

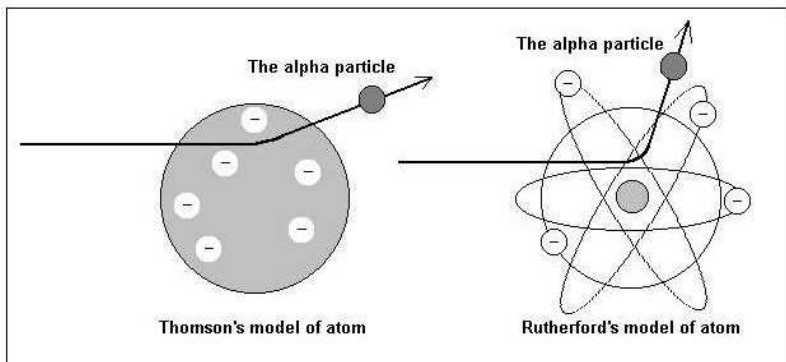
Radioactiviteit en Kernfysica

Inhoud:

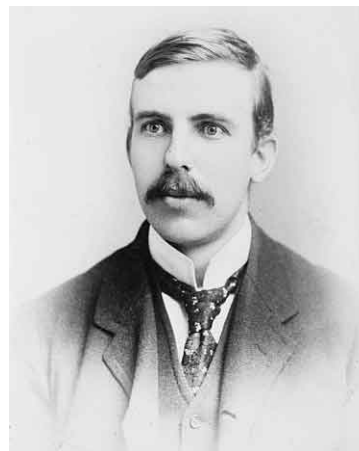
1. Atoommodel Rutherford – Bohr
2. Bouw van atoomkernen
 - A. Samenstelling
 - B. Standaardmodel
 - C. LHC
 - D. Isotopen
 - E. Binding
 - F. Energieniveaus
3. Energie en massa
 - A. Bindingsenergie
 - B. Massaverlies
 - C. Bindingsenergie per nucleon
 - D. Creatie en annihilatie
4. Radioactief verval
5. Tempo van verval
 - A. Activiteit
 - B. Halveringstijd
 - C. Voorbeeld: 116 gram Thorium-232
6. Ioniserende straling
 - A. Ioniserend en doordringend vermogen
 - B. Röntgenstraling
 - C. Effecten op de mens
 - D. Achtergrondstraling
7. Detectie van ioniserende straling
8. Toepassing van ioniserende straling
9. Kernreacties
 - A. Kunstmatig verval
 - B. Kernsplijting
 - C. Kernfusie

1 Atoommodel Rutherford – Bohr (H3 + § 4.2)

Rutherford heeft aangetoond (1911) dat atomen een positief geladen kern met protonen hebben.

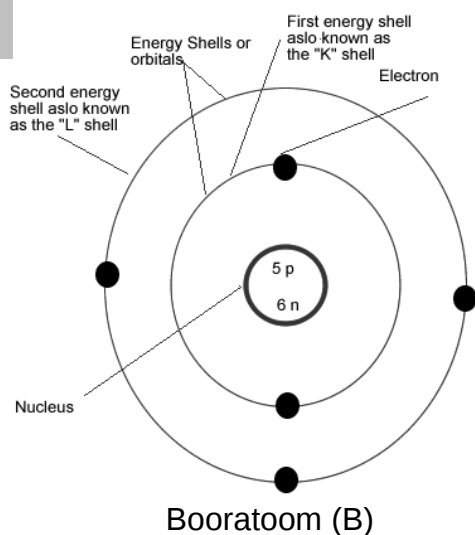


The models of the Thomson's atom and Rutherford's atom; and the expected aberrations of alpha particle in both cases.



Bohr heeft aangetoond (1913) dat elektronen slechts in bepaalde schillen kunnen zitten; bij de overgang van de ene naar de andere schil verandert de energie van het atoom en wordt een foton uitgezonden / geabsorbeerd:

$$E_{\text{foton}} = \Delta E = h \cdot f$$



2A Bouw van atoomkernen; samenstelling (§ 4.2)

- Een atoomkern is opgebouwd uit twee soorten kerndeeltjes (nucleonen): protonen en neutronen.
- Een proton heeft een positieve lading. De grootte van die lading bedraagt $1\text{ e} = 1,60 \cdot 10^{-19}\text{ C}$ (de elementairlading). Een neutron is elektrisch neutraal.
- Een proton en een neutron hebben een vrijwel even grote massa (BINAS 7).

De algemene notatie voor een atoom(soort) én voor een kern(soort) is: ${}^A_Z X$.

Z is het **atoomnummer**. Dit getal geeft het aantal protonen in de kern aan. Daarmee wordt de plaats bepaald van het betreffende element in het periodiek systeem. X is het scheikundige symbool voor dat element.

A is het **massagetal**. Dit getal geeft het totaal aantal nucleonen aan; dus de som van het aantal protonen én het aantal neutronen.

Voorbeeld: ${}^{63}_{29}\text{Cu}$. Het atoom heeft 29 als atoomnummer en is dus koper (Cu).

De kern van dit koperatoom bestaat uit 29 protonen en uit $63 - 29 = 34$ neutronen.

2B Bouw van atoomkernen; standaardmodel (§ 4.2)

Matter → **Atom** → **Nucleus** (containing **Proton** and **Neutron**) → **Electron** → **Quarks**

LEPTONS		QUARKS	
Electron Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1	Electron neutrino Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second	Up Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one	Down Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two
Muon A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second	Muon neutrino Created along with muons when some particles decay	Charm A heavier relative of the up; found in 1974	Strange A heavier relative of the down; found in 1974
Tau heavier still, it is extremely unstable; it was discovered in 1975	Tau neutrino Not yet discovered but believed to exist	Top Heavier still, found in 1995	Bottom Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory

Force Particles	
Gluons Carriers of the strong force between quarks Felt by: quarks The explosive release of nuclear energy is the result of the strong force	Photons Particles that make up light; they carry the electromagnetic force Felt by: quarks and charged leptons Electricity, magnetism and chemistry are all the results of the electromagnetic force
Intermediate vector bosons Carriers of the weak force Felt by: quarks and leptons Some forms of radioactivity are the result of the weak force	Gravitons Carriers of gravity Felt by: all particles with mass All the weight we experience is the result of the gravitational force

Volgens het 'standaardmodel' ($\pm$ 1975) bestaat alle materie uit leptonen en quarks.

Protonen en neutronen zijn geen elementaire deeltjes, maar bestaan uit drie quarks.
De eigenschappen van up quark en down quark (u en d) bepalen het proton en het neutron.

Proton (p^+)
aus 3 Quarks
elektrisch einfach positiv geladen

Neutron (n)
aus 3 Quarks
nicht elektrisch geladen

Austausch von Farbladungen

Quark	el. Ladung	Symbol
up-Quark	$+2/3$	u
down-Quark	$-1/3$	d

Proton (p^+) consists of 2 up quarks (u) and 1 down quark (d).
Neutron (n) consists of 1 up quark (u) and 2 down quarks (d).

Krachtdragende deeltjes zorgen voor:

