

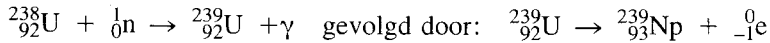
§27 KERNSPLIJTING; KERNREACTOR

27.1 Inleiding

Voor het veroorzaken van kernreacties zijn neutronen ideale projectielen. Immers neutronen zijn elektrisch neutraal zodat ze geen coulombafstoting van atoomkernen ondervinden.

Bij vrijwel alle soorten kernen kan een (n,γ) -reactie optreden. Bij zo'n reactie wordt door een kern een neutron ingevangen en een γ -foton uitgezonden. De kern die dan ontstaat, is meestal β -radioactief.

Zo treden de volgende kernreacties op als uranium-238 wordt beschoten met neutronen:



Ook neptunium-239 is radioactief en gaat onder uitzending van β -straling over in plutonium-239.

Deze kernreacties zijn daarom zo interessant omdat de elementen neptunium en plutonium niet in de natuur voorkomen. Alle elementen die in het periodiek systeem *na* uranium komen (en daarom *transuranische elementen* of *transuranen* worden genoemd), zijn uitsluitend kunstmatig te verkrijgen. Dit verklaart de belangstelling die men omstreeks 1935 kreeg voor kernreacties met uranium: uitgaande van uranium wilde men nieuwe elementen maken.

Bij de zojuist besproken kernreacties gaat het in feite om betrekkelijk *kleine* veranderingen van de uraniumkern: door zo'n grote kern wordt slechts een 'splintertje' ingevangen resp. een nog veel kleiner 'splintertje' uitgestoten. Dit is beslist niet meer het geval bij het verschijnsel dat in 1938 werd ontdekt: *kernsplijting*.

27.2 Kernsplijting

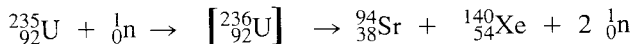
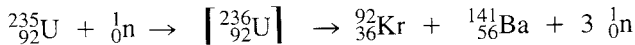
Natuurlijk uranium bestaat voor 99,3% uit uranium-238 en voor 0,7% uit uranium-235.

Tijdens experimenten waarbij natuurlijk uranium werd beschoten met neutronen (met het doel transuranen te maken) werd het volgende ontdekt:

Onder de produkten die het resultaat van de beschieting waren, werden geringe hoeveelheden rubidium, strontium, cesium, barium, enz. aangetroffen. Dit zijn elementen waarvan de atoomnummers variëren van 37 t/m 56, terwijl uranium het atoomnummer 92 heeft. Hieruit moest men wel concluderen dat een uraniumkern, bij het invangen van een neutron, kan *splijten*.

Nader onderzoek leerde het volgende:

- Splijting is voornamelijk toe te schrijven aan kernen van uranium-235 als deze een *langzaam* neutron invangen.
- Door het invangen van een langzaam neutron gaat een ${}^{235}_{92}\text{U}$ -kern over in de tussenkern ${}^{236}_{92}\text{U}$, waarna de kern kan splijten. (Is dit niet het geval, dan wordt energie in de vorm van een γ -foton uitgezonden.)
- Bij splijting ontstaan twee middelzware kernen en bovendien enkele neutronen. Overigens verloopt de splijting enigszins willekeurig, want de gevormde middelzware kernen zijn lang niet altijd van dezelfde soort. Gebleken is dat er minstens 30 verschillende mogelijkheden zijn waarop de splijting zich kan voltrekken! Twee van deze splijtingsmogelijkheden zijn:



De gevormde kernen bevatten te veel neutronen om stabiel te zijn, ze zijn dan ook radioactief. Het aantal vrijkomende neutronen is gemiddeld 2,4.

Een kernsplijtingsproces kan energetisch gezien rendabel zijn. Dit blijkt uit het volgende.

Ten eerste:

Bij splijting van een zware kern in twee (of meer) middelzware kernen treedt massavermindering op. Berekeningen laten zien dat ongeveer 0,1% van de massa van uranium-235 in energie wordt omgezet als kernen hiervan worden gespleten. Zou dus 1 kg zuiver uranium-235 geheel worden gespleten, dan wordt een massa van 1 gram omgezet in energie. Aan energie komt dan vrij:

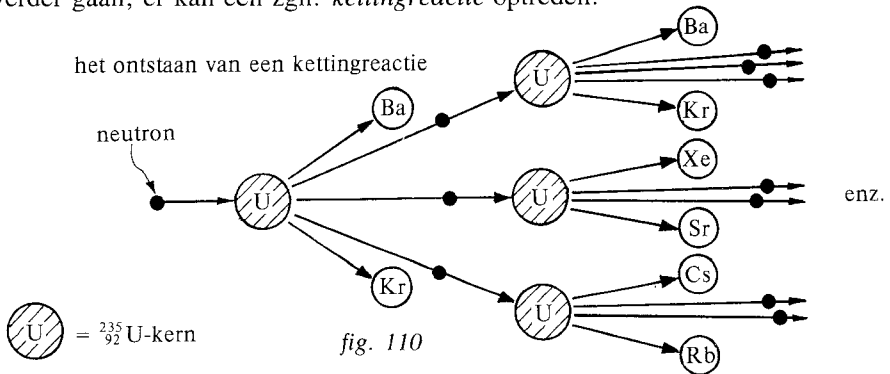
$(1 \cdot 10^{-3}) \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ J} = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$. Dit is evenveel energie als ontstaat bij verbranding van driemiljoen kg steenkool!

Conclusie: bij splijting van ${}^{235}_{92}\text{U}$ -kernen komt een zeer grote hoeveelheid energie vrij (per splijting ca. 200 MeV).

Ten tweede:

Bij elke splijting komen meer neutronen vrij (2 à 3) dan voor een splijting nodig zijn (1). De vrijkomende neutronen kunnen op hun beurt andere kernen splijten (figuur 110).

Conclusie: is het splijtingsproces eenmaal op gang gebracht, dan kan het vanzelf verder gaan, er kan een zgn. *kettingreactie* optreden.



Stel dat bij elke splijting 2 neutronen vrijkomen en dat elk vrijgekomen neutron een nieuwe splijting veroorzaakt. Dan vinden er achtereenvolgens 1, 2, 4, 8, 16, enz. splijtingen plaats. De kettingreactie krijgt dan een 'lawine-achtig' verloop, waardoor in zeer korte tijd een enorme hoeveelheid energie vrijkomt. Eén enkel neutron als projectiel zou dit dan kunnen veroorzaken!

Samenvatting:

- Een kernsplijtingsproces kan energetisch gezien rendabel zijn omdat*
- bij splijting van een zware kern in twee (of meer) middelzware kernen een grote hoeveelheid energie vrijkomt;*
 - bij elke splijting meer neutronen vrijkomen dan voor een splijting nodig zijn, waardoor een kettingreactie kan optreden.*

27.1 Een ^{235}U -kern vangt een neutron in, waarna splijting optreedt. Behalve neutronen ontstaan bij de splijting twee middelzware atoomkernen met massanummers 94 resp. 140. Eén van deze kernen is een cesiumkern.

a. Stel de vergelijking van deze kernreactie op. (Gebruik het tabellenboekje!)

Beide gevormde middelzware kernen zijn radioactief en gaan elk door het na elkaar uitzenden van drie elektronen over in stabiele kernen.

b. Ga na welke stabiele kernen dit zijn.

In tegenstelling tot andere (tot nu toe besproken) kernreacties, biedt de kernsplijtingsreactie van uranium-235 de mogelijkheid tot een energetisch rendabel proces te komen, zodat kernsplijting van uranium-235 kan worden toegepast voor de energievoorziening.

c. Op welke gronden berust dit?

27.3 Vermenigvuldigingsfactor

Bij splijting van ${}^{235}_{92}\text{U}$ -kernen komen gemiddeld 2,4 neutronen vrij, terwijl voor splijting van zo'n kern maar 1 neutron nodig is. Toch mogen we hieruit niet concluderen dat er dan een kettingreactie *moet* optreden. Er zijn namelijk bij splijting vrijkomende neutronen die zelf géén nieuwe splijting veroorzaken. Neutronen kunnen op twee manieren 'verloren gaan voor splijting':

1. Een neutron kan worden ingevangen door een ${}^{238}_{92}\text{U}$ -kern in plaats van door een ${}^{235}_{92}\text{U}$ -kern. (Bedenk dat natuurlijk uranium voor de 99,3% uit uranium-238 bestaat!) Hierbij is de kans op splijting van een ${}^{238}_{92}\text{U}$ -kern klein. Wel treden andere kernreacties op, onder meer de reacties waarvan in §27.1 de vergelijkingen zijn gegeven.
2. Een neutron kan uit het betreffende stuk uranium ontsnappen (zodat het dan niet is ingevangen door een kern). Dit hangt samen met het feit dat de doorsnede van een atoomkern véél kleiner is dan de doorsnede van het atoom zelf (de verhouding van deze doorsneden is ongeveer $1:10^9$!).

