reactie $^{27}\text{Al} + \alpha = ^{30}\text{P} + \text{n}$ waarbij het instabiele ^{30}P een positron uitstraalt en verandert in ^{30}Si . In hetzelfde jaar bombardeert **Enrico Fermi** (1901–1954) uraniumkernen met neutronen waaruit nieuwe elementen met 93 en 94 protonen ontstaan. **Ida Noddack** (1896–1978) merkt op dat het mogelijk is een uraniumkern te splitsen in kleinere kernen. Aan haar hebben we het idee van kernsplijting te danken.



James Chadwick



Irène Curie en Frédéric Joliot



Enrico Fermi



Ida Noddack

In Berlijn wordt het onderzoek aan kernsplijting opgepakt door **Otto Hahn** (1879–1968) en **Lise Meitner** (1878–1968). Hahn beschiet uranium met neutronen en vindt barium als reactieproduct. Lise Meitner en **Otto Frisch** geven als verklaring dat uraniumkernen doormidden splijten en berekenen hoeveel energie hierbij vrijkomt. De onderzoekers in Berlijn begrijpen dat bij het splijten van uranium neutronen vrijkomen die nieuwe kernsplijtingen kunnen veroorzaken.



Otto Hahn



Lise Meitner

Het is dan 1938 en omdat Lise Meitner en Otto Frisch beiden Joods zijn kunnen ze niet in Berlijn blijven en vluchten ze naar Zweden en Denemarken. Met het vertrek van Lise Meitner uit Berlijn komt het onderzoek aan kernsplijting daar tot stilstand en lukt het nazi-Duitsland niet om een atoombom te ontwikkelen.

Met als doel een atoombom te ontwikkelen start in 1939 het Manhattan project in de Verenigde Staten. Het onderzoek wordt uitgevoerd in het Los Alamos laboratorium onder leiding van **Robert Oppenheimer** (1904–1967). Het is een gigantisch project waar uiteindelijk 130.000 mensen bij betrokken zijn, waaronder veel natuurkundigen. Op 16 juli 1945 wordt de eerste bom getest. Drie weken later op 6 augustus 1945 komt de uranium-bom "Little Boy" tot ontploffing boven Hiroshima en op 9 augustus 1945 wordt Nagasaki vernietigd door de plutoniumbom "Fat Man".



Eerste atoombom (Trinity test)

Behalve in een atoombom wordt kernsplijting ook toegepast in een kerncentrale. In 1954 komt in de Sovjet Unie de Obninsk kernreactor in bedrijf en in 1956 de Calder Hall reactor in het Verenigd Koninkrijk. Het voornaamste doel van de Calder Hall reactor is de productie van plutonium voor kernwapens. De eerste kernreactor in Nederland wordt gebouwd in Dodewaard (Gelderland) en komt in 1969 in bedrijf. Daarna volgt in 1973 de reactor in Borssele (Zeeland) die nog steeds in bedrijf is. Beide reactoren gebruiken U-238 (96%) + U235 (4%) als splijstof.

In een kerncentrale ontstaat radioactief afval dat veilig moet worden opgeslagen. Dit gebeurt in Nederland in een gebouw vlakbij de kerncentrale in Borssele. Opslag in dit gebouw is niet de eindbestemming. Er moet een definitieve oplossing worden gevonden, zoals opslag in zoutkoepels of in kleilagen diep onder de grond.



Kerncentrale in Borssele (links) en opslag van radioactief afval (rechts)



Inhoud

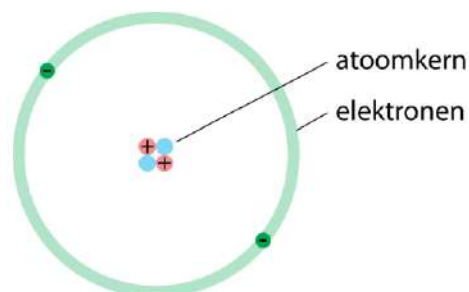
14.1	Het verval van atoomkernen	6
–	De atoomkern	6
–	Atoommassa	6
–	Isotopen	7
–	Spontaan verval van atoomkernen	8
–	Alfastraling	8
–	Bètastraling	9
–	Gammastraling	10
14.2	De snelheid van radioactief verval	11
–	Halveringstijd	11
–	Exponentieel verval van instabiele kernen	13
–	Activiteit	13
–	Activiteit en aantal aanwezige kernen	15
–	De activiteit uit een (N, t)-diagram bepalen	17
–	Het aantal vervallen kernen uit een (A, t)-diagram bepalen	18
14.3	Ioniserende straling	20
–	Ioniserend vermogen en doordringend vermogen	20
–	Bestraling met α -deeltjes	21
–	Bestraling met β -deeltjes	21
–	Bestraling met γ -fotonen	21
–	De dracht van α -deeltjes en β -deeltjes	22
–	De halveringsdikte voor röntgenstraling en gammastraling	22
14.4	Detectie van straling	25
–	Stralingsbadge (dosimeter)	25
–	Geigerteller	25
–	Nevelkamer en bellenkamer	26
14.5	Absorptie van straling door materie	28
–	Stralingsdosis	28
–	Equivalente dosis (dosisequivalent)	28
–	Het vermogen van een stralingsbron	29
–	Effectieve totale lichaamsdosis	29
–	Radioactieve besmetting	31
–	Inwendige bestraling (brachytherapie)	31
–	Nucleaire diagnostiek	32
–	Positron Emissie Tomografie (PET-scan)	33
14.6	Kernreacties	34
–	Spontane en gestimuleerde reacties	34
–	Behoud van massagetal en van elektrische lading	34
–	K-vangst	35

– Het (massagetal, atoomnummer)-diagram	35
– Vervalreeks	36
14.7 Massa en energie	38
– Bindingsenergie van een atoomkern	38
– Equivalentie van massa en energie	38
– Massadefect bij kernreacties	41
– Kernfusie en kernsplijting	42
– Splijting van uranium-235 in een kerncentrale	42
– De werking van een kerncentrale	43
14.8 Samenvatting	45
– Grootheden en eenheden	45
– Weten	45
– Formules	47
– Figuren	47

14.1 Het verval van atoomkernen

De atoomkern

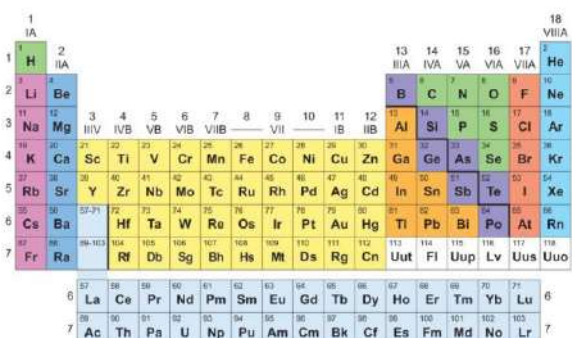
Een atoom bestaat uit een kern met daaromheen elektronen. Als je een atoomkern voorstelt als een tennisbal, dan zijn de elektronen zandkorreltjes op 5 km afstand. Een atoom bestaat dus vooral uit lege ruimte met vrijwel de hele atoommassa in de kern. De atoomkern heeft een diameter van ongeveer 10^{-15} 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 1823 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.

$$1\text{u} = 1,660539 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Figuur 3 geeft aan hoe je een atoomkern noteert. Je noteert het **symbool**, en aan de linkerkant het atoomnummer en het massagetal. Het **massagetal (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).

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

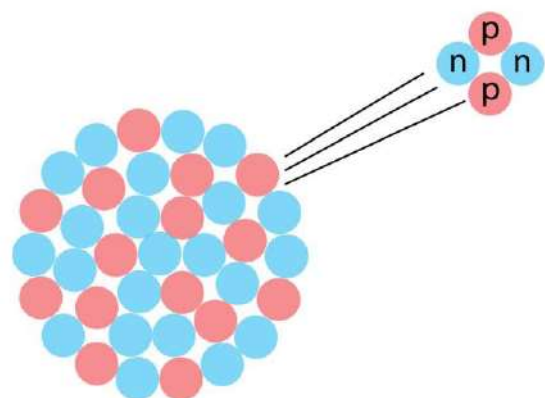
Spontaan verval van atoomkernen

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

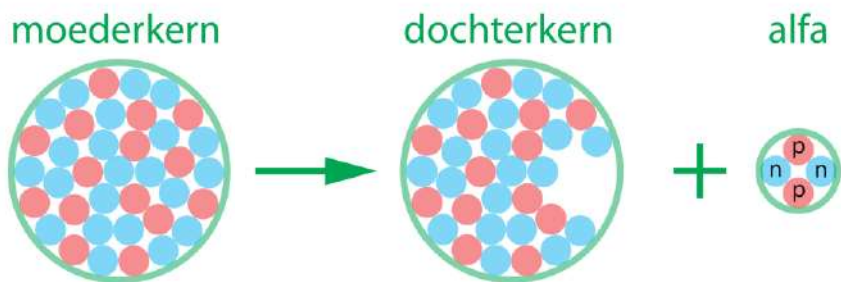
Alfastraling ontstaat als een kern zoveel protonen bevat dat hij niet bij elkaar te houden is door neutronen. De kern moet worden verkleind en dat gebeurt door het uitstoten van een alfadeeltje. Dit is een deeltje met twee protonen en twee neutronen en is dus een **^4He kern**. Elementen die α -straling 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 uraniukern 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: ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^4_2\alpha + {}^{234}_{90}\text{Th}$

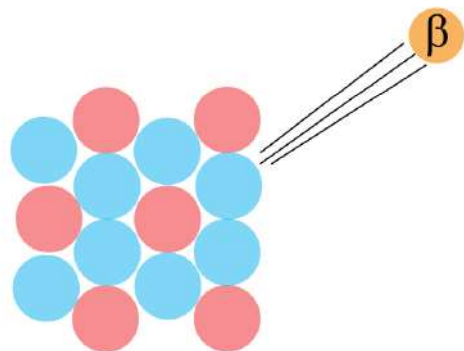
In deze **kernreactie** zijn het massagetal en het aantal protonen van alle deeltjes samen, voor en na de pijl hetzelfde. Dit is eenvoudig te controleren.

- linksboven: $238 = 4 + 234$ (massagetel 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.

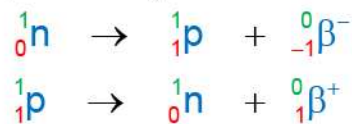
Bètastraling

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.



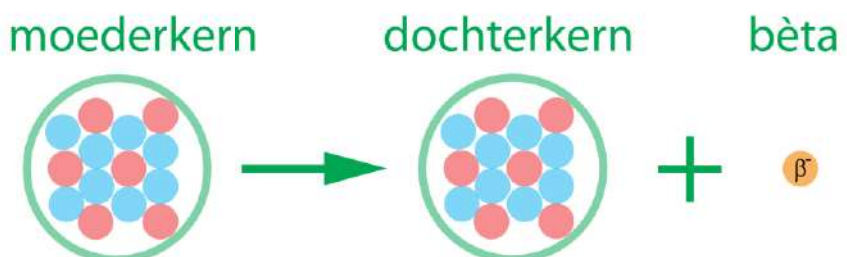
Figuur 6 Een β -deeltje wordt uitgestoten.

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

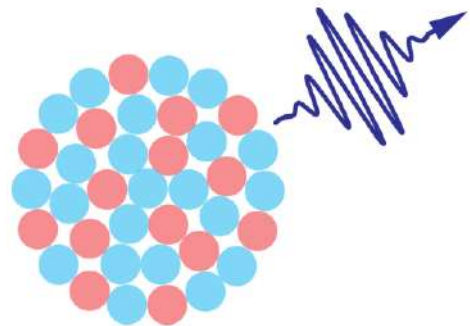


Bij het uitzenden van een β^- -deeltje verdwijnt er nauwelijks massa maar wel negatieve lading uit de kern. Bij het uitzenden van een β^+ -deeltje verdwijnt er positieve lading uit de kern. Behalve een β^- -deeltje of een β^+ -deeltje wordt er ook een **(anti-) neutrino ν** uitgezonden. Een neutrino 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.



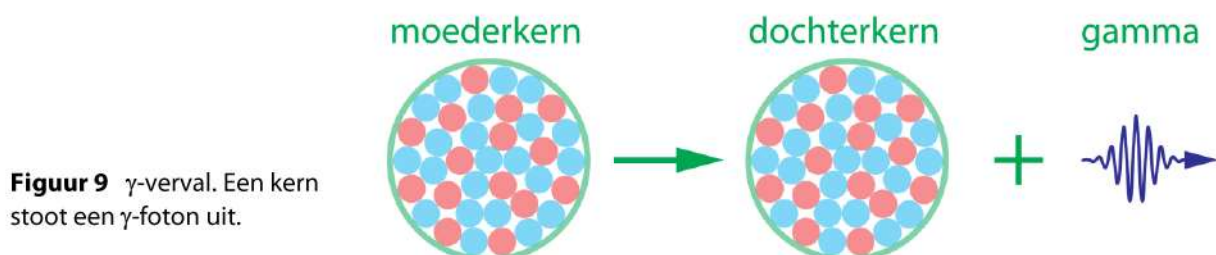
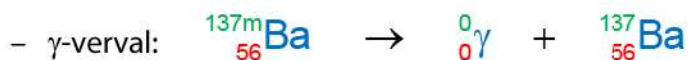
Gammastraling

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 ${}^{137\text{m}}_{56}\text{Ba}$ of Ba-137m en ${}^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$ 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.