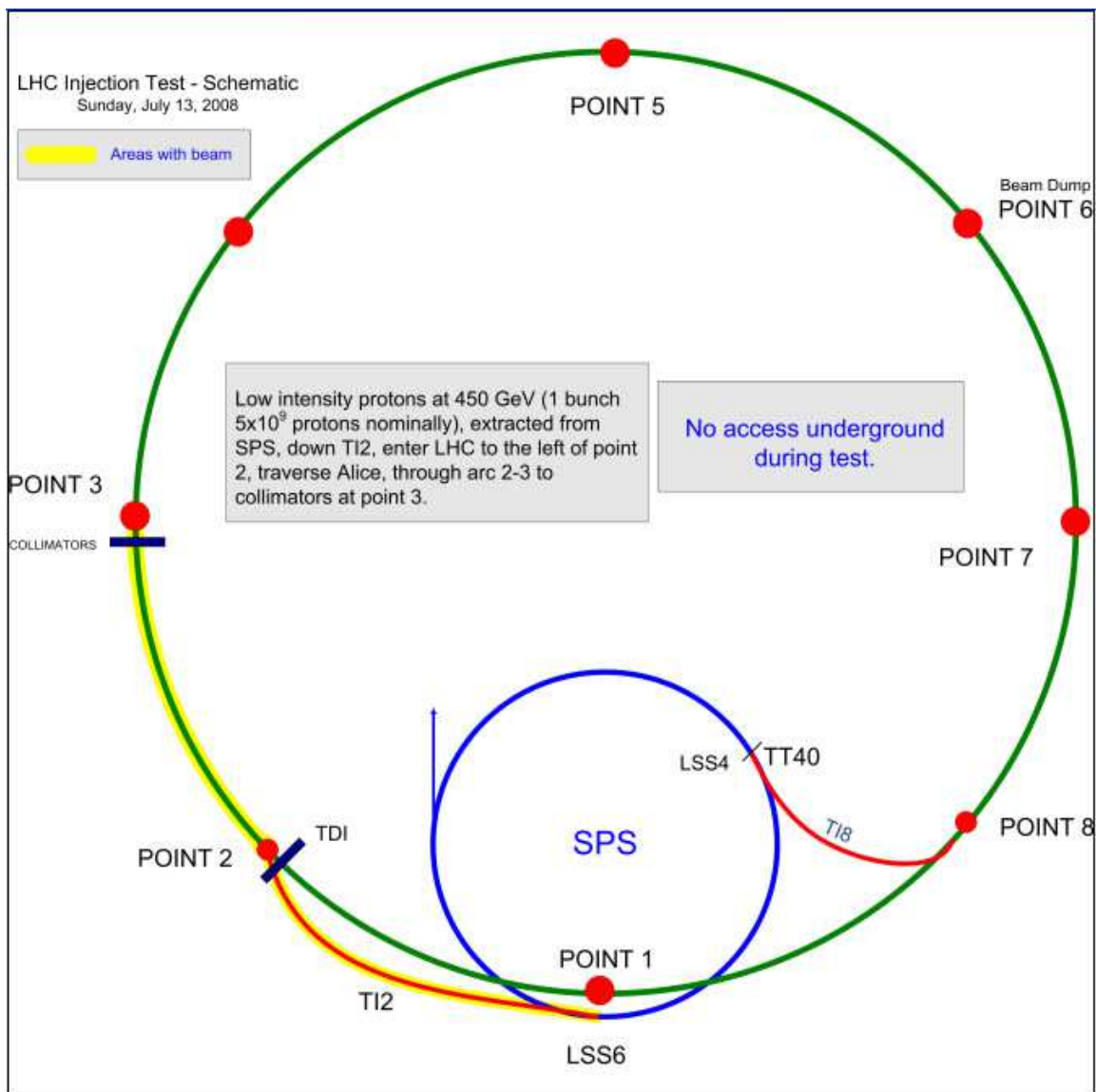
- Gluonen voor de sterke kernkracht, die quarks bij elkaar houdt
- Fotonen voor de elektromagnetische kracht tussen geladen deeltjes
- Bosonen voor de zwakke kernkracht, die belangrijk is bij radioactief verval
- Gravitonen voor de gravitatiekracht.

Naar het Higgsboson wordt koortsachtig gezocht (LHC CERN; Tevatron Fermilab).

2C Bouw van atoomkernen; LHC

http://nl.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider

<http://www.kennislink.nl/publicaties/de-lhc>



2D Bouw van atoomkernen; isotopen (§ 4.2)

Een element bestaat meestal uit twee of meer soorten atomen. Er is géén verschil in chemische eigenschappen, omdat deze atomen hetzelfde aantal elektronen (want hetzelfde aantal protonen) bezitten. Isotopen verschillen in massa, doordat het aantal neutronen verschilt.

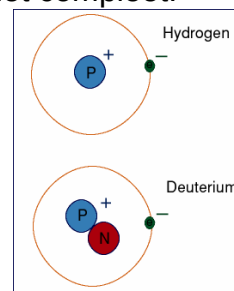
Een geschikte eenheid voor de massa van atomen is de atomaire massa-

eenheid u : $1 \cdot u = \frac{1}{12} \cdot \text{massa } {}^{12}_6\text{C} \text{ atoom} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ (BINAS 7).

Voorbeeld: In de natuur komen van koper de isotopen ${}^{63}_{29}\text{Cu}$ en ${}^{65}_{29}\text{Cu}$ voor.

De massa van de koperisotopen is bij benadering resp. $63 \cdot u$ en $65 \cdot u$.

- In BINAS 25 staat een isotopenlijst. Deze lijst is overigens niet compleet.
- Van waterstof komen in de natuur voor:
 - bijna 100 % ${}^1_1\text{H}$.
 - 0,015 % ${}^2_1\text{H}$ (deuterium of zwaar waterstof).
- Isotopen zijn uitsluitend te scheiden volgens methoden, die berusten op het verschil in massa; massaspectrometrie (**som 8**), ultracentrifuge, gasdiffusie.



2E Bouw van atoomkernen; binding

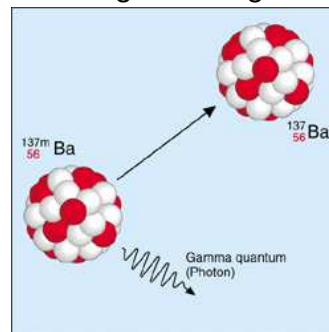
De protonen in een atoomkern oefenen een afstotende elektrische kracht op elkaar uit. Daar staat tegenover dat de nucleonen (zowel protonen als neutronen) ook een aantrekkende kracht op elkaar uitoefenen (de sterke kernkracht, die werkt op de quarks). De sterke kernkracht werkt slechts op zeer kleine afstanden (uitsluitend op nucleonen, die 'elkaars naaste burens' zijn).

Voor kleine atoomkernen (bijvoorbeeld een ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ kern) is het aantal neutronen in de kern ongeveer gelijk aan het aantal protonen. Naarmate de atoomkern groter is, neemt de verhouding van het aantal neutronen tot het aantal protonen

toe. Voor de grootste, nog stabiele, atoomkernen (bijvoorbeeld een ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ kern) is die verhouding ongeveer 3 : 2. Blijkbaar is een **neutronenoverschot** noodzakelijk bij grotere atoomkernen. Dit komt doordat elektrische afstoting tussen alle protonen in de kern belangrijk is. Door de extra neutronen in de kern, zijn deze protonen verder bij elkaar vandaan, waardoor de onderlinge elektrische afstoting kleiner is.

2F Bouw van atoomkernen; energieniveaus (§ 4.3)

- De inwendige energie van een atoomkern kan slechts bepaalde waarden hebben. Daardoor kan een atoomkern slechts in bepaalde toestanden bestaan: de grondtoestand en de aangeslagen toestanden¹ van de kern.
- In een atoomkern in de grondtoestand zijn de protonen en de neutronen optimaal gemengd; in een aangeslagen toestand is de rangschikking ('menging') van de nucleonen niet optimaal.
- Bij de overgang naar een lagere aangeslagen toestand (naar een betere menging van de nucleonen in de kern) wordt een foton uitgezonden. Omdat deze energieveranderingen groot zijn ($\approx \text{MeV}$), is dit **gammastraling**.



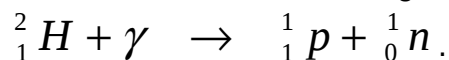
3A Energie en massa; bindingsenergie (§ 5.2)

De bindingsenergie van een kern kan op twee 'verschillende' manieren worden gedefinieerd:

- De energie die nodig is om alle nucleonen van een kern te scheiden
- De energie die vrijkomt bij de vorming van de kern uit losse nucleonen.

3B Energie en massa; massaverlies (§ 5.2)

De eenvoudigste kern met meer dan één nucleon is de deuteriumkern ${}^2_1\text{H}$ met een bindingsenergie van 2,2 MeV. Deze bindingsenergie is gemeten door deuterium te bestralen met gammastraling, waardoor de kern werd gesplitst:



Met de beroemde formule van Einstein $E = m \cdot c^2$ is deze bindingsenergie te berekenen, omdat bindingsenergie van een kern zich manifesteert in een equivalent verlies aan massa.

Massabalans (in u):

massa proton	1,007276	
massa neutron	1,008665	som: 2,015941

massa deuteriumkern $2,014102 - 0,000549 = 2,013553$

$$\Delta m = 0,002388 \cdot u = 0,002388 \cdot 931,49 = 2,224 \text{ MeV}.$$

$$(\text{BINAS 7: } 1 \cdot u = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,49 \text{ MeV})$$

¹ Een kern in een metastabiele aangeslagen toestand is een 'nucleaire isomeer'.