In *kleinere* stukken uranium is de kans *kleiner* dat een neutron een kern op zijn weg ontmoet. Het neutron heeft dan een *grotere* kans op ontsnapping.

Stel dat op zeker moment in een stuk uranium N vrije neutronen aanwezig zijn. Deze zullen even later alle verdwenen zijn: voor een deel door uit het stuk uranium te ontsnappen, voor een deel door ingevangen te worden door ${}^{238}_{92}\text{U}$ -kernen én voor een deel door ingevangen te worden door ${}^{235}_{92}\text{U}$ -kernen. Laatstgenoemde kernen kunnen dan splijten, stel dat daarbij $N^* = N \cdot k$ neutronen vrijkomen. De factor k in deze uitdrukking is de zgn. *vermenigvuldigingsfactor*. Er geldt nu het volgende:

Als $k < 1$ sterft de kettingreactie voortijdig uit, daarentegen blijft de kettingreactie in stand als $k \geq 1$. Hierbij blijft het aantal splijtingen per tijdseenheid constant als $k = 1$, terwijl de kettingreactie 'lawine-achtig' gaat verlopen als $k > 1$.

Een kettingreactie waarbij k duidelijk groter is dan 1 (met $k_{\text{gem}} \approx 2,4$) treedt op bij het tot explosie brengen van een *atoombom*. Onder meer is dit mogelijk omdat voor zo'n bom vrijwel zuiver uranium-235 wordt gebruikt.

Voor de kettingreactie die in een *kernreactor* optreedt, geldt dat k meestal gelijk is aan 1, soms korte tijd iets groter is dan 1 (b.v. 1,05), soms korte tijd iets kleiner is dan 1 (b.v. 0,95). In §27.4 wordt besproken hoe men dit regelt.

27.2 In een kernreactor is de grootte van de vermenigvuldigingsfactor k te regelen met staven van een bepaalde stof.

a. Welke eigenschap moeten de atomen van die stof dan beslist hebben?

Men heeft kunnen nagaan dat het ontstaan van een nieuwe 'generatie' neutronen $1,0 \cdot 10^{-7}$ s duurt. Neem aan dat de regelstaven een zodanige stand hebben dat $k = 1,05$.

b. Hoe groot is dan het aantal neutronen, ontstaan door het invangen van slechts één neutron, na $2,0 \cdot 10^{-4}$ s?

27.4 Kernreactor

De energie die vrijkomt bij kernsplijting wordt nuttig toegepast in een *kernenergiecentrale*. De kernreactor is hiervan een onderdeel.

Van de meeste kernreactoren is de werking gebaseerd op splijting van uranium-235. Als splijfstof wordt dan vaak 'verrijkt uranium' gebruikt: dit bevat een iets hoger percentage uranium-235 dan natuurlijk uranium (ca. 3% tegenover 0,7%).

De splijfstof bevindt zich in de vorm van *dunne* staven (U) in de reactor (figuur 111). Hierbij zijn de uraniumstaven geplaatst in kanalen die op een bepaalde afstand van elkaar in een groot blok grafiet (M) zijn gemaakt. Het grafiet doet dienst als *moderator*.

Toelichting:

Bij splijting van $^{235}_{92}\text{U}$ -kernen komen *snelle* neutronen vrij. Deze neutronen kunnen niet of nauwelijks splijting van andere $^{235}_{92}\text{U}$ -kernen veroorzaken, want hiervoor zijn langzame neutronen nodig. Daarentegen kunnen deze snelle neutronen (vooral bij bepaalde snelheden) worden ingevangen door $^{238}_{92}\text{U}$ -kernen. Welnu, omdat de uraniumstaven *dun* zijn, hebben de vrijkomende snelle neutronen een grote kans uit hun uraniumstaaf te ontsnappen en in de moderator te komen.

De moderator is een stof waarvan de atomen, en dus de atoomkernen, een relatief *kleine* massa hebben. Door talrijke botsingen met deze kernen verliezen de neutronen dan een zeer groot deel van hun kinetische energie. Hierbij is het van belang dat er vrijwel geen neutronen worden ingevangen door kernen van de moderator, anders gaan er te veel neutronen voor splijting verloren.

Het afremmen van snelle neutronen door kernen van de moderator heeft een dubbel doel: $^{235}_{92}\text{U}$ -kernen worden alleen door langzame neutronen gespleten en bovendien vangen $^{238}_{92}\text{U}$ -kernen nauwelijks langzame neutronen in. Welnu, de kanalen in het blok grafiet bevinden zich op zodanige afstand van elkaar dat de neutronen voldoende worden vertraagd. Zodra deze vertraagde neutronen in een volgende uraniumstaaf komen, zullen ze vrijwel uitsluitend door $^{235}_{92}\text{U}$ -kernen worden ingevangen, waardoor nieuwe splijtingen kunnen optreden, enz.