14.2 De snelheid van radioactief verval

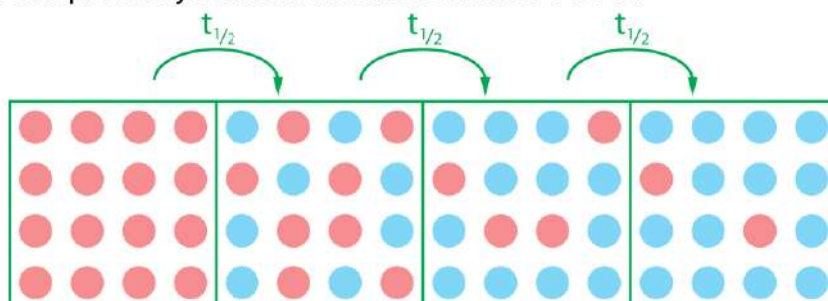
Halveringstijd

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.

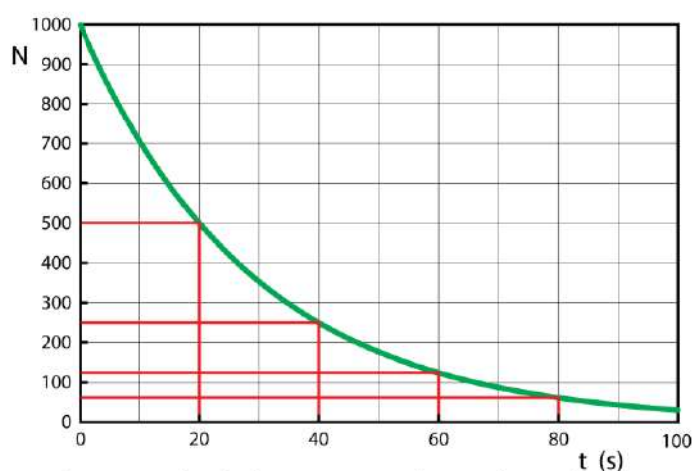
$$1N_0 \xrightarrow{1 \cdot t_{1/2}} \frac{1}{2}N_0 \xrightarrow{2 \cdot t_{1/2}} \frac{1}{4}N_0 \xrightarrow{3 \cdot t_{1/2}} \frac{1}{8}N_0 \xrightarrow{4 \cdot t_{1/2}} \frac{1}{16}N_0 \xrightarrow{5 \cdot t_{1/2}} \frac{1}{32}N_0$$

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 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

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

Exponentieel verval van instabiele kernen

In bovenstaande voorbeelden is het aantal halveringen steeds een geheel getal, maar dit hoeft natuurlijk niet zo te zijn. Voor een willekeurig getal n kun je nog steeds uitrekenen hoeveel kernen er op een bepaald moment aanwezig zijn. Berekenen hoelang het duurt voordat er een bepaald aantal instabiele kernen aanwezig is, is moeilijker maar kan ook. Daarbij moet je gebruik maken van de wiskunde van logaritme. Het verval is namelijk een exponentieel dalende functie van de tijd. De wiskundige regel die je nodig hebt is $\log n^x = x \cdot \log n$. In het voorbeeld hieronder passen we deze regel toe.

VOORBEELD β^- -verval van koolstof-14

De halveringstijd van koolstof-14 is 5730 jaar. Op $t=0$ zijn er $1,0 \cdot 10^{15}$ C-14 kernen.

Bereken hoeveel C-14 kernen er na 15.000 jaar zijn vervallen.

- $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$
- $N = 1,0 \cdot 10^{15} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{15000}{5730}} \rightarrow N = 1,0 \cdot 10^{15} \cdot 1,62916 \cdot 10^{-1} = 1,62916 \cdot 10^{14}$
- vervallen kernen: $N_0 - N = 1,0 \cdot 10^{15} - 1,62916 \cdot 10^{14} = 8,37084 \cdot 10^{14} = 8,4 \cdot 10^{14}$

Bereken op welk tijdstip er nog $1,0 \cdot 10^{13}$ C-14 kernen aanwezig zijn.

- $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \rightarrow 10^{13} = 10^{15} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5730}} \rightarrow 10^{-2} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5730}}$
- links en rechts de logaritme nemen en gebruik $\log\left(\frac{1}{2}\right)^n = n \cdot \log\left(\frac{1}{2}\right)$
- $\log 10^{-2} = \frac{t}{5730} \cdot \log\left(\frac{1}{2}\right)$
- $\frac{t}{5730} = \frac{\log 10^{-2}}{\log \frac{1}{2}} \rightarrow \frac{t}{5730} = \frac{-2}{-0,30103}$
- $t = \frac{-2}{-0,30103} \cdot 5730 \rightarrow t = 6,644 \cdot 5730 = 3,8069 \cdot 10^4 \rightarrow t = 3,8 \cdot 10^4 \text{ jaar}$

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 vervalt.

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 kernen 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 vervalft 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.

- $n = 270/45 = 6$
- 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

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

Activiteit en aantal aanwezige kernen

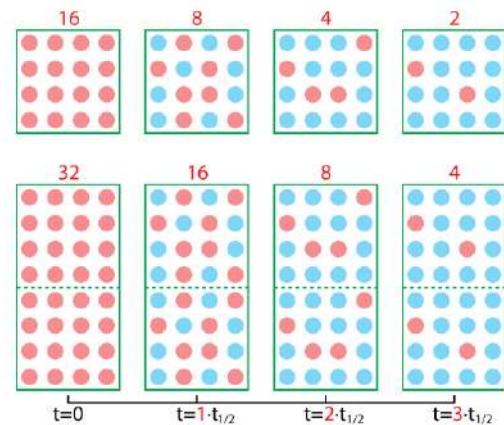
De activiteit is **recht evenredig** met het aantal aanwezige radioactieve kernen en **omgekeerd evenredig** met de halveringstijd. Weet je voor een tijdstip het aantal kernen en de halveringstijd, dan kun je de activiteit op dit tijdstip berekenen. Er geldt:

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

- A is de activiteit in becquerel (Bq)
- $\ln 2$ is de natuurlijke logaritme van 2 $\ln 2 = 0,693147$
- $t_{1/2}$ is de halveringstijd in seconde (s) **MOET IN SECONDE**
- N is het aantal aanwezige instabiele kernen

– activiteit en het aantal kernen –

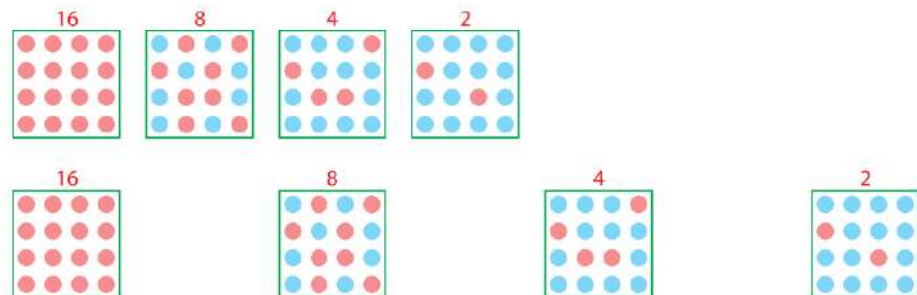
Het aantal radioactieve kernen dat per seconde vervalst (de activiteit) is afhankelijk van het aantal aanwezige kernen. Want als er veel kernen zijn zullen er per seconde ook veel vervallen. Hoe de activiteit samenhangt met het aantal aanwezige kernen zie je in figuur 12. Bovenaan zijn er in het begin 16 kernen. Na $1 \cdot t_{1/2}$ zijn er 8 vervallen na $2 \cdot t_{1/2}$ zijn er 4 vervallen en na $3 \cdot t_{1/2}$ zijn er 2 vervallen. 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 12 Activiteit en aantal kernen.

– activiteit en de halveringstijd –

Behalve het aantal aanwezige kernen wordt de activiteit ook bepaald door de halveringstijd. Dit zie je in figuur 13. 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 13 Activiteit en halveringstijd.

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 $t=0$ zijn er $6,0 \cdot 10^{14}$ kernen aanwezig.

Bereken de activiteit op $t = 0$ s.

- $t_{1/2} = 25,3 \text{ dagen} = 2,18592 \cdot 10^6 \text{ s}$ | $N = 6,0 \cdot 10^{14}$ kernen | $A = \dots \text{Bq}$
- $A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N \rightarrow A = \frac{\ln 2}{2,18592 \cdot 10^6} \cdot 6,0 \cdot 10^{14} = 1,90258 \cdot 10^8 \rightarrow A_0 = 1,9 \cdot 10^8 \text{ Bq}$

Bereken de activiteit na 365 dagen

- $A_0 = 1,90258 \cdot 10^8 \text{ Bq}$ | $t_{1/2} = 25,3 \text{ d}$ | $t = 365 \text{ d}$ | $A = \dots \text{Bq}$
- $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \rightarrow A = 1,90258 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{365}{25,3}} = 8,63813 \cdot 10^3 = 8,6 \cdot 10^3 \text{ Bq}$

Na hoeveel uur is de activiteit afgenomen tot $1,0 \cdot 10^6$ Bq?

- $A = 1,0 \cdot 10^6$ Bq | $A_0 = 1,90258 \cdot 10^8$ Bq | $t_{1/2} = 25,3$ d | $t = \dots$ h
- $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}} \rightarrow 1,0 \cdot 10^6 = 1,90258 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{25,3}} \rightarrow 5,25602 \cdot 10^{-3} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{25,3}}$
- links en rechts de logaritme nemen en gebruik $\log\left(\frac{1}{2}\right)^n = n \cdot \log\left(\frac{1}{2}\right)$
- $\log(5,25602 \cdot 10^{-3}) = \frac{t}{25,3} \cdot \log(0,5)$
- $\frac{t}{25,3} = \frac{\log 5,25602 \cdot 10^{-3}}{\log 0,5} \rightarrow \frac{t}{25,3} = 7,571811 \rightarrow t = 191,567$ dagen
- $t = 191,567 \cdot 24 = 4,59761 \cdot 10^3 = 4,6 \cdot 10^3$ uur

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

Uit een (N, t)-diagram kun je de activiteit op tijdstip t bepalen door het tekenen van een raaklijn of door het aflezen van de halveringstijd. Beide methoden leg ik hieronder uit.

– raaklijnmethode –

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 richtingscoëfficiënt $\Delta N / \Delta t$ berekenen. De tijd moet in seconde. Vervolgens vermenigvuldig je met -1 .

$$A = -(\Delta N / \Delta t)_{\text{raaklijn}}$$

Bepaal de richtingscoëfficiënt van de raaklijn op tijdstip t en vermenigvuldig dit met -1 .

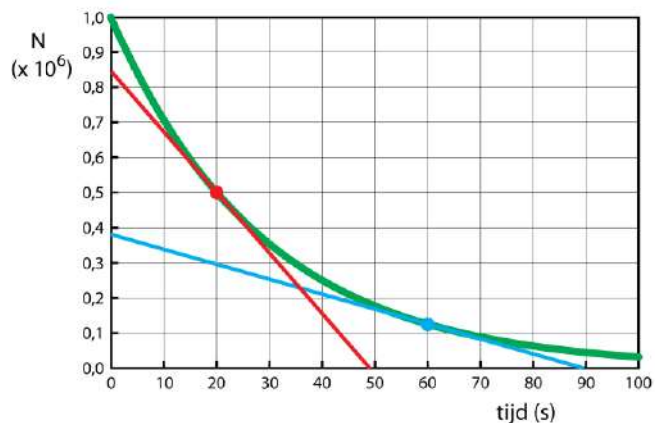
Stel er zijn instabiele kernen met een halveringstijd van 20 seconden. In figuur 14 is het (N, t)-diagram gegeven. De activiteit bepaal je door een raaklijn te tekenen en daarvan de richtingscoëfficiënt $\Delta N / \Delta t$ te bepalen. Maak de raaklijn zo lang dat hij zowel door de horizontale als door 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 14 (N, t)-diagram van radioactief verval.

– afleesmethode –

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

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

Bepaal $t_{1/2}$ en bepaal het aantal kernen op tijdstip t.

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

Figuur 15 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.