3C Energie en massa; bindingsenergie per nucleon (§ 5.2)

De bindingsenergie van een ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ kern is:

Massabalans (in u):

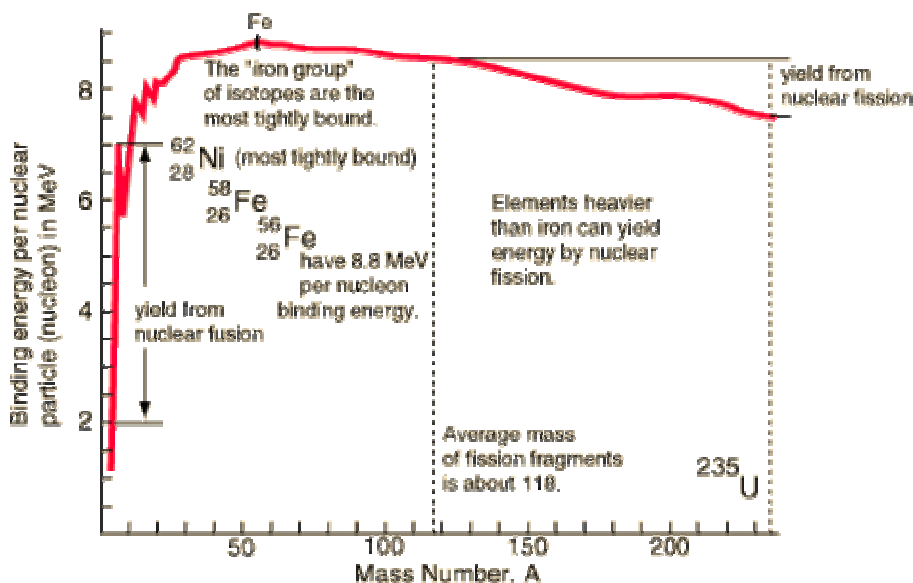
massa 26 protonen	$26 \cdot 1,007276 = 26,1892$	
massa 30 neutronen	$30 \cdot 1,008665 = 30,2600$	som: 56,4491

massa ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ kern	$55,93494 - 26 \cdot 0,000549 =$	55,9207
------------------------------------	----------------------------------	---------

$$\Delta m = 0,5285 \cdot u = 0,5285 \cdot 931,49 = 492,3 \text{ MeV.}$$

De bindingsenergie is vanzelfsprekend groter naarmate de kern meer nucleonen bevat; een uraniumkern heeft een grotere bindingsenergie dan een ijzerkern. Om de binding van een kern te beoordelen is het daarom zinvoller om te kijken naar de **bindingsenergie per nucleon**.

De bindingsenergie per nucleon van een ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ kern is: $\frac{492,3}{56} = 8,79 \text{ MeV}$.



Het blijkt dat de bindingsenergie per nucleon zowel voor lichte als voor zware kernen kleiner is dan voor middelzware kernen.

Er zijn dus twee processen mogelijk waarbij energie kan vrijkomen:

- ☐ door zware kernen te splijten (zie 9B)
- ☐ door lichte kernen te fuseren (zie 9C).

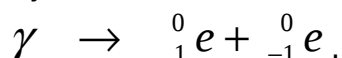
3D Energie en massa; creatie en annihilatie

Het feit dat massa en energie in elkaar kunnen worden omgezet wordt fraai bevestigd door de volgende processen:

□ **Creatie** (paarvorming)

Een γ -foton met voldoende energie kan overgaan in twee deeltjes (deeltje + antideeltje).

Bijvoorbeeld de creatie van een elektron en een positron (= anti-elektron):



Omdat het positron even zwaar is als het elektron, moet het foton minstens

$$E = 2 \cdot m_e \cdot c^2 = 2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (3,00 \cdot 10^8)^2 = 1,64 \cdot 10^{-13} \text{ J zijn.}$$

□ **Annihilatie** (vernietiging)

Een positron kan slechts uiterste korte tijd bestaan. Zodra het met een elektron botst, verdwijnen beide deeltjes. Er komt stralingsenergie vrij (twee of drie fotonen).



4 Radioactief verval (§ 4.3)

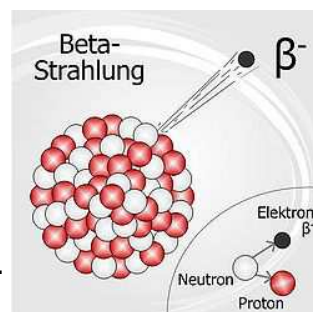
Niet alle kernen zijn stabiel. Als een kern instabiel is, vervalt het. Dit gebeurt spontaan. Bij dit natuurlijke (spontane) vervalproces komt energie vrij in de vorm van ioniserende straling (kernstraling).

Bij natuurlijke vervalprocessen geldt:

- De totale lading voor en na het verval is gelijk.
- Het totaal aantal nucleonen voor en na het verval is gelijk.
- Er komt energie vrij:
 - stralingsenergie (γ -fotonen)
 - kinetische energie van de materie deeltjes.

Er zijn vier oorzaken van instabiliteit:

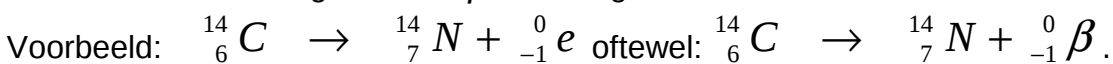
1. het aantal neutronen in de kern is te hoog
2. het aantal neutronen in de kern is te laag
3. het aantal nucleonen in de kern is te hoog
4. de kern bevindt zich in een aangeslagen toestand.



1. Het aantal neutronen in de kern is te hoog: β^- straling

Een neutron in de kern vervalt in een proton én een elektron².

Het elektron wordt uitgezonden: β^- straling.



Het elektron krijgt 156 keV kinetisch energie (BINAS 25).

² en een anti-elektronneutrino: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}_e$

<http://www.kennislink.nl/publicaties/neutrinos-niet-te-vatten>

2. Het aantal neutronen in de kern is te laag: β^+ straling óf K-vangst

Mogelijkheid 1:

Energie in de kern wordt omgezet in materie (creatie): er wordt een elektron – positron (anti-elektron) paar gevormd.

□ Het elektron vormt met een proton een neutron: ${}_1^1p + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_0^1n$.

□ Het positron wordt uitgezonden: β^+ straling.

Voorbeeld: ${}_{6}^{10}C \rightarrow {}_{5}^{10}B + {}_1^0e$ oftewel: ${}_{6}^{10}C \rightarrow {}_{5}^{10}B + {}_1^0\beta$.

Het positron krijgt 2,2 MeV kinetisch energie (BINAS 25).

Mogelijkheid 2:

Een elektron uit de (binnenste) K-schil wordt door de kern ingevangen: K-vangst of 'electron-capture' (E.C.).

□ Het elektron vormt met een proton een neutron: ${}_1^1p + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_0^1n$.

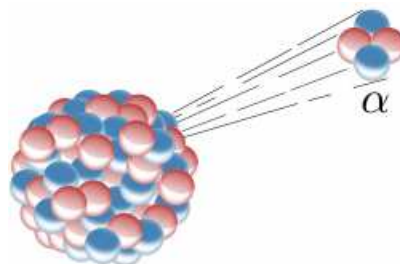
□ Het 'gat' in de K-schil wordt opgevuld door elektronen die vanuit hogere schillen terugvallen; daarbij ontstaat (een spectrum van) röntgenstraling.

Voorbeeld: ${}_{26}^{55}Fe + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_{25}^{55}Mn$.

Er wordt röntgenstraling uitgezonden, kenmerkend voor mangaan.

3. Het aantal nucleonen in de kern is te hoog: α straling

Twee protonen + twee neutronen samen (He-kern of α deeltje) schieten uit de kern.



Voorbeeld: ${}_{86}^{220}Rn \rightarrow {}_{84}^{216}Po + {}_2^4He$ oftewel: ${}_{86}^{220}Rn \rightarrow {}_{84}^{216}Po + {}_2^4\alpha$.

Het α deeltje krijgt 6,4 MeV kinetisch energie (BINAS 25).

4. De kern bevindt zich in een aangeslagen toestand: γ straling

Kernen verkeren vaak in een aangeslagen toestand als zij door een kernreactie of door radioactief verval zijn ontstaan³.

De kern gaat (meestal na zeer korte tijd) over in een lagere energietoestand (eventueel de grondtoestand). Er wordt γ straling uitgezonden. Uit het γ spectrum kunnen de verschillende energieniveaus van de kern worden afgeleid.

³ Meestal gaat α straling of β straling daarom gepaard met γ straling.

5A Tempo van verval; activiteit (§ 4.4)

Niet alle kernen zijn stabiel. Als een kern instabiel is (als de stof 'radioactief' is), vervalt het.

Instabiele kernen hebben een zekere kans om in een bepaalde periode (bijvoorbeeld de komende seconde) te vervallen⁴. Bij zeer instabiele kernen is die kans zeer groot.

Activiteit A is het aantal kernen dat per seconde vervalt: $[A] = \text{Bq} = \text{s}^{-1}$.

De activiteit is evenredig met het aantal (nog) aanwezige kernen N :

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \rightarrow N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

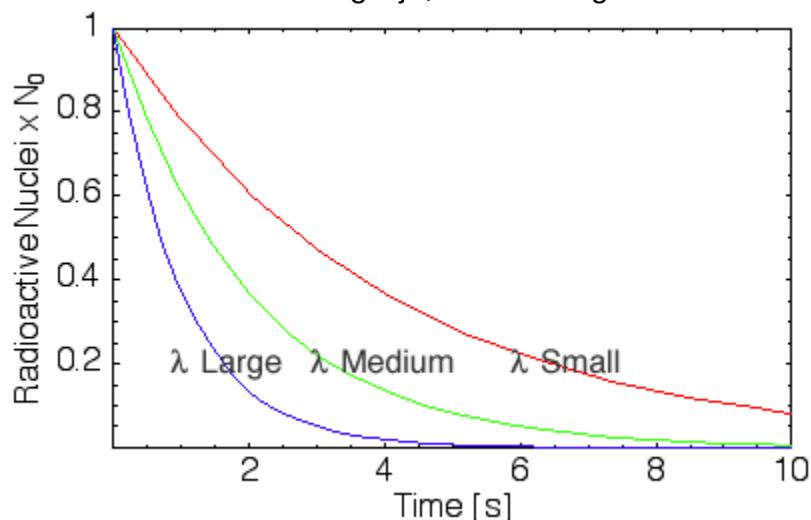
$N(t)$: het aantal aanwezige kernen op tijdstip t

$N(0)$: het beginaantal kernen

λ : de vervalconstante van de stof

De activiteit van een stof is groot als:

- De stof zeer instabiel is (λ groot is).
- Er zeer veel instabiele kernen aanwezig zijn, die dus nog kunnen vervallen.



Bewijs:

$$\frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda \cdot dt$$

$$\int_0^t \frac{dN(t)}{N(t)} = \int_0^t -\lambda \cdot dt$$

$$\ln N(t) = -\lambda \cdot t + C$$

$$\ln N(0) = -\lambda \cdot 0 + C \rightarrow C = \ln N(0)$$

$$\ln N(t) - \ln N(0) = -\lambda \cdot t$$

$$\ln \frac{N(t)}{N(0)} = -\lambda \cdot t$$

$$\frac{N(t)}{N(0)} = e^{-\lambda \cdot t}$$

⁴ Wanneer een kern precies vervalt is dus niet te berekenen.

5B Tempo van verval; halveringstijd (§ 4.2)

Exponentiële afname wordt gekenmerkt door een constante halveringstijd $t_{1/2}$ (t_h).

Er geldt:
$$N(t) = N(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_h}$$

Na $1 \cdot t_{1/2}$ is er nog 50,0 % van de oorspronkelijk aanwezige kernen: $N(t) = \frac{1}{2} \cdot N(0)$

Na $2 \cdot t_{1/2}$ is er nog 25,0 % van de oorspronkelijk aanwezige kernen: $N(t) = \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot N(0)$

Na $3 \cdot t_{1/2}$ is er nog 12,5 % van de oorspronkelijk aanwezige kernen: $N(t) = \left(\frac{1}{2}\right)^3 \cdot N(0)$

Na $4 \cdot t_{1/2}$ is er nog 6,25 % van de oorspronkelijk aanwezige kernen: $N(t) = \left(\frac{1}{2}\right)^4 \cdot N(0)$
etc.

Een zeer instabiel stof wordt gekenmerkt door:

- ☐ Een grote vervalconstante λ
- ☐ Een kleine halveringstijd t_h .

Verband tussen λ en t_h :
$$\lambda \cdot t_h = \ln 2$$

Bewijs:

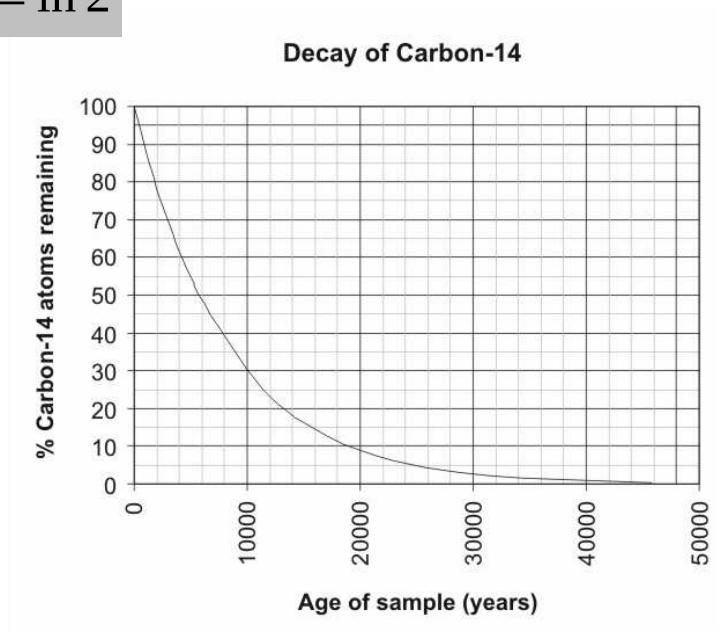
$$e^{-\lambda \cdot t} = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_h}$$

$$\ln[e^{-\lambda \cdot t}] = \ln\left[\left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_h}\right]$$

$$-\lambda \cdot t = \frac{t}{t_h} \ln\left(\frac{1}{2}\right)$$

$$\lambda \cdot t = \frac{t}{t_h} \ln(2)$$

$$\lambda \cdot t_h = \ln(2)$$



Bepaling halveringstijd ${}^{14}_6\text{C}$: $3 \cdot t_{1/2} = 17 \cdot 10^3 \text{ jaar} \rightarrow t_{1/2} = 5,7 \cdot 10^3 \text{ jaar}$.

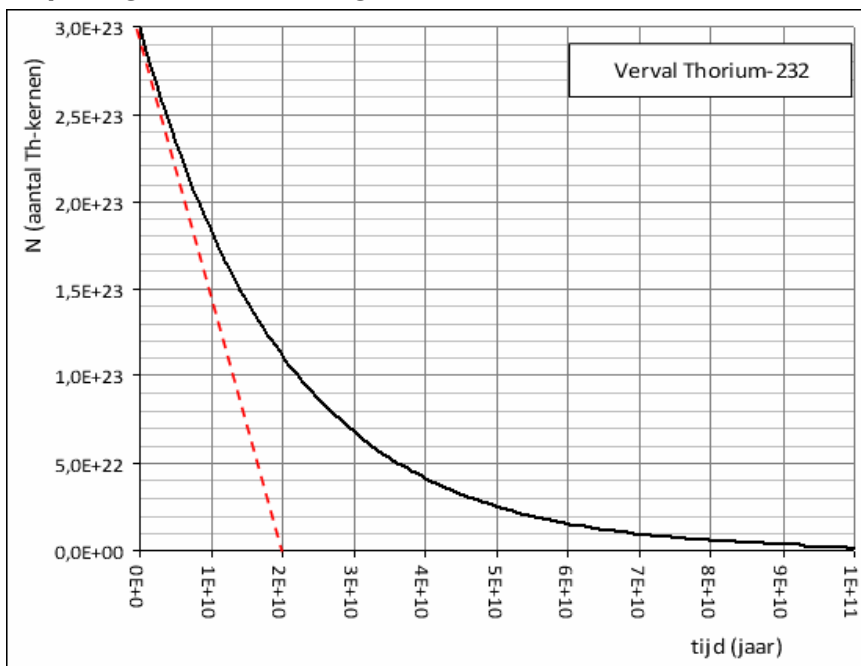
Bestudeer: <http://phet.colorado.edu/en/simulation/alpha-decay>

Berekening activiteit 116 gram ${}^{232}_{90}\text{Th}$:

Er geldt:
$$A(t) = \lambda \cdot N(t) = \frac{\ln 2}{t_h} \cdot N(t)$$

$$A(0) = \frac{\ln 2}{14 \cdot 10^9 \cdot 3,15 \cdot 10^7} \cdot 3,0 \cdot 10^{23} = 47 \cdot 10^4 \text{ Bq}.$$

Bepaling activiteit 116 gram ${}^{232}_{90}\text{Th}$:



$$A(0) = - \frac{\Delta N}{\Delta t} = (-) \frac{(-) 3,0 \cdot 10^{23}}{2,0 \cdot 10^{10} \cdot 3,15 \cdot 10^7} = 48 \cdot 10^4 \text{ Bq}$$

Na hoeveel jaar is de activiteit van het thorium⁵ gedaald tot $9,4 \cdot 10^3 \text{ Bq}$?

$$\frac{A(t)}{A(0)} = \frac{9,4 \cdot 10^3}{47 \cdot 10^4} = 0,020 = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/t_h} = \left(\frac{1}{2}\right)^{t/14 \cdot 10^9}$$

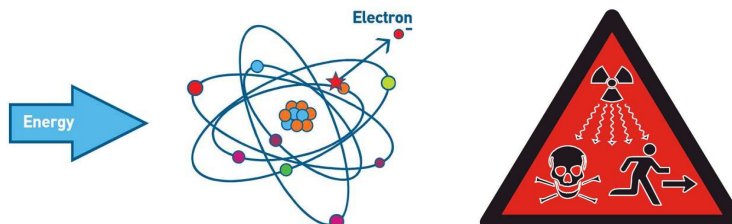
$$\rightarrow \ln(0,020) = \frac{t}{14 \cdot 10^9} \cdot \ln(0,5)$$

$$\rightarrow t = 14 \cdot 10^9 \cdot \frac{\ln(0,020)}{\ln(0,5)} = 79 \cdot 10^9 \text{ jaar}$$

⁵ Er wordt geen rekening gehouden met de radioactieve vervalproducten.