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 $\rightarrow A = 4,0 \cdot 10^5$ Bq



Figuur 15

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

- aflezen: de halveringstijd is 10 minuten = 600 seconden $\rightarrow t_{1/2} = 600$ s
- aflezen: aantal kernen op $t = 15$ minuten is $0,35 \cdot 10^9$
- $A = \frac{0,693}{t_{1/2}} \cdot N \rightarrow A = \frac{0,693}{600} \cdot 0,35 \cdot 10^9 = 4,0 \cdot 10^5$ 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 of door het aflezen van de halveringstijd. Beide methoden leg ik hieronder uit.

– oppervlaktemethode –

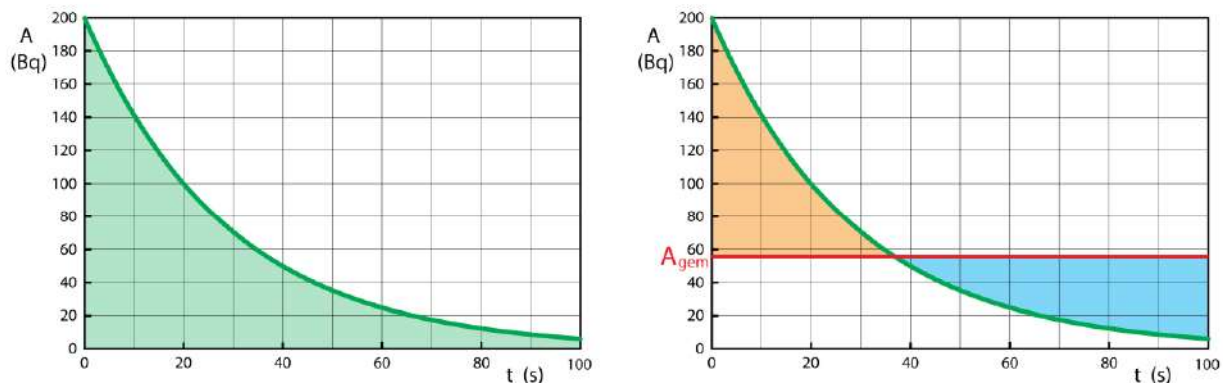
Tel het aantal hokjes onder de (A, t)-grafiek en vermenigvuldig dit met het aantal kernen per hokje

OOK GOED

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

In figuur 16 correspondeert één hokje met $10 \cdot 20 = 200$ vervallen kernen.

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



Figuur 16 Het aantal vervallen kernen is gelijk aan de oppervlakte onder de (A, t) -grafiek.

– afleesmethode –

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

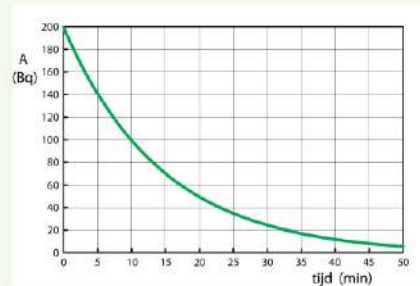
**Bepaal $t_{1/2}$ en lees af A op $t = 0$ én A op tijdstip t .
Bereken N_0 en $N \rightarrow \Delta N = N_0 - N$.**

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

Figuur 17 is (A, t) -diagram van het β^+ - verval van N-13.

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

- 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
OOK GOED
- schat: $A_{\text{gem}} = 85 \text{ Bq}$
- $A_{\text{gem}} = -\frac{\Delta N}{\Delta t} \rightarrow 85 = \frac{-\Delta N}{30 \cdot 60}$
- $\Delta N = -1,5 \cdot 10^5$ kernen



Figuur 17

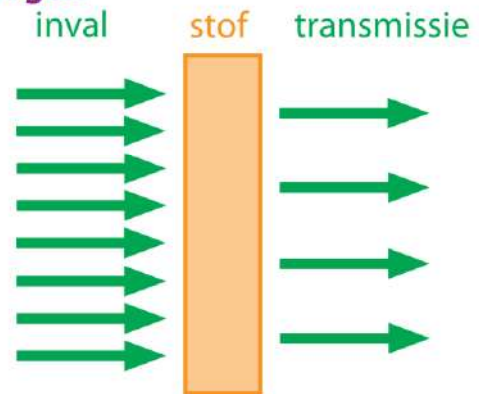
Bepaal het aantal vervallen N-13 kernen in 30 minuten door aflezen.

- aflezen halveringstijd is 10 min = 600 seconden $\rightarrow t_{1/2} = 600 \text{ s}$
- aflezen: op $t = 0$ is de activiteit 200 Bq
- 30 minuten is 3x de halveringstijd
- $A = A_0 \cdot (\frac{1}{2})^n \rightarrow A = 200 \cdot (\frac{1}{2})^3 = 25 \text{ Bq}$
- $t = 0 \rightarrow A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N \rightarrow 200 = \frac{\ln 2}{600} \cdot N \rightarrow N = 1,731 \cdot 10^5$ kernen
- $t = 30 \text{ min} \rightarrow A = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \cdot N \rightarrow 25 = \frac{\ln 2}{600} \cdot N \rightarrow N = 2,164 \cdot 10^4$ kernen
- $\Delta N = 1,731 \cdot 10^5 - 2,164 \cdot 10^4 = 1,515 \cdot 10^5 = 1,5 \cdot 10^5$ kernen zijn vervallen

14.3 Ioniserende straling

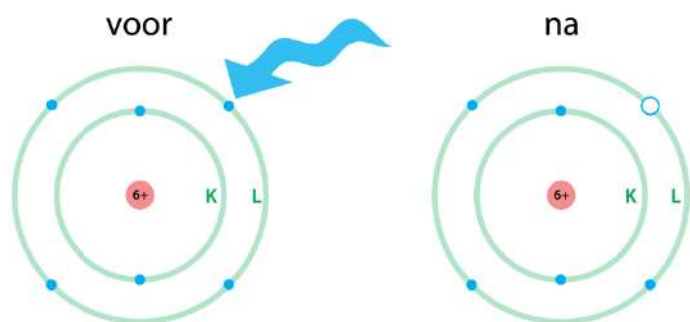
Ioniserend vermogen en doordringend vermogen

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.

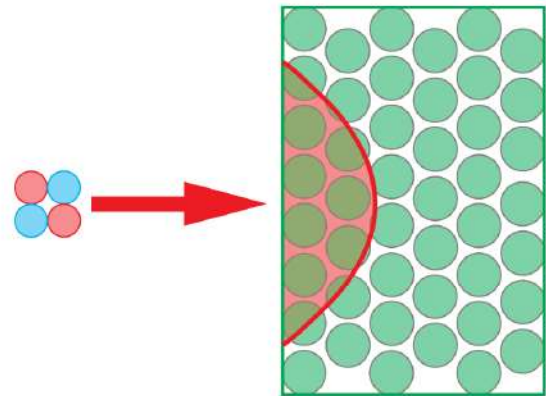


Figuur 19 Door ioniserende straling wordt een elektron losgemaakt van de kern. Het atoom wordt dan een positief geladen ion.

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.

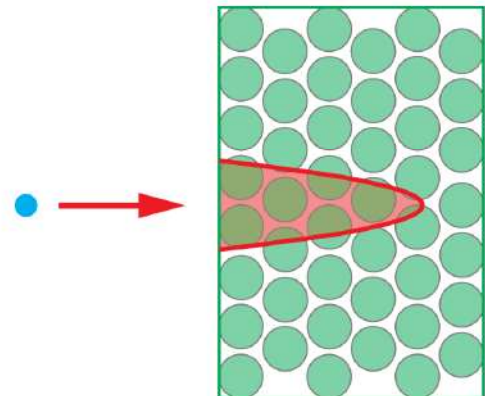


Figuur 20 Bestraling met α -deeltjes.

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

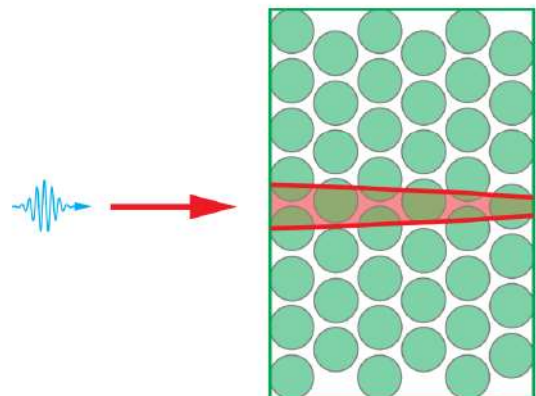
Het ioniserend vermogen van β -straling is kleiner dan dat van α -straling. Dit komt omdat een β -deeltje lichter is dan een α -deeltje en bovendien een kleinere lading heeft. De kans dat een β -deeltje botst met elektronen in een stof is daarom niet zo groot. β -deeltjes kunnen verder doordringen in 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.

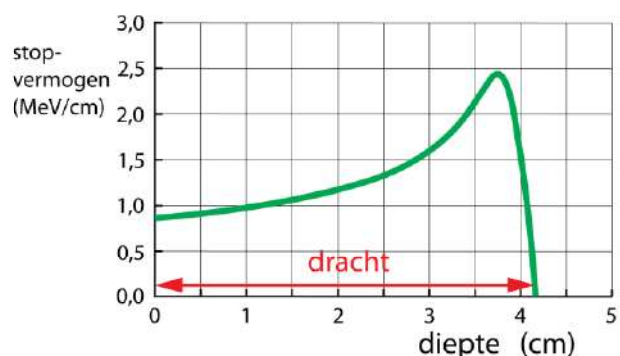
De tabel hiernaast is een overzicht van het ioniserend vermogen en het doordringend vermogen van α -, β - en γ -straling.

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:

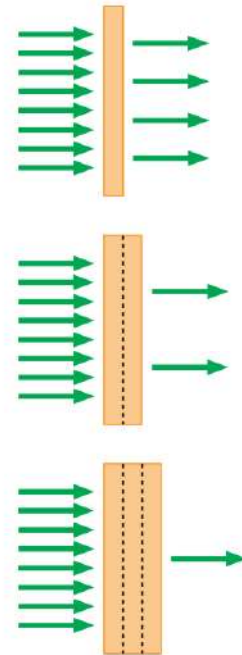
$$1 \cdot I_0 \xrightarrow{1 \cdot d_{1/2}} \frac{1}{2} I_0 \xrightarrow{2 \cdot d_{1/2}} \frac{1}{4} I_0 \xrightarrow{3 \cdot d_{1/2}} \frac{1}{8} I_0 \xrightarrow{4 \cdot d_{1/2}} \frac{1}{16} I_0 \xrightarrow{5 \cdot d_{1/2}} \frac{1}{32} I_0$$

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 $1/4$ (= 25%). Het onderste plaatje is drie keer de halveringsdikte, waardoor de straling afneemt tot $1/8$ (= 12,5%).

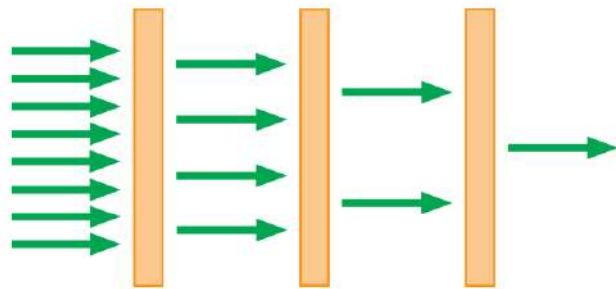
Een plaatje met een dikte van drie keer de halveringsdikte mag je opvatten als drie plaatjes achter elkaar van ieder één keer de halveringsdikte. Zie figuur 25.

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 $3 \cdot d_{1/2}$.



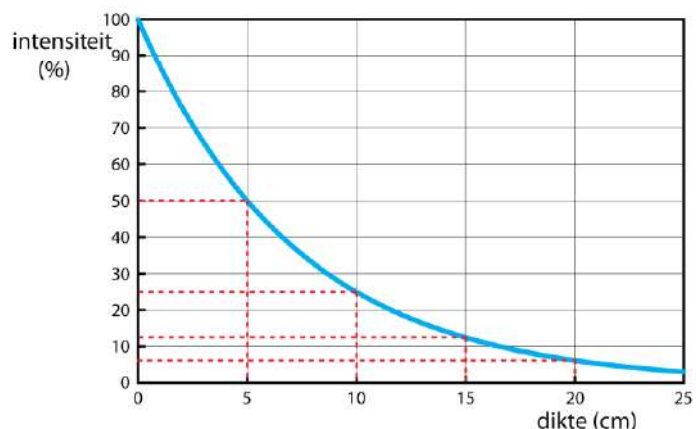
Voor de intensiteit van de straling nadat n keer de halveringsdikte is gepasseerd geldt:

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

- 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 ijzer

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

VOORBEELD γ -straling door lood

Een radioactieve bron straalt γ -straling uit met een fotonenergie van 1,0 MeV. De bron wordt in een loden doos bewaart. De halveringsdikte is 0,86 cm.