6A Ioniserende straling; doordringend vermogen (§ 4.5 + 4.8)

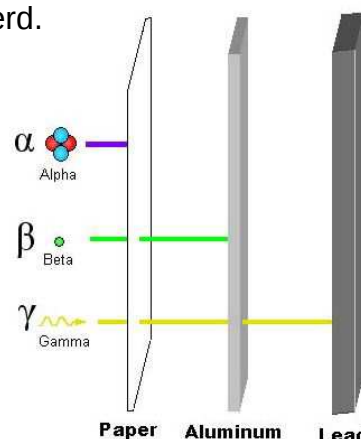
Ioniserende straling kan atomen ioniseren. Het bezit (ruim) voldoende energie om elektronen uit de buitenste schillen van atomen weg te slaan, zodat er positieve ionen ontstaan. Daardoor kunnen biochemische processen (bijvoorbeeld in het menselijke lichaam door beschadiging van DNA en/of afbraak van eiwitten en/of **mutatie** = reproductie beschadigde cellen) ernstig verstoord worden.



α en β straling zijn geladen deeltjes met een grote kinetische energie. Bij iedere botsing met een atoom geven zij een klein deel van hun kinetische energie af, waardoor het atoom wordt geïoniseerd.

γ straling is elektromagnetische straling. Met de energie van de fotonen die worden geabsorbeerd, worden atomen geïoniseerd.

Doordat α en β straling binnen een korte afstand met zeer veel atomen botsen, is hun **doordringend vermogen**⁶ (dracht) gering.



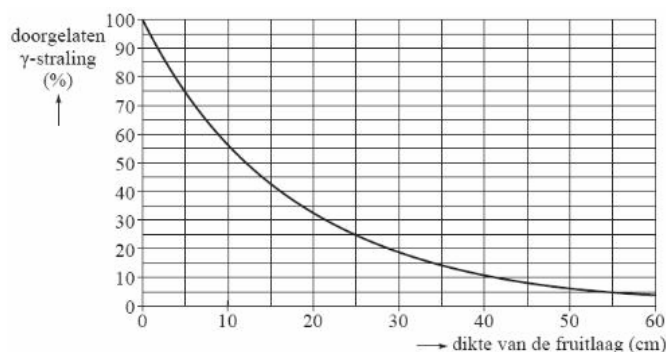
γ straling heeft een groot doordringend vermogen; er is een dikke loden plaat nodig om bijna alle fotonen te absorberen.

Halveringsdikte d_h (BINAS 28E)

De hoeveelheid γ straling⁷ dat een materiaal doorlaat, hangt af van:

- ❑ de energie van de straling
- ❑ het soort materiaal
- ❑ de dikte van het materiaal.

Er geldt:
$$I(x) = I(0) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{x/d_h}$$



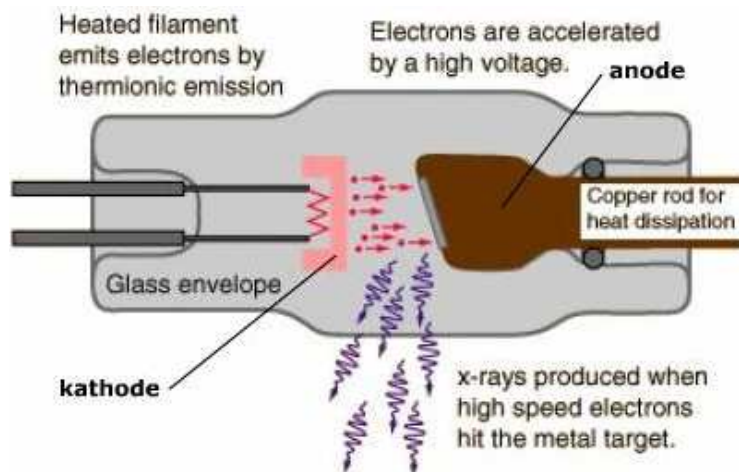
<http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=938740>

⁶ Positronen hebben 'geen' doordringend vermogen: 'directe' annihilatie met elektronen.

⁷ of röntgenstraling

6B Ioniserende straling; röntgenstraling (§ 4.1)

Ook (harde) röntgenstraling heeft een ioniserende werking.
Röntgenstraling ontstaat bij K-vangst en in een röntgenbuis.



Bestudeer het artikel (inclusief de bijlessen en de opgaven):

<http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=764284>

6C Ioniserende straling; effecten op de mens (§ 4.7)

Bestraling: De bron van de ioniserende straling bevindt zich op (enige) afstand.

Bescherming tegen α en β bestraling: bron afschermen.

Bescherming tegen γ / röntgenstraling: bron afschermen (lood / beton)
afstand bewaren ('kwadratenwet')
(lange) blootstelling vermijden.

Besmetting: de bron van de ioniserende (α of β) straling is in/op het lichaam.

Bescherming tegen besmetting: zorgvuldig beheer radioactieve stoffen.

ALARA principe⁸: bestraling en besmetting worden zoveel als redelijkerwijs mogelijk is beperkt.

Gezondheidseffecten ioniserende én niet-ioniserende straling:

www.rivm.nl/milieuportaal/dossier/milieuengezondheid/themas/straling-en-em-velden/

⁸ ALARA = 'As Low As Reasonably Achievable'

Gezondheidseffecten van ioniserende straling hangen af van:

- de soort straling
- de energie van de straling
- de intensiteit van de straling
- het lichaamsdeel dat wordt bestraald
- de leeftijd.

Stralingsbelasting dient zoveel mogelijk te worden beperkt.

Stralingsdosis D De hoeveelheid stralingsenergie die 1 kg weefsel absorbeert.

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

$$[D] = \text{Gray} = \text{Gy} = \text{J/kg}.$$

Omdat bij gelijke stralingsdosis het ioniserend vermogen van α straling 20 x zo groot is als van de andere soorten straling, is de **stralingsweegfactor** w_R en de **dosisequivalent** H ingevoerd:

$$H = w_R \cdot \frac{E_{abs}}{m} = w_R \cdot D$$

$$[H] = \text{Sievert} = \text{Sv} = \text{J/kg}.$$

soort straling	weegfactor w_R
α	20
β	1
γ	1
röntgen	1

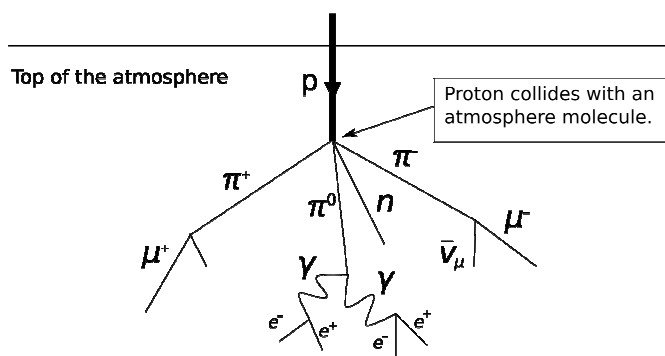
De dosisequivalent dient per jaar onder 20 mSv te zijn (BINAS 27G en 27H).

6D Ioniserende straling; achtergrondstraling (§ 4.1)

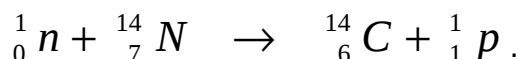
Achtergrondstraling is de ioniserende straling die voortdurend aanwezig is.

Natuurlijke achtergrondstraling:

- Ten gevolge van radioactieve isotopen in de bodem en in bouwmaterialen. Bijvoorbeeld: Radon (Rn) is een radioactief edelgas, dat o.a. ontstaat bij het verval van radium (Ra). Het komt van nature in de lucht voor. In (kruipruimtes van) woningen kan het gas zich ophopen. Door inademen van radon vindt besmetting plaats. Omdat radon een α straler is, is er dan sprake van stralingsbelasting van kwetsbaar longweefsel.
- Ten gevolge van **kosmische straling** uit het heelal. Protonen en heliumkernen met grote kinetische energie botsen (hoog) in de atmosfeer met vooral stikstof en zuurstofmoleculen.



Het radioactieve koolstof-14 is een van de isotopen die zo ontstaan:



Koolstof-14 is van belang bij dateringen van materialen van biologische oorsprong: www.kennislink.nl/publicaties/hoe-oud-is-de-holenmens.

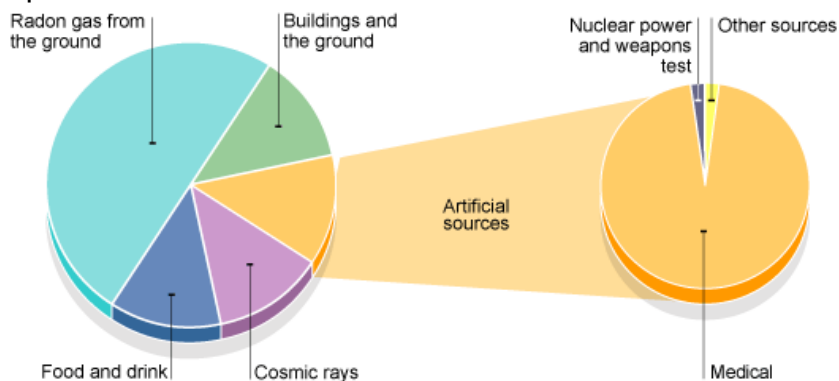
Kunstmatige achtergrondstraling:

- Ten gevolge van het testen en gebruiken van kernwapens
- Ten gevolge van toepassing van en ongelukken met kernenergie.

Radiologie:

De moderne gezondheidszorg is verantwoordelijk voor een significant deel van de stralingsbelasting.

- Diagnose: het vaststellen van ziektebeelden
- Therapie: het behandelen van ziektebeelden.



7 Detectie van ioniserende straling: Boek § 4.6

- ❑ Badge
- ❑ Bellenvat
- ❑ Geigermüller teller
- ❑ Dradenkamer



8 Toepassing van ioniserende straling: Boek § 4.8 +

http://www.fi.uu.nl/isp/bestanden/website_info_toepassingen.pdf

- ❑ Radiodiagnose
 - Röntgenfoto
 - CT-scan

http://www.schooltv.nl/beeldbank/clip/20061103_ctscan

- Tracers; b.v. ${}^{99m}_{43}\text{Tc}$

<http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=678476>

http://www.schooltv.nl/beeldbank/clip/20061221_gamma01

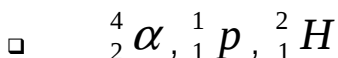
- ❑ Radiotherapie
 - Inwendige bestraling
 - Uitwendige bestraling
- ❑ Industriële toepassingen

9 Kernreacties door het beschieten van atoomkernen (§ 5.1)

Bij radioactief verval treedt een spontane kernreactie op, doordat de kern instabiel is.

Kernreacties kunnen ook optreden door een atoomkern te 'beschieten', zodat er een deeltje (projectiel) de atoomkern binnendringt.

In de kernfysica gebeurt dit beschieten met:



De projectielen zijn positief geladen en worden dus door de atoomkern afgestoten. Om de atoomkern binnen te dringen moeten deze projectielen dus een zeer grote kinetische energie bezitten (deeltjesversnellers).



Neutronen ondervinden geen afstotende kracht van de atoomkern. Het blijkt dat de kinetische energie van de neutronen niet 'te groot' mag zijn om een kernreactie te veroorzaken⁹.

Als het projectiel door de atoomkern wordt 'ingevangen', ontstaat een tussenkern.

Er zijn vervolgens drie mogelijkheden:

1. De tussenkern verval (kunstmatig verval)
2. Kernsplijting
3. Kernfusie.

Er komt in ieder geval γ straling vrij, omdat de kernen in een aangeslagen toestand ontstaan. Bij de kernreacties wordt het γ foton (meestal) weggelaten.

⁹ Zie 'moderator' bij kernsplijting

9A Kernreacties; kunstmatig verval

Ook nu geldt bij iedere kernreactie:

- De totale lading voor en na het verval is gelijk.
- Het totaal aantal nucleonen voor en na het verval is gelijk.

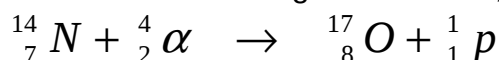
In tegenstelling tot natuurlijk verval treedt kunstmatig verval niet spontaan op.

Als er sprake is van massa-afname, komt er bij het vervalproces energie vrij.

Als er sprake is van massatoename, is de hoeveelheid energie na de reactie kleiner dan ervoor.

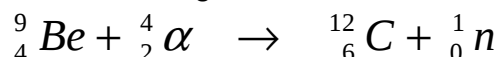
Voorbeelden:

- De eerste kunstmatige kernreactie; Rutherford 1919



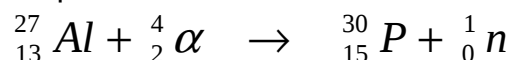
Het proton vliegt weg: **protonstraling**.

- De ontdekking van het neutron; Chadwick 1932

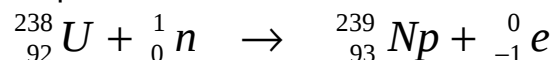


Het neutron vliegt weg: **neutronstraling**.

- De productie van de eerste kunstmatige radioactieve stof; Joliot - Curie 1934



- De productie van de eerste 'transuraan'; 1940



Massabalans van deze reactie (in u):

massa voor = massa ${}_{92}^{238}\text{U}$ atoom + massa neutron – massa 92 elektronen

massa na = massa ${}_{93}^{239}\text{Np}$ atoom + massa elektron – massa 93 elektronen

$$\Delta m = \text{massa } {}_{93}^{239}\text{Np} \text{ atoom} - \text{massa } {}_{92}^{238}\text{U} \text{ atoom} - \text{massa neutron}$$

$$= 239,05293 \cdot u - 238,05079 \cdot u - 1,00867 \cdot u = -0,00653 \cdot u.$$

Bij deze reactie neemt de massa af. Er komt $0,00653 \cdot 931,49 = 6,08 \text{ MeV}$ energie vrij¹⁰.

Het elektron krijgt kinetische energie; hoeveel is niet te zeggen, omdat:

- Het neutron voor de reactie een onbekende hoeveelheid kinetische energie bezat.
- Er ook γ straling (met onbekende frequentie) vrijkomt.

¹⁰ Zie boek bladzijde 205 voor een voorbeeld waarbij de massa toeneemt en de totale kinetische energie na de kernreactie dus kleiner is dan ervoor.

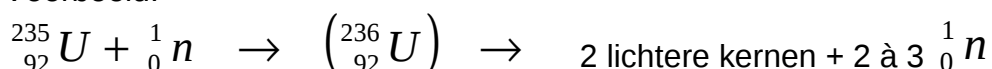
N.B. Bij natuurlijk verval neemt de massa altijd af (komt er altijd energie vrij).

9B Kernreacties; kernsplijting (§ 5.3)

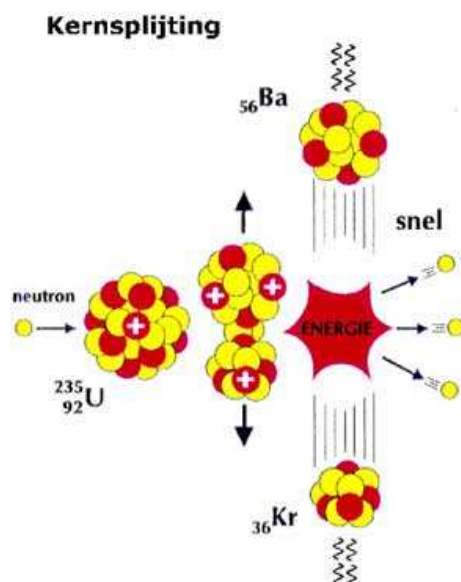
Kernen van ${}^{235}_{92}\text{U}$ en ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ kunnen splijten (splitsen) na vangst van een langzaam ('thermisch') neutron.

De totale massa van de brokstukken + de losse neutronen die vrijkomen is kleiner dan de massa van de tussenkern ${}^{236}_{92}\text{U}$ of ${}^{240}_{94}\text{Pu}$. Bij deze splijtingen komt dus energie vrij (kinetische energie van de brokstukken en de neutronen).

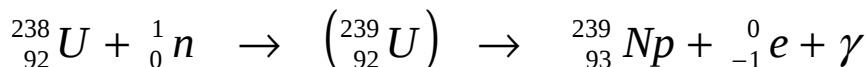
Voorbeeld:



- Het invallende neutron moet 'langzaam' zijn, anders ontstaat de tussenkern niet.
 - Het is niet te voorspellen welke lichtere kernen uit de tussenkern ontstaan. Er zijn veel mogelijkheden.
 - De nieuw gevormde lichtere kernen krijgen een grote kinetische energie. Deze energie wordt overgedragen aan de omgeving: warmte.
 - De vrijgekomen neutronen zijn 'snel'. Deze neutronen moeten afgeremd worden om een nieuwe kernsplijting (en daarmee een kettingreactie) te kunnen veroorzaken.
- In een kerncentrale is sprake van een gecontroleerde kettingreactie; in een kernbom 'explodeert' het aantal reacties.



- ${}^{238}_{92}\text{U}$ splijt niet na het invangen van een neutron. Er ontstaat neptunium:



Zie: www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=299141

Kern(splijtings)reactor

In Nederland is een reactor in Borssele voor het opwekken van elektrische energie¹¹ en een reactor in Petten voor de fabricage van isotopen.



- **Splijtstof**¹² is het materiaal waarin kernsplijting plaatsvindt: ${}_{92}^{235}\text{U}$ en ${}_{94}^{239}\text{Pu}$.

In natuurlijk uranium zit slechts 0,7% ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Het **verrijken** van uranium is het vergroten van het percentage ${}_{92}^{235}\text{U}$.

Verrijken is nodig, omdat uitsluitend de isotoop ${}_{92}^{235}\text{U}$ kan splitsen en gebeurt met toestellen die gebruik maken van het verschil in massa tussen ${}_{92}^{238}\text{U}$ en ${}_{92}^{235}\text{U}$ (b.v. ultracentrifuge).