Hoe dik moet de wand zijn om 95% van de γ -straling tegen te houden?

- $I = 5,0\% \mid I_0 = 100\% \mid d_{1/2} = 0,86$ cm $\mid d = \dots$ cm
- $I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{d_{1/2}}}$
- $5 = 100 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{0,86}} \rightarrow 5,0 \cdot 10^{-2} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{d}{0,86}}$
- links en rechts de logaritme nemen en gebruik $\log\left(\frac{1}{2}\right)^n = n \cdot \log\left(\frac{1}{2}\right)$
- $\log(5,0 \cdot 10^{-2}) = \frac{d}{0,86} \cdot \log(0,5)$
- $\frac{d}{0,86} = \frac{\log 5,0 \cdot 10^{-2}}{\log 0,5} \rightarrow \frac{d}{0,86} = 4,32193 \rightarrow d = 3,7$ cm

14.4 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.

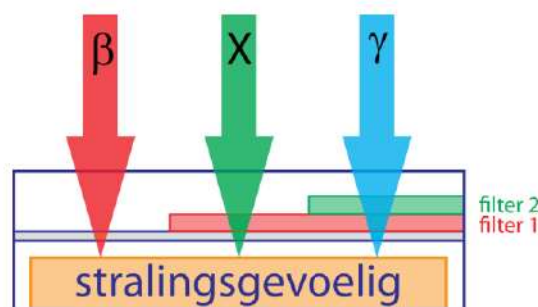
Mensen die dichtbij stralingsbronnen werken moeten altijd een **stralingsbadge** dragen. Hiermee kan je vaststellen aan hoeveel straling iemand in het verleden is blootgesteld. Omdat de dracht van α -straling in de lucht maar enkele centimeters is heeft het geen zin om een badge gevoelig te maken voor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

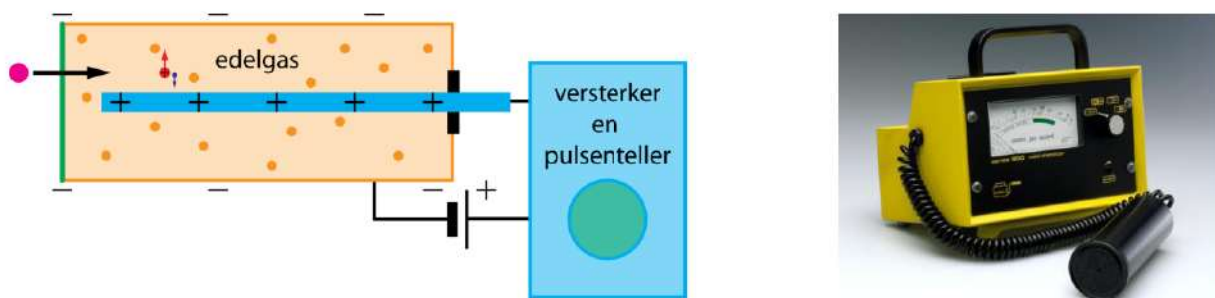


Geigerteller

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).

Nevelkamer en bellenkamer

In een nevelkamer en een bellenkamer kan de baan van een ioniserend deeltje zichtbaar worden gemaakt. Het werkt hetzelfde als bij de strepen die in de lucht ontstaan als een vliegtuig voorbijkomt. De oorzaak van deze strepen is de aanwezigheid van waterdamp in de lucht. Soms is de waterdamp **verzadigd** en staat het op het punt te condenseren tot waterdruppeltjes. Om de condensatie te starten is een kleine verstoring nodig en het uitlaatgas van een vliegtuig is zo'n verstoring. Waar het vliegtuig voorbijkomt ontstaan waterdruppels als witte strepen zichtbaar zijn. Deze strepen zijn dus niet de uitlaatgassen van het vliegtuig maar waterdruppels die zich om roetdeeltjes 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. Een α -, β - of γ -deeltje is nodig om het condenseren te starten, zodat er een wit spoor ontstaat op de plaatsen waar het deeltje voorbijkomt. In een **bellenkamer** gebruik je een vloeistof die op het punt staat te verdampen, waarbij het verdampen start door een α -, β - of γ -deeltje. Ook hierbij ontstaat een wit spoor veroorzaakt door kleine gasbellen.

Meestal wordt een magnetisch veld aangebracht, waardoor geladen deeltjes, een cirkelvormige baan krijgen. Uit de straal van deze baan kan je de snelheid en de lading van het deeltje berekenen. Door botsingen verliezen de deeltjes hun energie, waardoor de snelheid afneemt en de straal kleiner wordt. Er ontstaat dan een spiraalvormige baan die

eindigt in een punt. In figuur 29 komen de deeltjes aan de linkerkant binnen. γ -deeltjes hebben geen lading en bewegen in rechte lijnen. Deeltjes met een elektrische lading, zoals α^- - 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 29 Links een foto van verschillende deeltjes in een bellenkamer. Rechts een gammafoton dat verandert in een elektron en een positron. Omdat deze deeltjes een tegengestelde lading hebben, spiraliseert het elektron en het positron in tegengestelde richtingen.

14.5 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 (dosequivalent)

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. Dit is hetzelfde als het **dosisequivalent**.

$$H = w_R \cdot D$$

- H is de equivalente dosis in sievert (Sv) (1 Sv = 1 J/kg) dosisequivalent
- 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 (dosequivalent) 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
- $H = w_R \cdot D \rightarrow H = 20 \cdot 3,086 \cdot 10^{-4} = 6,172 \cdot 10^{-3} = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ Sv}$

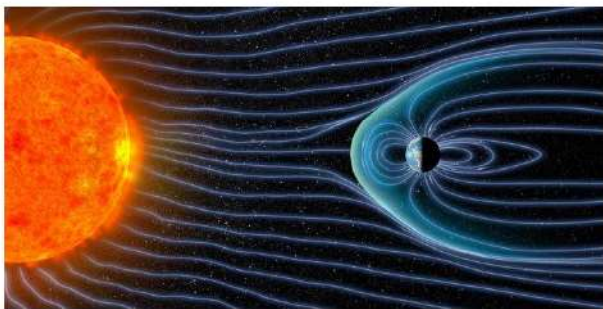
Effectieve totale lichaamsdosis

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.

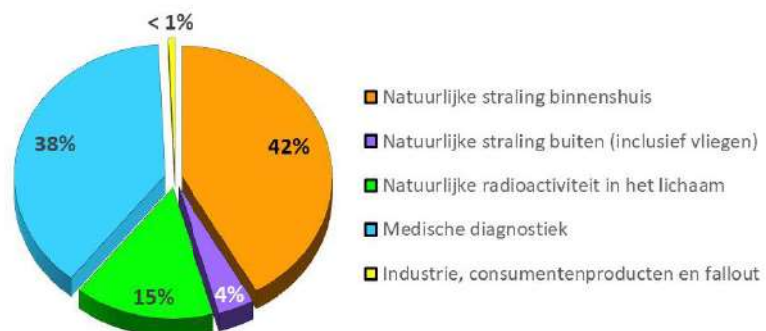
De **effectieve totale lichaamsdosis** is de equivalente dosis die een mens per jaar ontvangt. Deze **stralingsbelasting** wordt uitgedrukt in millisievert (mSv) per jaar. Dit mag niet teveel zijn en vandaar dat er **stralingsbeschermingsnormen** zijn vastgesteld.

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 30 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 30 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 30 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 31 zie je de verdeling van deze stralingsbelasting over de verschillende bronnen.



Figuur 31 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 annihileren 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 toegediende 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 32. 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 32 Bij brachytherapie worden staafjes met radionucliden in het lichaam geplaatst.

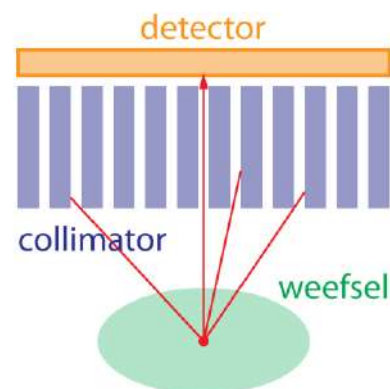
Nucleaire diagnostiek

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 33.

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 draaien 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 een CT-scan.



Figuur 33 SPECT.

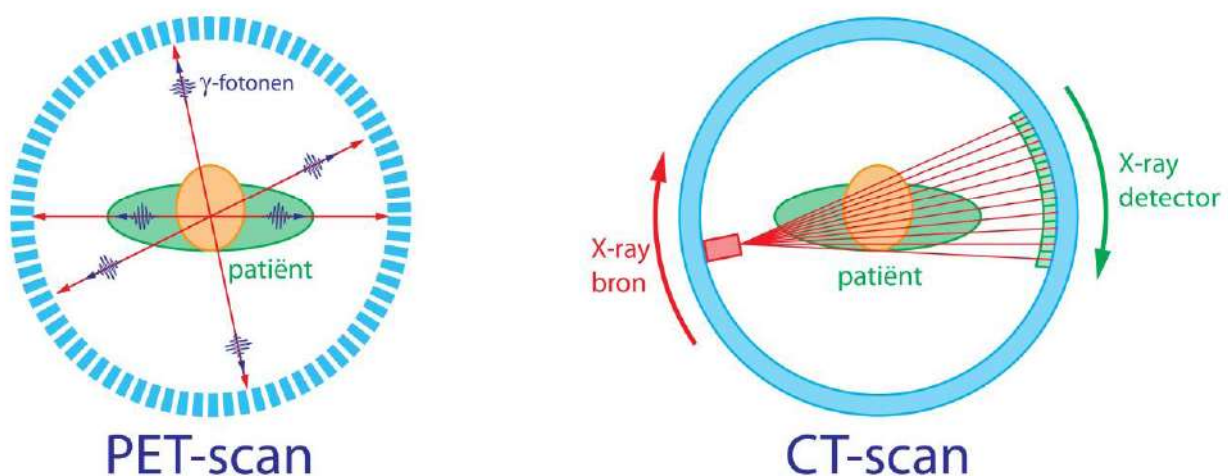
Positron Emissie Tomografie (PET-scan)

Bij **Positron Emissie Tomografie (PET-scan)** wordt een tracer ingebracht die vervalst onder uitzending van positronen (β^+ -deeltje). Vaak wordt F-18 gebruikt, maar ook C-11, O-15 en N-13 worden toegepast. Deze isotopen hebben een korte halveringstijd: F-18 ($t_{1/2} = 110$ min) , C-11 ($t_{1/2} = 20,4$ min) , O-15 ($t_{1/2} = 122$ s) en N-13 ($t_{1/2} = 9,97$ min).

De radioactieve isotoop (tracer) moet worden opgenomen door het weefsel en wordt daarom ingebouwd in moleculen die sterk op glucose lijken. Tumorcellen nemen meer glucose op dan gezonde lichaamscellen, zodat de isotoop ophoopt in de tumorcellen. Daar vervallen ze, waarbij positronen ontstaan. In weefsel hebben positronen een dracht van een paar millimeter omdat ze al snel een elektron tegenkomen. Als dit gebeurt vernietigen het positron en het elektron elkaar. Dit noemt je **annihileren**. Ze houden op te bestaan, waarbij de vrijgekomen energie van 1,022 MeV wordt afgevoerd door twee γ -fotonen met ieder 0,511 MeV energie.

Beide fotonen bewegen in tegengestelde richting en komen in een ringvormige detector die om de patiënt is geplaatst. Zie figuur 34 links. Omdat de fotonen in tegengestelde richting bewegen weet je dat de tumor zich op de rechte lijn tussen de detectoren bevindt. Uit het tijdsverschil kun je berekenen waar op de rechte lijn de annihilatie is gebeurd. De gegevens van veel annihilaties in allerlei richtingen worden verzameld en verwerkt tot een driedimensionaal beeld. De resolutie wordt bepaald door de dracht van de positronen (enkele millimeters). Nadat de PET-scan is gemaakt blijft de patiënt nog enige tijd radioactief besmet.

Vaak wordt een PET-scan gecombineerd met een CT-scan. Zie figuur 34 rechts. Bij een CT-scan wordt een röntgenbron en een detector tegelijkertijd om een patiënt gedraaid, waarbij van alle kanten röntgenfoto's worden genomen. Deze foto's worden door een computer verwerkt tot een driedimensionaal beeld. Bij een PET scan en bij een CT-scan wordt de patiënt bestraald met ioniserende straling. Bij een PET scan zijn het γ -fotonen van 0,511 MeV energie die een dosisequivalent van 1,5–5 mSv geven. Bij een CT-scan zijn het röntgenfotonen van 70 – 140 keV energie die een dosisequivalent van 0,1–20 mSv geven.



Figuur 34 PET-scan (Positron Emissie Tomografie) en CT-scan (Computer Tomografie).

14.6 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

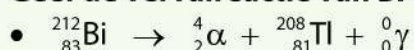
Voor kernreacties geldt behoud van **massagetal** en behoud van elektrische **lading**.

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).



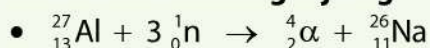
Geef de vervalketen van Bi-212 (spontaan verval).

- 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.

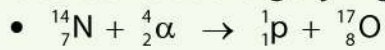


Bij spontane reacties komt altijd α -, β - of γ -straling vrij, maar bij gestimuleerde reacties kunnen ook andere deeltjes, zoals protonen of neutronen vrijkomen. Je spreekt dan van **protonstraling** of van **neutronstraling**.

VOORBEELD protonstraling

Je beschiet een N-14 kern met een α -deeltje. Hierbij komt protonstraling vrij.

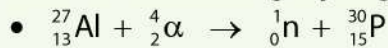
Geef de reactievergelijking.



VOORBEELD neutronstraling

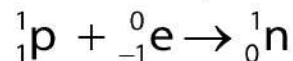
Je beschiet een Al-27 kern met een α -deeltje. Hierbij komt neutronstraling vrij.

Geef de reactievergelijking.

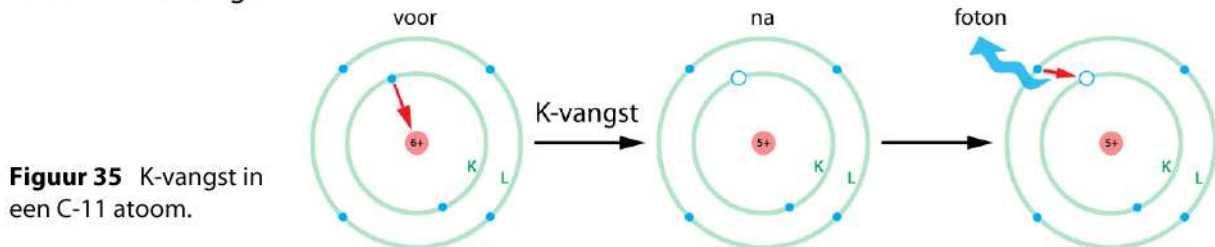


K-vangst

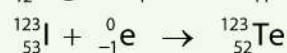
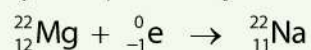
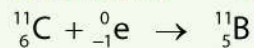
K-vangst is het proces waarbij een elektron spontaan uit de K-schil wordt opgenomen in de kern. Hierbij verandert een proton in een neutron, waardoor de kern stabiel(er) wordt.



Door K-vangst ontstaat er een lege plaats in de K-schil. Een elektron uit een hogere schil valt in deze lege plaats, waarbij röntgenstraling wordt uitgezonden. K-vangst treedt op in C-11 atomen. De kern van een C-11 atoom heeft 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. Zie figuur 35.



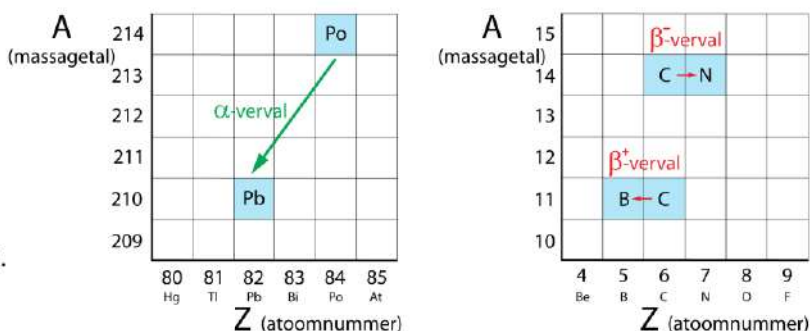
VOORBEELD K-vangst



Het (massagetal, atoomnummer)-diagram

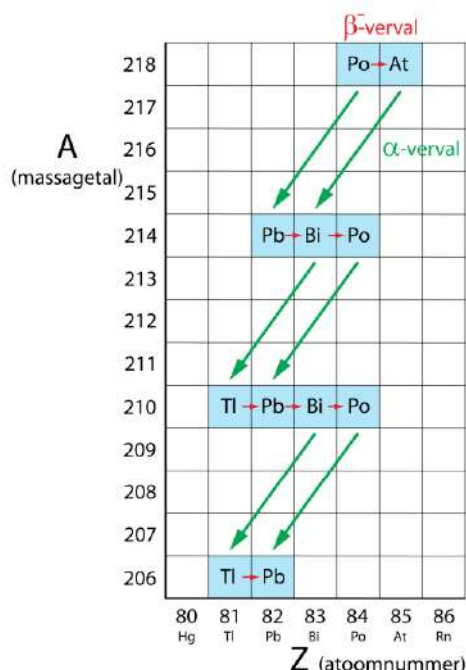
Een overzichtelijke manier om spontane kernreacties weer te geven is het (massagetal, atoomnummer)-diagram. Omdat het massagetal wordt aangegeven met letter A en het atoomnummer met letter Z wordt dit ook een **(A, Z)-diagram** genoemd. In dit diagram staat massagetal op de verticale as en het atoomnummer op de horizontale as. In figuur 36 zie je α -verval en het β -verval weergegeven in een (A, Z)-diagram.

Figuur 36 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 37 zie je hoe Po-218 vervalt naar Pb-206. Het Po-218 kan op twee manieren vervallen: α -verval of β^- -verval. Hierdoor ontstaan er 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.

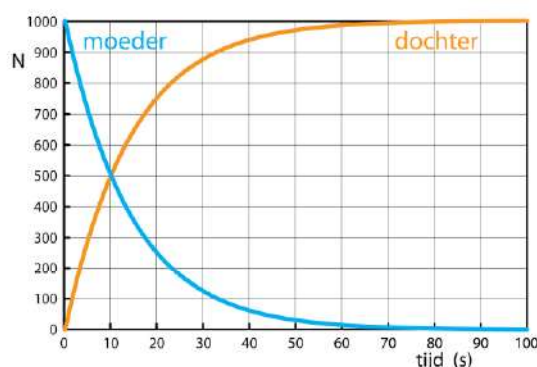
Figuur 37 Het (A, Z)-diagram van het spontane verval van Po-218. De vervalketen eindigt met het stabiele Pb-206.



Vervalreeks

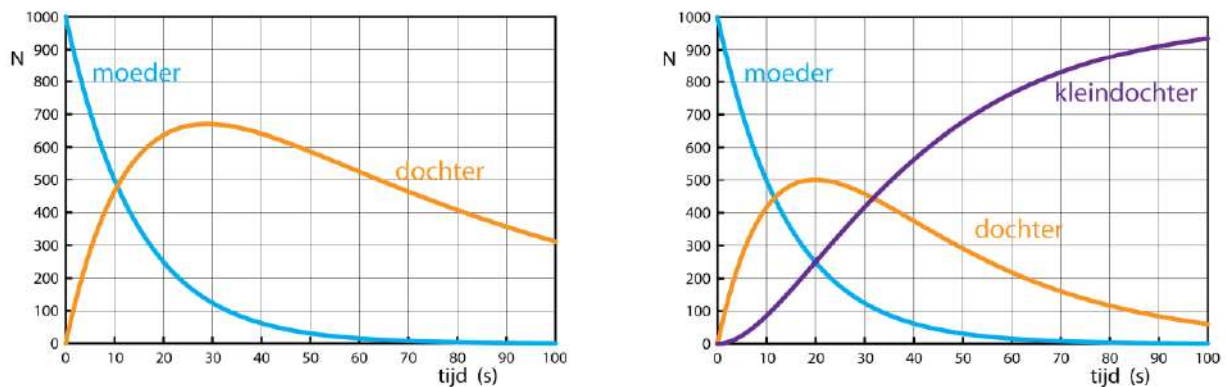
Als een atoomkern vervalt ontstaan er kernen die stabiel of instabiel kunnen zijn. In het eenvoudigste geval is de ontstane kern stabiel. In dat geval is het aantal dochterkernen gelijk aan het aantal vervallen moederkernen. In figuur 38 zie je de afname van de moederkernen en de toename van de stabiele dochterkernen.

Figuur 38 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 39 zie je twee voorbeelden. We beginnen steeds met 1000 moederkernen met een halveringstijd van 10 seconden. Links ontstaan er 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 39 Verval met instabiele moeder- en dochter-kernen. De kleindochter-kernen zijn stabiel.

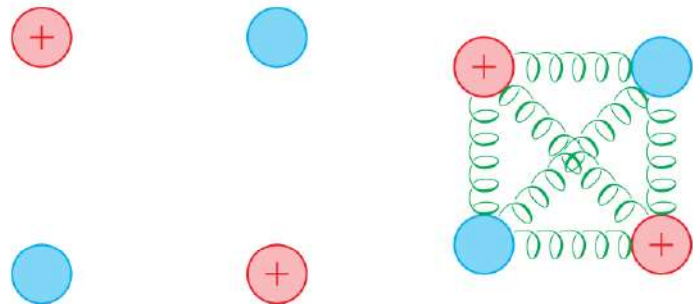
In figuur 39 rechts is het nog wat ingewikkelder. De moederkernen hebben een halveringstijd van 10 s en de dochterkernen van 20 s. Uit de dochterkernen ontstaan kleindochterkernen die stabiel zijn. Je ziet dat het aantal moeders + dochters + kleindochters constant is, namelijk 1000. Dit is begrijpelijk, want als een moeder vervalt ontstaat een dochter en als een dochter vervalt ontstaat een kleindochter en die is stabiel. De aanwezige kernen zijn dus moeder, dochter of kleindochter en in totaal zijn er steeds 1000 kernen. Na 70 seconden wordt dit nog wat duidelijker, want dan zijn er vrijwel geen moederkernen meer en komen er geen nieuwe dochters meer bij. Voor iedere dochter die vervalt ontstaat een kleindochter en omdat de kleindochters niet vervallen is het aantal dochters plus het aantal kleindochters constant, namelijk 1000 wat het aantal moeders was in het begin. Je ziet dat het vrij ingewikkeld kan worden en dat er geen eenvoudige formule is waarmee je kunt uitrekenen hoeveel instabiele dochters er op een bepaald moment zijn. Maar zoals je ziet kun je het verloop meestal wel begrijpen en kun je schetsen hoe de grafieken eruit zien.

14.7 Massa en energie

Bindingsenergie van een atoomkern

Een atoomkern wordt bij elkaar gehouden omdat aantrekkende krachten sterker zijn dan de afstotende krachten tussen de protonen. Neutronen spelen hierbij een belangrijke rol. Er zijn twee aantrekkende krachten die de kern bij elkaar houden, de **zwakke kernkracht** en de **sterke kernkracht**. Deze krachten zijn alleen werkzaam in een atoomkern, omdat ze heel snel afnemen met de afstand. Stel dat we protonen en neutronen bij elkaar brengen om een atoomkern te vormen. Als de deeltjes ver uit elkaar zijn moeten we kracht uitoefenen om ze naar elkaar toe te duwen, maar op een bepaalde afstand gaan de kernkrachten hun werk te doen en is er een naar binnen gerichte kracht die de kerndeeltjes met elkaar verbindt. In figuur 40 zie je links twee losse protonen (rood) en twee losse neutronen (blauw). Rechts zijn de deeltjes zo dicht bij elkaar dat de kernkrachten, voorgesteld als veren de protonen en neutronen bij elkaar houden.

Figuur 40 Links losse protonen en neutronen en rechts protonen en neutronen die bij elkaar worden gehouden door de kernkrachten, zodat er een stabiele He-4 kern ontstaat.



Om een atoomkern te splitsen in losse protonen en neutronen moet je kracht uitoefenen om de bindingen losser te maken. Als de afstand groot genoeg is houden de kernkrachten op te bestaan (breken de veertjes). Het kost dus arbeid om een kern te splitsen in losse protonen en losse neutronen en deze arbeid is de **bindingsenergie**. Een atoomkern bevat dus bindingsenergie. Een kern met veel deeltjes bevat veel bindingen en daarom ook veel bindingsenergie. Als we de bindingsenergie delen door het aantal kerndeeltjes vinden we de **bindingsenergie per nucleon**.

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 een van de belangrijkste in de moderne natuurkunde en legt een relatie tussen massa en energie. Massa en energie kunnen in elkaar worden omgezet. Als massa verdwijnt ontstaat er energie en als 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)

De bindingsenergie van een atoomkern correspondeert met een hoeveelheid massa. Vergelijk je de massa van een atoomkern met de massa's van de losse protonen en neutronen, dan vind je altijd dat de atoomkern minder massa heeft. Dit verschil in massa noem je het **massadefect**. De bindingsenergie kun je uitrekenen door eerst het verschil in massa te berekenen en dit te vermenigvuldigen met c^2 .