- Laag verrijkt uranium bevat (minstens) 3% ${}_{92}^{235}\text{U}$.
- Hoog verrijkt uranium (waarin het percentage ${}_{92}^{235}\text{U}$ aanzienlijk verder is verhoogd) kan in kernwapens worden toegepast. De internationale gemeenschap is bezorgd over het nucleaire programma in Iran; zie:
<http://nos.nl/artikel/311710-iaea-iran-werkte-aan-kernwapen.html>

Ook ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ wordt als splijtstof gebruikt; zowel voor het opwekken van energie als in kernwapens.

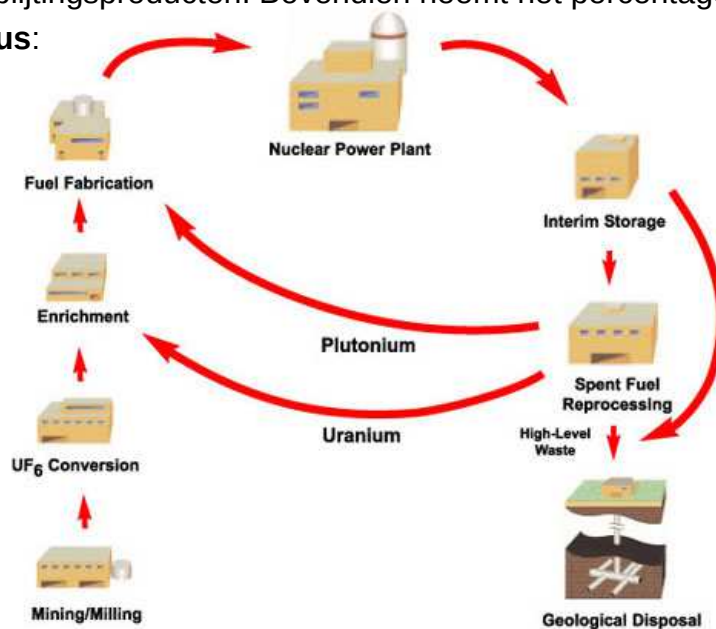
*Het eerste kernwapen dat in oorlogstijd werd ingezet was de uraniumbom Little Boy, die tijdens de Tweede Wereldoorlog door de Verenigde Staten op 6 augustus 1945 boven de Japanse stad Hiroshima tot ontploffing werd gebracht. Het vliegtuig waarmee de bom naar Hiroshima werd gevlogen heette Enola Gay.
Op 9 augustus 1945 werd Nagasaki aangevallen met een plutoniumbom: Fat Man.*

¹¹ Er zijn plannen voor een tweede centrale:
<http://www.rijksoverheid.nl/nieuws/2011/02/11/bouw-nieuwe-kerncentrale-in-2015.html>

¹² Soms wordt (ten onrechte) gesproken van 'brandstof'; er is geen sprake van verbranding.

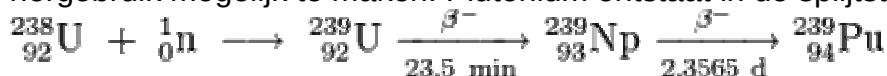
De splijtstofstaven raken na verloop van tijd verontreinigd met uiterst radioactieve splijttingsproducten. Bovendien neemt het percentage $^{235}_{92}\text{U}$ af.

Splijtstofcyclus:

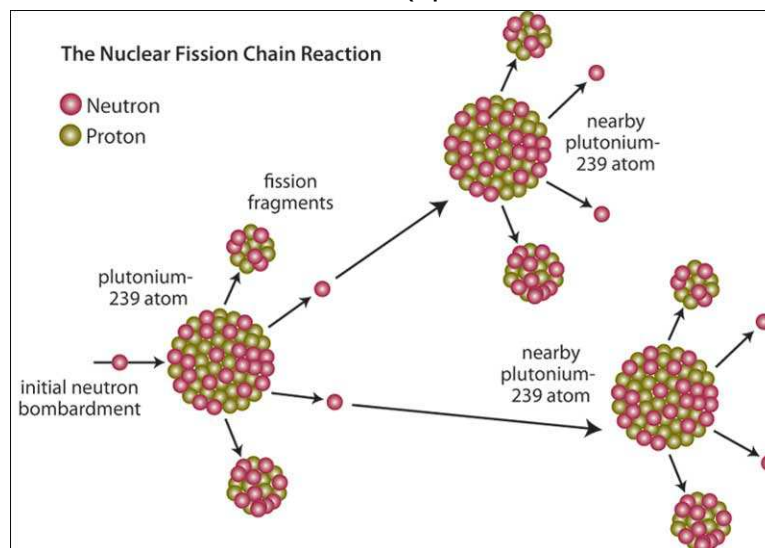


▪ **opwerken:**

Het (terug)winnen van uranium en plutonium uit gebruikt splijtstof om hergebruik mogelijk te maken. Plutonium ontstaat in de splijtstofstaven:



$^{239}_{94}\text{Pu}$ kan net als $^{235}_{92}\text{U}$ (op veel verschillende manieren) splijten:

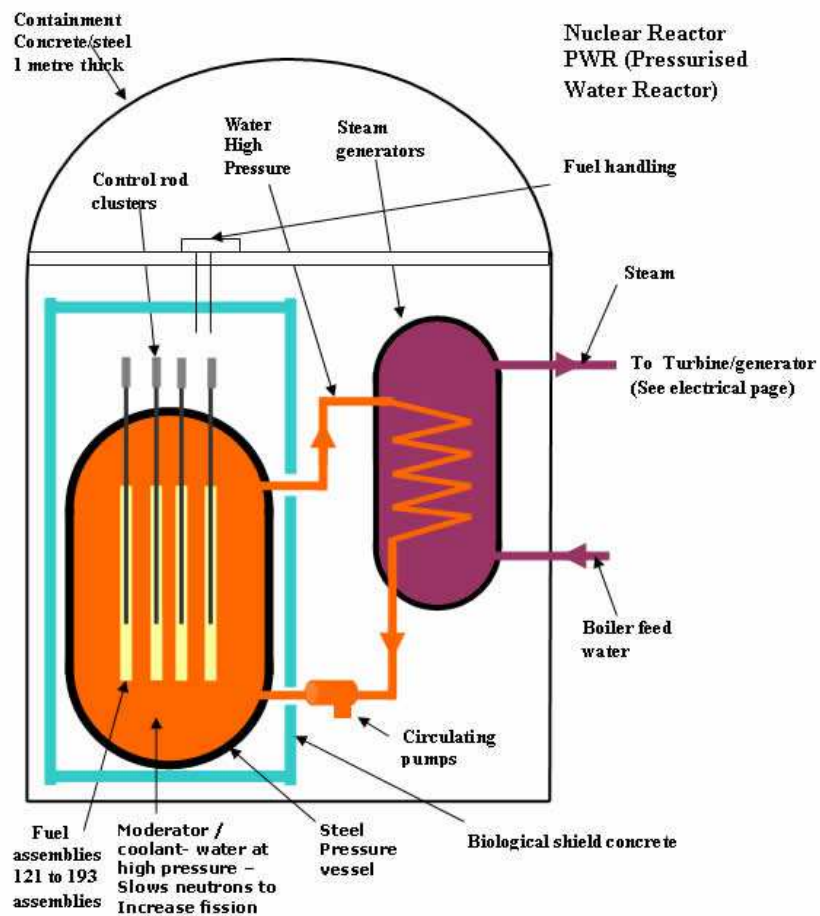


▪ **opslag radioactief afval:**

Deze regering ziet voldoende mogelijkheden om het radioactieve afval op een verantwoorde wijze op te slaan:

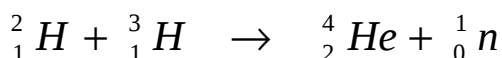
<http://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/kernenergie/radioactief-afval>

- ❑ **Moderator** is de 'neutronenremmer' die de snelle neutronen, die bij splijting van de tussenkern ontstaan, geschikt maakt om een nieuwe kern te splijten. Door de vele botsingen tegen de moderator (die bestaat uit lichte atomen; b.v. koolstof) verliezen de neutronen hun snelheid.
- ❑ **Regelstaven** bestaan uit materialen (zoals cadmium) die neutronen absorberen. Het aantal splijtingen en daarmee het vermogen van de centrale kan worden geregeld door de regelstaven meer of minder tussen het splijtstofmateriaal in te schuiven. Vermenigvuldigingsfactor k :
 - $k = 1$ De reactor werkt op constant vermogen.
 - $k > 1$ Het reactorvermogen stijgt, bijvoorbeeld als de reactor opstart. Het aantal splijtingen per seconde stijgt doordat de regelstaven minder ver tussen het splijtstofmateriaal worden geschoven.
 - $k < 1$ Het vermogen daalt, bijvoorbeeld als de reactor wordt stilgelegd. Het aantal splijtingen per seconde daalt doordat de regelstaven verder tussen het splijtstofmateriaal worden geschoven.
- ❑ **Koelmiddel** bevindt zich tussen de splijtstofstaven en geeft de warmte af via een 'warmtewisselaar' af aan een tweede circuit. Daar volgt de keten: stoom → turbine → dynamo.
- ❑ **Omhuysel** van beton en staal dient als beveiliging tegen de hoge druk en tegen de vrijkomende ioniserende straling.