Massadefect → een kern met meer bindingsenergie heeft minder massa.

Tot nu toe hebben we alleen naar het massagetal gekeken maar dit getal is niet gelijk aan de atoommassa, want een atoom bevat ook elektronen. Omdat het massadefect klein is moeten we hier rekening mee houden. Laten we eens kijken naar de vorming van de kern van het **deuteriumatoom** ^2H . Het deuteriumatoom bevat één proton en één neutron en is dus een isotoop van het waterstofatoom. De massa van de losse kerndeeltjes is: $m_p + m_n = 1,007276 + 1,008665 = 2,015941$ u. De massa van het deuteriumatoomkern is de atoommassa min de massa van een elektron: $2,014102 - 5,485799 \cdot 10^{-4} = 2,013553$ u en het massadefect is dus $2,015941 - 2,013553 = 0,002388$ u. Deze afname van de massa correspondeert met de bindingsenergie. In Binas vind je dat 1 u correspondeert met 931,4941 MeV en de bindingsenergie van deuterium is dus $0,002388 \cdot 931,4941 = 2,2244$ MeV. Deel je de bindingsenergie door het aantal kerndeeltjes dan krijg je de **bindingsenergie per nucleon**. Voor het ^2H atoom is dit $2,2244 / 2 = 1,1122$ MeV per nucleon. Zoals je zult zien heeft van alle kernen ^2H de minste bindingsenergie per nucleon. Begrijpelijk, want er zijn maar twee kerndeeltjes en er is dus maar één binding.

VOORBEELD de bindingsenergie per nucleon van een He-4 kern

Een He-4 kern heeft een massa van $4,002603 - 2 \cdot m_e = 4,001506$ u.

Bereken het massadefect bij de vorming van een He-4 kern.

- massa van losse kerndeeltjes: $2 \cdot 1,007276 + 2 \cdot 1,008665 = 4,031882$ u
- massa van He-4 kern is 4,001506 u
- verschil: $4,031882 - 4,001506 = 3,0376 \cdot 10^{-2}$ u

Bereken de bindingsenergie van een He-4 kern.

- het massadefect is $3,0376 \cdot 10^{-2}$ u
- dit correspondeert met $3,0376 \cdot 10^{-2} \cdot 931,4941 = 28,295$ MeV

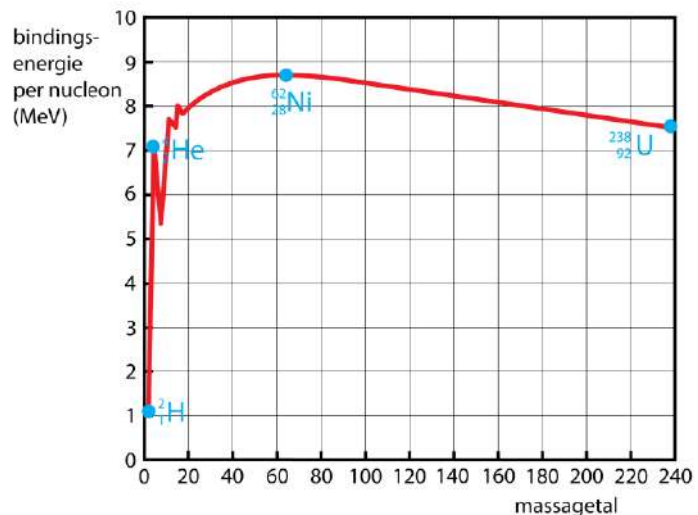
Bereken de bindingsenergie per nucleon van een He-4 kern.

- er zijn 4 nucleonen in een He-4 kern
- $28,295 / 4 = 7,074$ MeV

De bindingsenergie per nucleon is afhankelijk van het massagetal. Lichte en zware kernen hebben weinig bindingsenergie per nucleon. Bij kernen met massagetal tussen 60 – 70 is de bindingsenergie het grootst. Deze kernen hebben de grootste stabiliteit.

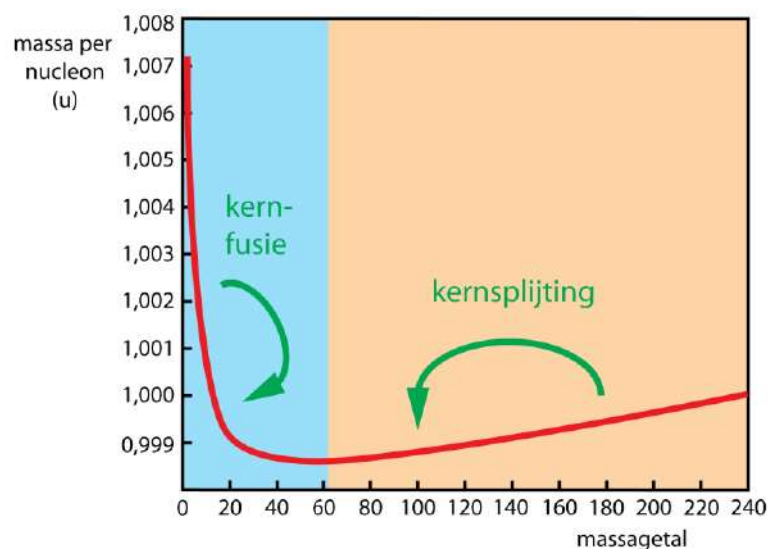
In figuur 41 zie je het diagram met op de verticale as de bindingsenergie per nucleon en op de horizontale as het massagetal. Ni-62 heeft de meeste bindingsenergie per nucleon. Vlak daarna komen de ijzerisotopen Fe-58 en Fe-56.

Figuur 41 Bindingsenergie per nucleon.



Een toename van de bindingsenergie correspondeert 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**. Het resultaat vind je in onderstaande tabel. We kunnen nu een diagram maken met op de verticale as de massa per nucleon, uitgedrukt in u, en op de horizontale as het massagetal. In figuur 42 zie je het resultaat. De gebieden waar kernfusie en kernsplijting energie opleveren zijn aangegeven.

atoom	kernmassa (u)	kerndeeltjes	massa per kerndeeltje (u)
^1_1H	1,00728	1	1,00728
^2_1H	2,01355	2	1,00678
^4_2He	4,00151	4	1,00038
$^{12}_6\text{C}$	11,99761	12	0,99973
$^{62}_{28}\text{Ni}$	61,91299	62	0,99860
$^{208}_{82}\text{Pb}$	207,93165	208	0,99967
$^{238}_{92}\text{U}$	238,00031	238	1,00000



Figuur 42 Massa per kerndeeltje.

Massadefect bij kernreacties

Hierboven heb je gezien hoe je uit met massadefect de bindingsenergie van een atoomkern kunt uitrekenen. Op basis hiervan kun je nu ook uitrekenen hoeveel energie er vrijkomt als een kernreactie verloopt. Het enige wat je hoeft te doen is de totale massa vóór de reactie te vergelijken met de totale massa ná de reactie. Verdwijnt er massa dan komt er energie vrij en kan de reactie spontaan verlopen. Ontstaat er massa dan is er energie nodig om de reactie te laten verlopen en is het geen spontane reactie. Hieronder een voorbeeld van een spontane reactie en een voorbeeld van een gestimuleerde reactie.

VOORBEELD massadefect bij β^- -verval van Fe-59

Een Fe-59 kern valt spontaan uiteen in een Co-59 kern en een β^- -deeltje (een elektron). Voor de reactie is de kinetische energie nul. Na de reactie hebben zowel de Co-59 kern als het β^- -deeltje kinetische energie.

Bereken het massadefect.

- reactievergelijking ${}^{59}_{26}\text{Fe} \rightarrow {}^0_{-1}\beta^- + {}^{59}_{27}\text{Co}$
- BEGIN massa Fe-59 kern = $58,93488 - 26 \cdot m_e$ massa's uitgedrukt in u
- EIND massa Co-59 kern = $58,93320 - 27 \cdot m_e$ + massa β^- -deeltje = $58,93320 - 26 \cdot m_e$
- EIND – BEGIN $26 \cdot m_e$ valt tegen elkaar weg
- $58,93320 - 58,93488 = -1,68 \cdot 10^{-3} \text{ u}$ minteken omdat massa verdwijnt
- massadefect = $1,68 \cdot 10^{-3} \text{ u} = 2,7897 \cdot 10^{-30} \text{ kg} \rightarrow$ massa is omgezet in energie

Bereken hoeveel energie er per reactie vrijkomt.

- $2,7897 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$ massa is omgezet in energie
- $E = m \cdot c^2$
- $E = 2,7897 \cdot 10^{-30} \cdot (2,99792458 \cdot 10^8)^2 = 2,50726 \cdot 10^{-13} = 2,51 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 1,56 \cdot 10^6 \text{ eV}$

VOORBEELD massadefect bij gestimuleerde reactie

Een α -deeltje wordt tegen een stilstaande N-14 kern geschoten. De N-14 kern valt uiteen in een O-17 kern en een proton. De kinetische energie van het α -deeltje vóór de reactie is groter dan de som van de kinetische energie van de O-17 kern en het proton na de reactie. Er is kinetische energie omgezet in massa.

Bereken het massadefect.

- reactievergelijking ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\alpha \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{p}$
- BEGIN massa N-14 kern + massa α -deeltje massa's uitgedrukt in u
 $14,00307 - 7 \cdot m_e + 4,002603 - 2 \cdot m_e = 18,005673 - 9 \cdot m_e$
- EIND: massa O-17 kern + massa proton
 $16,99913 - 8 \cdot m_e + 1,007825 - 1 \cdot m_e = 18,006958 - 9 \cdot m_e$
- EIND – BEGIN $9 \cdot m_e$ valt tegen elkaar weg
- $18,006958 - 18,005673 = +1,025 \cdot 10^{-3} \text{ u}$ plusteken omdat massa ontstaat
- massadefect = $+1,025 \cdot 10^{-3} \text{ u} = +1,702 \cdot 10^{-30} \text{ kg} \rightarrow$ energie is omgezet in massa

Bereken hoeveel energie er in massa wordt omgezet.

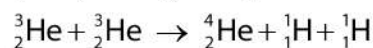
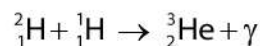
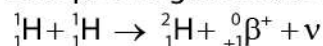
- $1,702 \cdot 10^{-30}$ kg massa is ontstaan uit energie
- $E = m \cdot c^2$
- $E = 1,702 \cdot 10^{-30} \cdot (2,99792458 \cdot 10^8)^2 = 1,5297 \cdot 10^{-13} = 1,53 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 9,55 \cdot 10^5 \text{ eV}$

Kernfusie en kernsplijting

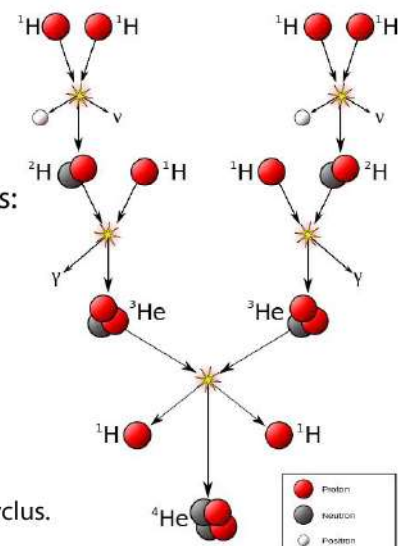
Bij het samensmelten van twee lichte kernen tot een grotere kern neemt de massa per nucleon af en ontstaat er energie. Het samensmelten van kleine kernen heet **kernfusie** en gebeurt in het blauwe gebied in figuur 42. Bij het splitsen van een grote atoomkern in twee of meer kleinere kernen neemt de massa per nucleon ook af en ontstaat er dus ook energie. Het splitsen van grote kernen heet **kernsplijting** en gebeurt in het oranje gebied in figuur 42.

– kernfusie in een ster –

Een ster, zoals de zon, straalt een enorme veel 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:



De netto reactie is: $4 {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2 {}^0_{+1}\beta^+ + 2 \gamma + 2 \nu$.



Figuur 43 De proton-proton cyclus.

Vier protonen smelten samen en vormen één He-4 kern. Verder ontstaan er twee positronen (β^+ -deeltjes), twee gamma-fotonen en twee neutrino's (ν -deeltjes). In figuur 43 zie je een schematische weergave van de proton-proton cyclus.

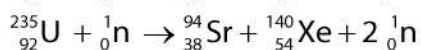
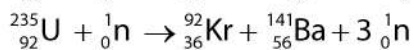
Splijting van uranium-235 kernen in een kerncentrale

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.

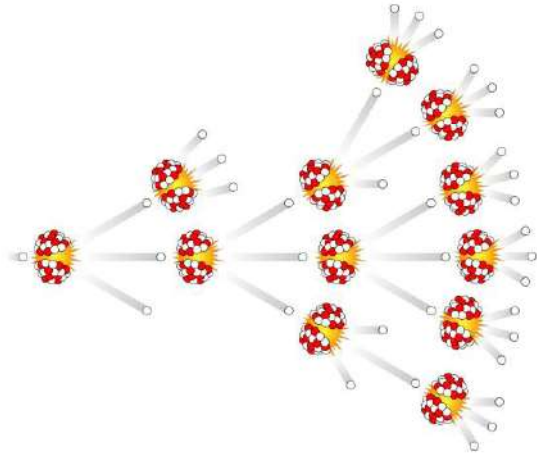
Bij de splijting van U-235 gebeurt het volgende:

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

Er zijn verschillende manieren waarop de U-235 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 worden opgenomen kan de kettingreactie overgaan in een **sneeuwbal-effect**, waarbij de reactiesnelheid explosief toeneemt. Een atoombom is hierop gebaseerd. In een energiecentrale mag een ongecontroleerde kettingreactie natuurlijk niet voorkomen. Zie figuur 44.



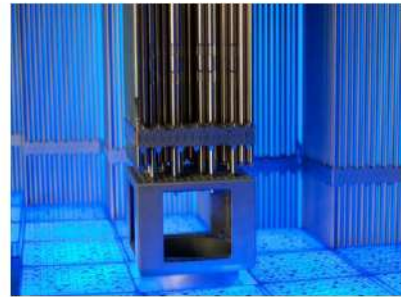
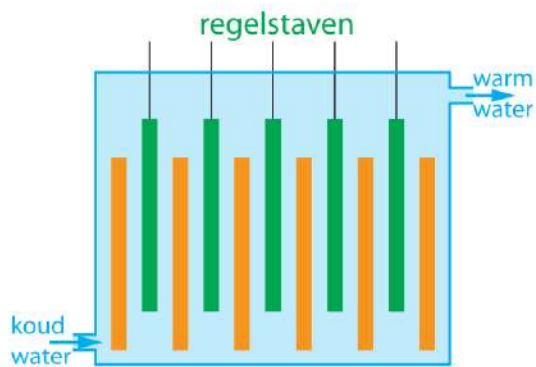
Figuur 44 Splijting van een U-235 kern.

De **vermenigvuldigingsfactor k** geeft aan of de splijtingsreactie steeds sneller verloopt, een constante snelheid heeft, of uitdooft. Factor k is het aantal neutronen dat een reactie veroorzaakt gedeeld door het aantal neutronen dat bij deze reactie vrijkomt. Er zijn drie mogelijkheden.

- k > 1** Per seconde worden steeds meer kernen gespleten waardoor de reactiesnelheid toeneemt. Als je niet snel ingrijpt ontstaat er een sneeuwbal-effect.
- k = 1** Per seconde wordt hetzelfde aantal kernen gespleten. De reactiesnelheid is constant. Dit noem je een **kritische kettingreactie**.
- k < 1** Per seconde worden steeds minder kernen gespleten. De reactiesnelheid neemt af. Als je niet ingrijpt stopt de kettingreactie.

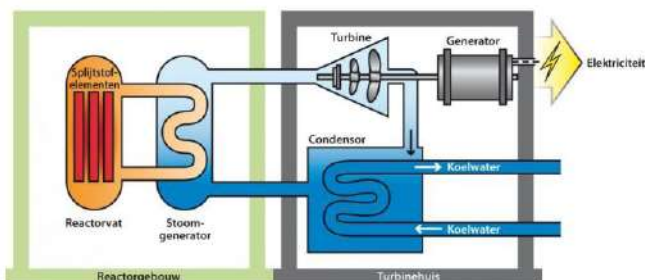
De werking van een kerncentrale

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 met een samenstelling van U-238 (99,274%), U-235 (0,72%) en U-234 (0,006%). 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 snelle centrifuges wordt het U-235 gescheiden van U-238 tot het percentage van 4% U-235 is bereikt. Van het verrijkte uranium worden **brandstofstaven** gemaakt. De brandstofstaven worden geplaatst in een kernreactor en om de splijtingsreacties op gang te brengen worden ze eenmalig kort beschoten met neutronen afkomstig van een externe bron. Tussen de brandstofstaven zijn **regelstaven** aangebracht die ondoordringbaar zijn voor neutronen. Met deze staven kun je de kernreactiesnelheid groter of kleiner maken. Zie figuur 45.

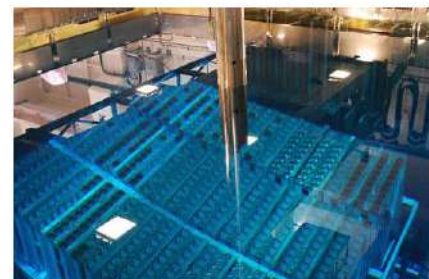


Figuur 45 Links reactorvat van een kerncentrale met brandstofstaven (oranje) en regelstaven (groen). Rechts foto van brandstofstaven en regelstaven in een kerncentrale.

De vrijkomende neutronen hebben teveel kinetische energie om een kettingreactie te veroorzaken en moeten eerst worden afgeremd. Dit gebeurt door tussen de brandstof- en regelstaven een **moderator** aan te brengen. Meestal wordt water als moderator gebruikt door de brandstof- en regelstaven onder water te plaatsen. De vrijkomende neutronen botsen met de protonkernen in het water, waarbij ze een groot deel van hun kinetische energie verliezen. Dit energieverlies wordt omgezet in warmte. De temperatuur van het water neemt hierdoor 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. Zie figuur 46.



Figuur 46 De werking van een kerncentrale.



Figuur 47 Cherenkovstraling.

Tijdens de kernreactie komen behalve neutronen ook α -, β - en γ -deeltjes vrij. Het water dat als moderator dient zorgt ook voor het afremmen van de α -, β -deeltjes. De β -deeltjes veroorzaken hierbij blauw licht, bekend onder de naam **cherenkovstraling**. Zie figuur 47.

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 48 Radioactief afval.

14.8 Samenvatting

Grootheden en eenheden

- q is de elektrische lading in coulomb (C) ook hoofdletter Q wordt gebruikt
- N is het aantal kernen | N_0 is het aantal kernen op $t=0$
- $t_{1/2}$ 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 $t=0$
- $d_{1/2}$ 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 ${}_0^1\text{n}$
 elektron ${}_{-1}^0\text{e}$ | positron ${}_{+1}^0\text{e}$



- 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

- $1 \text{ eV} = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ J} \rightarrow 1 \text{ MeV} = 1,60218 \cdot 10^{-13} \text{ J}$
- 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 verval.

- 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
 - K-vangst → K-schil elektron wordt opgenomen in de kern
- Kloppende reactievergelijking
 - massagetal begin = massagetal eind
 - lading begin = lading eind
- Bindingsenergie → energie nodig om een kern te splitsen in losse protonen en losse neutronen.
- Massadefect → een kern met meer bindingsenergie heeft minder massa.
- Kernfusie → twee kleine kernen smelten samen → energie komt vrij
Kernsplijting → een grote kern splits in twee of meer kleine kernen → energie komt vrij
- Brandstofstaven bevatten een radioactief isotoop (U-235), regelstaven regelen het doorlaten van neutronen, de moderator remt de neutronen af.

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

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

richtingscoëfficiënt van de raaklijn

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

$t_{1/2}$ **moet** in seconde

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

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

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

dosis in gray (Gy)

$$H = W_R \cdot D$$

equivalente dosis in sievert (Sv)

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

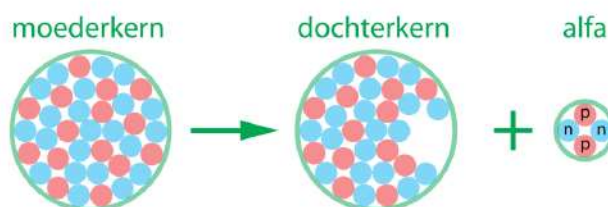
vermogen van de stralingsbron

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

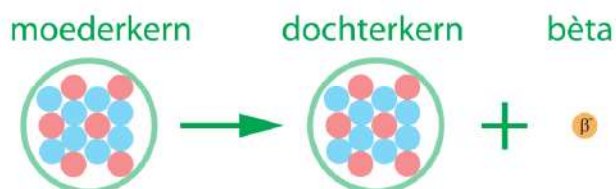
massa en energie zijn equivalent

Figuren

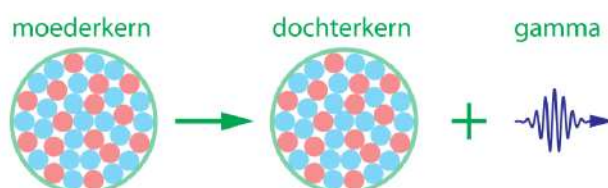
α -verval

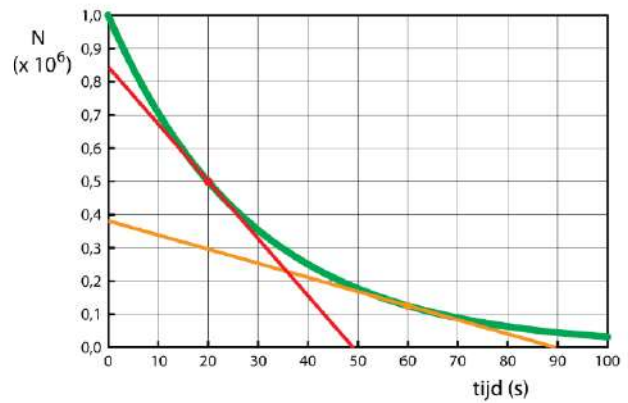
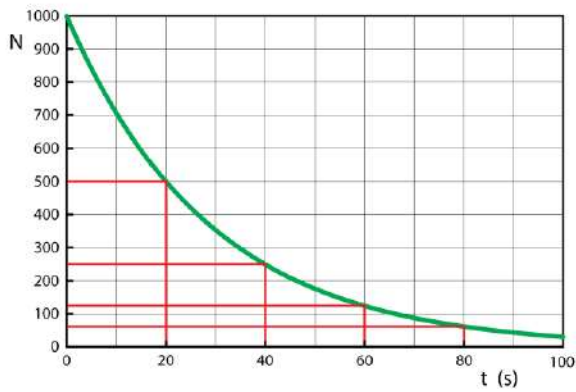


β^- -verval



γ -verval





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

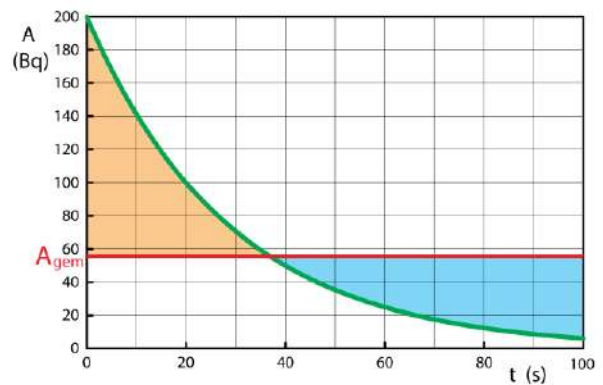
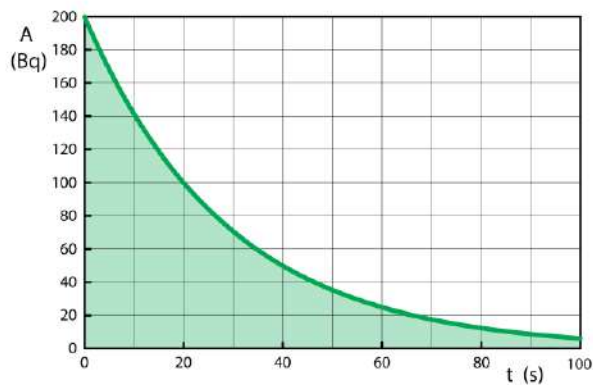
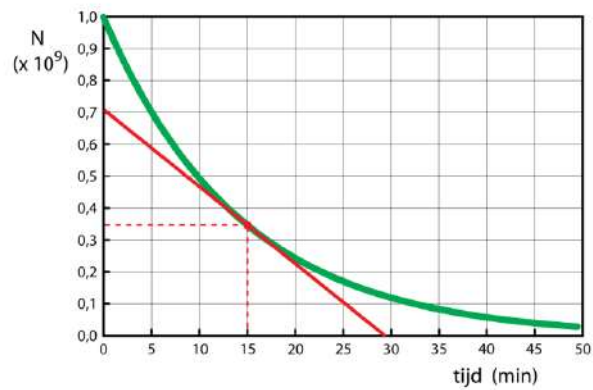
(N, t)-diagram.

De halveringstijd is 10 minuten = 600 s.

Op $t = 15$ min zijn er $0,35 \cdot 10^9$ kernen.