9C Kernreacties; kernfusie

Kernfusie is het samengaan van twee lichte kernen. Een belangrijk voorbeeld is het samengaan van een deuteriumkern en een tritiumkern¹³:



Bij deze fusiereactie is sprake van een relatief grote massa-afname; er komt veel energie vrij.

Massabalans van deze reactie (in u):

$$\text{massa voor} = \text{massa } {}^2_1\text{H atoom} + \text{massa } {}^3_1\text{H atoom} - \text{massa 2 elektronen}$$

$$\text{massa na} = \text{massa } {}^4_2\text{He atoom} + \text{massa neutron} - 2 \text{ elektronen}$$

$$\begin{aligned}\Delta m &= \text{massa } {}^4_2\text{He atoom} + \text{massa } {}^1_0\text{n} - \text{massa atoom } {}^2_1\text{H} - \text{massa } {}^3_1\text{H atoom} \\ &= 2,014102 \cdot u + 3,016050 \cdot u - 4,002603 \cdot u - 1,008665 \cdot u \\ &= -0,01890 \cdot u.\end{aligned}$$

Bij deze reactie neemt de massa af.

Er komt $0,01890 \cdot 931,49 = 17,59$ MeV energie vrij.

- Om twee lichte kernen te fuseren, moet eerst veel energie worden toegevoerd (beschikbaar zijn) om de elektrische afstoting tussen de positief geladen kernen te overwinnen. De kernen moeten daartoe een zeer grote snelheid hebben. Er moet dus een zeer hoge temperatuur zijn. De te fuseren deeltjes bevinden zich in de zogenaamde **plasma** fase¹⁴.
- Om de kans op fuseren te vergroten, moet de dichtheid van de kernen groot zijn. Er moet dus sprake zijn van een zeer hoge druk.
- Om een reeks van fusiereacties mogelijk te maken, moeten beide omstandigheden bovendien gedurende enige tijd aanwezig blijven.

Aan deze voorwaarden is voldaan in het inwendige van sterren zoals onze zon.

Sinds 1952 zijn er waterstofbommen (H-bom), die hun explosieve energie (vooral) halen uit de fusie van waterstof. Kernsplijting wordt daarbij gebruikt om een voldoende hoge temperatuur en druk te krijgen om het fusieproces op gang te brengen.



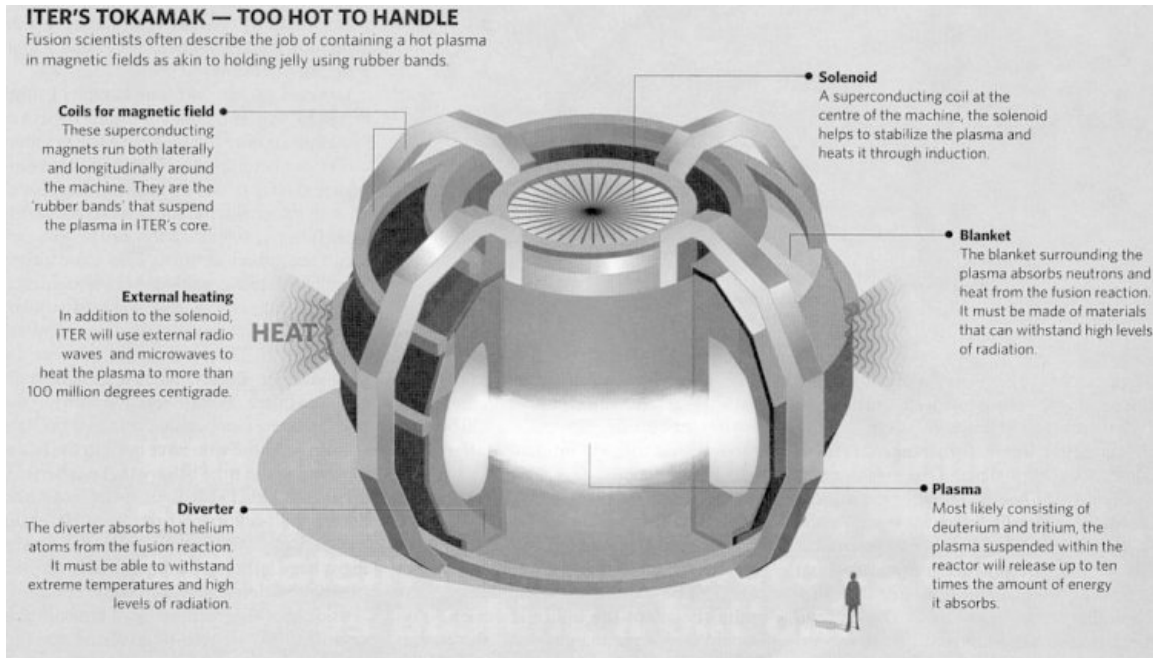
¹³ Tritium kan ontstaan door:

- reactie van lithium en neutron ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H}$ (kernreactor)
- reactie van stikstof en neutron ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^3_1\text{H}$ (kosmische straling)

¹⁴ In de natuurkunde wordt onder plasma een fase verstaan waarin de deeltjes van een gasvormige stof in meer of mindere mate geïoniseerd zijn. Vaak wordt plasma de vierde aggregatietoestand genoemd; naast vast, vloeibaar en gas.

ITER is een internationaal onderzoeksproject om elektrische energie op te wekken in een kernfusiecentrale.

Het is onduidelijk of / wanneer kernfusie voor de productie van elektriciteit mogelijk zal zijn. Een belangrijk technologisch probleem is de 'opsluiting' van het plasma (bij een zeer hoge temperatuur en druk) in een magneetveld.

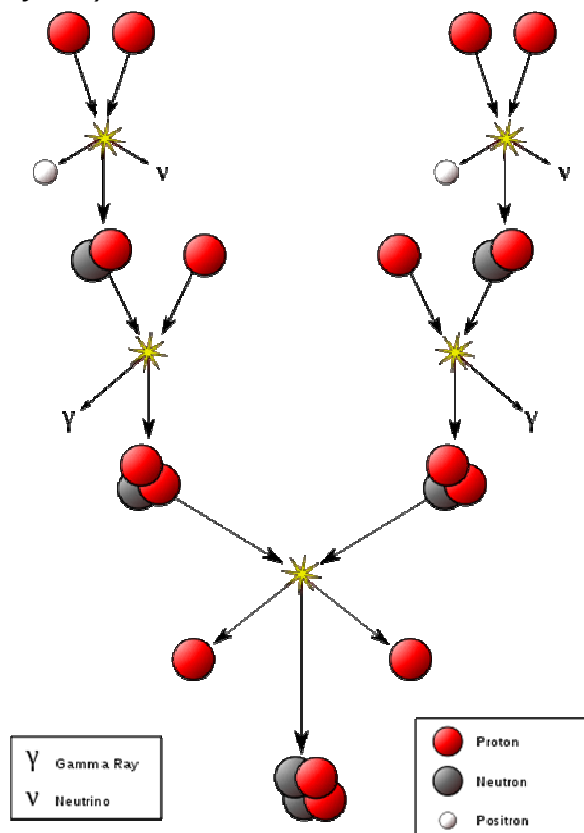


<http://www.fusie-energie.nl/index.htm>

<http://noorderlicht.vpro.nl/artikelen/27515336/>

Fusie in de zon

De zon bestaat voor bijna 75 %¹⁵ uit waterstof en voor bijna 25 % uit helium. In het inwendige van sterren is fusie mogelijk. De fusie van waterstof tot helium (proton-proton-cyclus) is in sterren zoals onze zon het belangrijkste:



Per saldo fuseren $4 \text{ }^1_1\text{p}$ tot één ^4_2He kern. Daarbij ontstaan ook twee ^0_1e .

$$\begin{aligned}\Delta m &= \text{massa } ^4_2\text{He atoom} - 2 \cdot \text{massa } ^0_{-1}\text{e} + 2 \cdot \text{massa } ^0_1\text{e} - 4 \cdot \text{massa } ^1_1\text{p} \\ &= 4,002603 \cdot u - 4 \cdot 1,007276 \cdot u \\ &= -0,02650 \cdot u.\end{aligned}$$

Bij deze proton-proton-cyclus neemt de massa af.

Er komt $0,02650 \cdot 931,49 = 24,69 \text{ MeV}$ energie vrij.

- De neutrino's hebben met de materie in de zon 'geen' wisselwerking en vliegen de zon uit het heelal in.
- De hoge temperatuur in het inwendige van de zon is het gevolg van:
 - De energie van de γ straling
 - De kinetische energie van de deeltjes die ontstaan: ^4_2He , ^1_1p en ^0_1e
 - De energie die ontstaat bij de annihilatie van ^0_1e .

¹⁵ massa-percentages