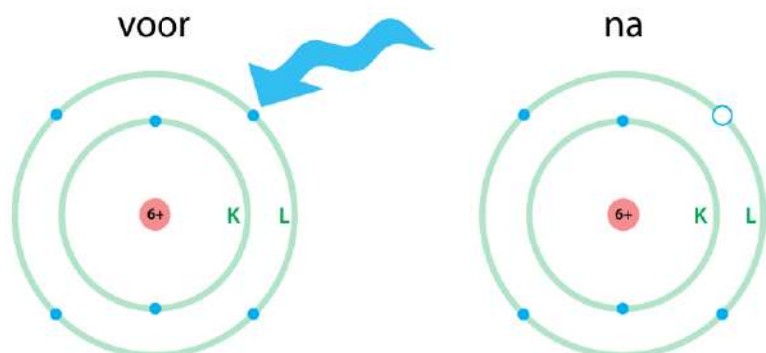
De activiteit is dan

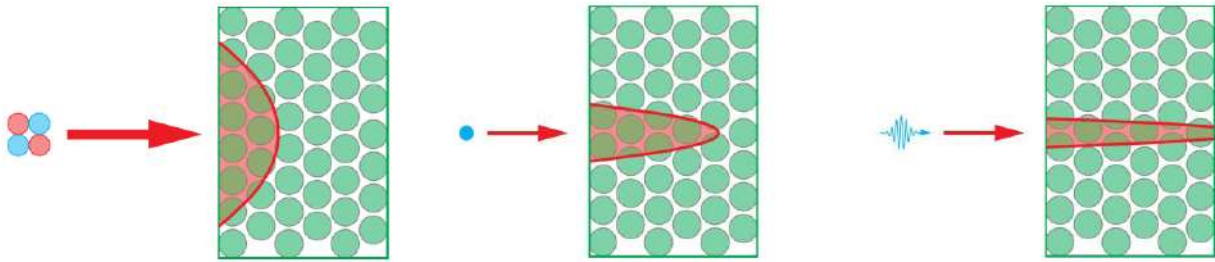
$$A = \frac{0,693}{600} \cdot 0,35 \cdot 10^9 = 4,0 \cdot 10^5 \text{ Bq}$$



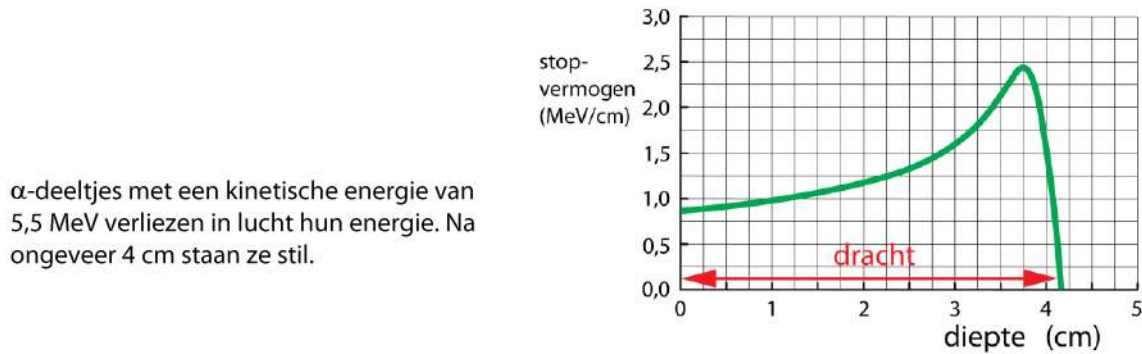
Het aantal vervallen kernen is gelijk aan de oppervlakte onder de (A, t)-grafiek. Deze oppervlakte kun je bepalen door hokjes te tellen of door A_{gem} te schatten. Bij A_{gem} is het oranje oppervlakte gelijk aan het blauwe oppervlakte.

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

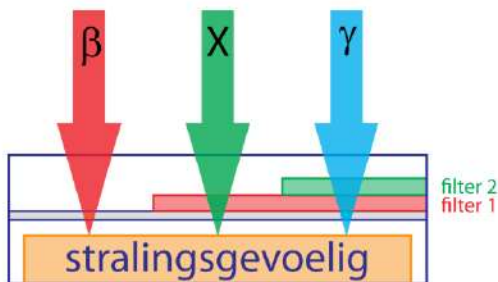
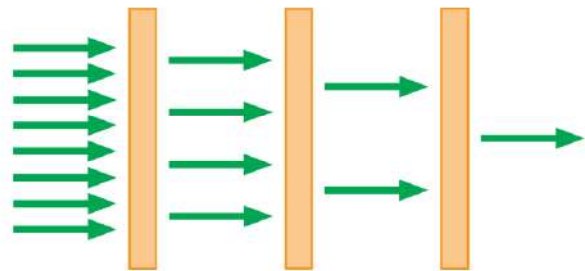




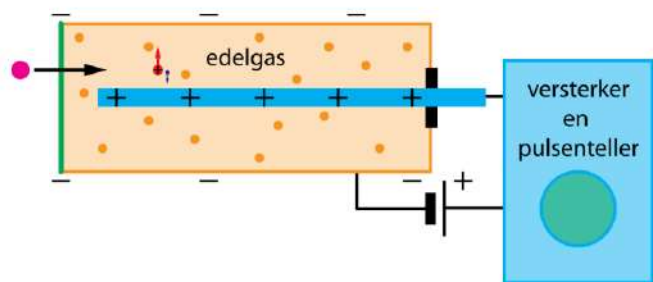
Links α -deeltjes kleine indringdiepte veel ionisatie.
 Midden β -deeltjes gemiddelde indringdiepte gemiddelde ionisatie.
 Rechts γ -fotonen grote indringdiepte weinig ionisaties.



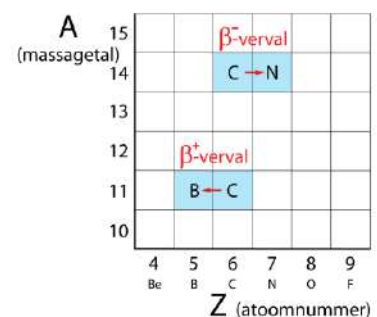
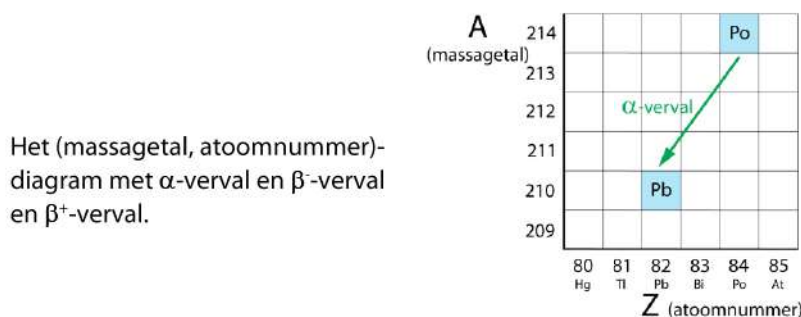
Fotonen (γ - of röntgenfotonen) worden geabsorbeerd. Na de halveringsdikte $d_{1/2}$ is de helft geabsorbeerd en gaat de andere helft verder. Drie keer achter elkaar een plaatje met dikte $d_{1/2}$ is gelijk aan één plaatje met een dikte $3 \cdot d_{1/2}$. Alleen waar als er geen reflectie is.

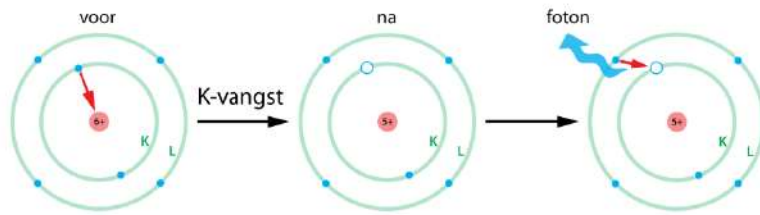


Een stralingsbadge wordt gebruikt om de hoeveelheid opgelopen straling te meten.

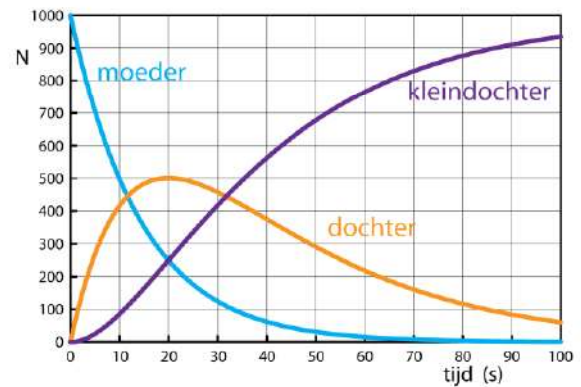
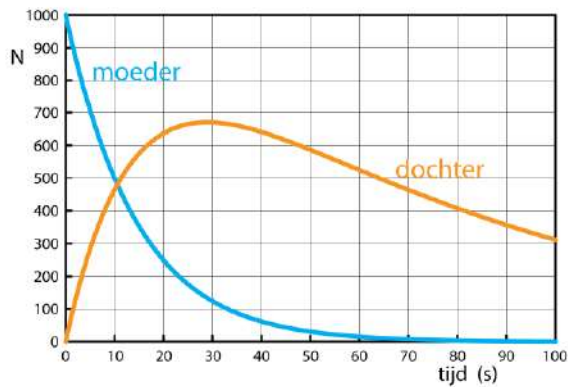


Een geigerteller wordt gebruikt om de aanwezigheid van α -, β - en γ -straling te meten.

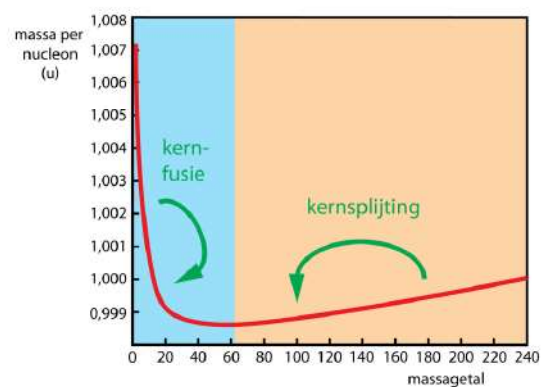
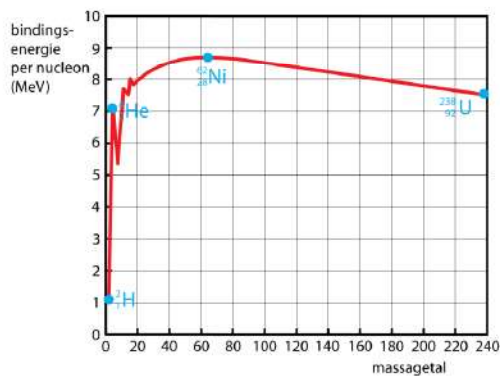




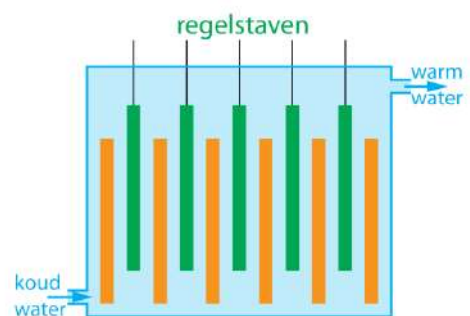
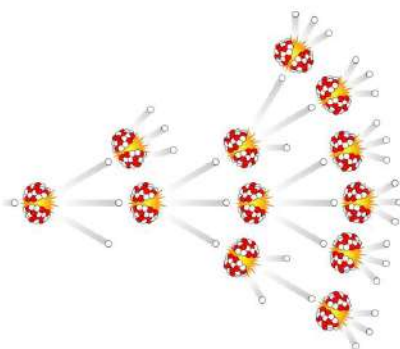
K-vangst in een C-11 atoom.



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. Het totaal aantal aanwezige kernen is constant want iedere moeder krijgt één dochter en iedere dochter één kleindochter.



De bindingsenergie per nucleon is afhankelijk van het massagetel. Hoe groter de bindingsenergie is hoe stabielere de kern. Aan de massa per nucleon kun je zien of energie ontstaat of verdwijnt. Bij kernfusie smelten kleine kernen samen waarbij massa verdwijnt en energie ontstaat. Bij kernsplijting valt een grote kern uit elkaar in twee of meer kleine kernen waarbij massa verdwijnt en energie ontstaat.



In een kerncentrale wordt radioactieve stof U-235 in de brandstofstaven (oranje) gesplitst, waarbij neutronen vrijkomen. Om de reactiesnelheid constant te houden zijn regelstaven (groen) nodig om neutronen af te vangen. Om de neutronen af te remmen is water als moderator nodig. Afremmende elektronen geven blauw licht: cherenkovstraling.