Het is nu mogelijk een kettingreactie in stand te houden. Hierbij wordt het aantal splijtingen dat per tijdseenheid optreedt, en dus de hoeveelheid energie die per tijdseenheid vrijkomt, geregeld met cadmiumstaven. Cadmium heeft de eigenschap dat het neutronen zeer sterk absorbeert. De betreffende staven, die *regelstaven* (R) worden genoemd, kunnen meer of minder diep in kanalen van de moderator worden geschoven.

Toelichting:

Bij een bepaalde stand van de regelstaven blijft het aantal splijtingen per tijdseenheid constant ($k = 1$), de reactor werkt dan op constant niveau. Bij een iets omhoog trekken van de regelstaven neemt het aantal splijtingen dat per tijdseenheid optreedt, *versneld* toe ($k > 1$, b.v. $k = 1,05$). Worden de regelstaven even later in de oorspronkelijke stand teruggeplaatst, dan blijft het aantal splijtingen per tijdseenheid weer constant ($k = 1$); per tijdseenheid treden er nu echter méér splijtingen op. Hierdoor werkt de reactor niet alleen opnieuw op constant niveau, maar tevens op hōger niveau.

U = staven
splijtstof
(uranium)

M = moderator
(blok grafiet)

R = regelstaven
(cadmium)

K = koelmiddel
(gasvormig CO_2)

W = warmte-
uitwisselaar

S = stalen
reactievat

B = betonwand

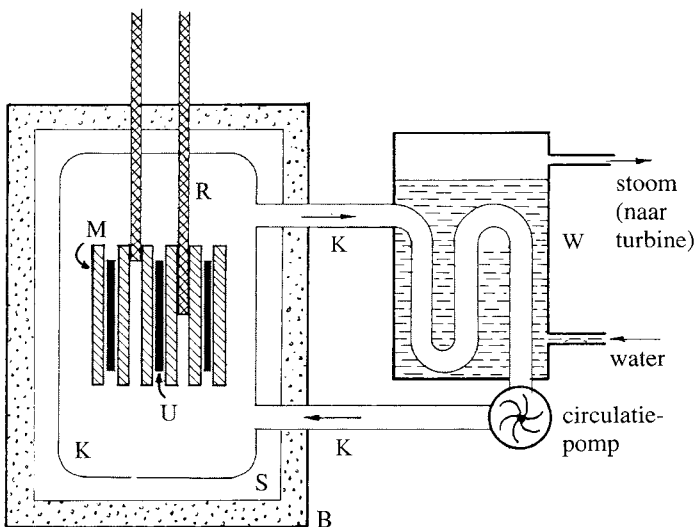


fig. 111

De kernenergie komt vrij in de vorm van kinetische energie van splijtingsprodukten (strontium, barium enz.) en neutronen. Door 'het afremmen' van de splijtingsprodukten in de uraniumstaven ontstaat warmte.

De warmte wordt afgevoerd door in de kanalen van de moderator een koelmiddel (K) te leiden. Hiervoor kan (gasvormig) kooldioxide worden gebruikt.

Het in de reactor sterk verhitte koelmiddel wordt door een circulatiepomp naar een warmte-uitwisselaar (W) geleid. Hier staat het koelmiddel warmte af aan water, dat daardoor wordt omgezet in stoom.

De stoom wordt gebruikt om een turbine aan te drijven. Aan de turbine is een generator gekoppeld, zodat uiteindelijk *elektrische* energie wordt opgewekt.

De eigenlijke reactor heeft een stalen wand (S) die door warmte-isolerend materiaal is gescheiden van een betonwand (B). Deze wand is zeer dik, in verband met het radioactief zijn van de splijtingsproducten. Alle radioactieve straling die nog door de stalen wand heenkomt (γ -straling!) wordt volledig door de betonwand geabsorbeerd.

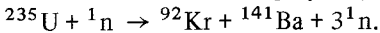
Samenvatting:

1. *In een kernenergiecentrale vindt omzetting plaats van kernenergie in elektrische energie.*
2. *De kernenergie komt vrij bij splijting van ${}_{92}^{235}\text{U}$ -kernen; hiervoor zijn langzame neutronen nodig.*
3. *Omdat bij splijting snelle neutronen vrijkomen, moeten deze worden vertraagd. Dit gebeurt door botsingen met atoomkernen van de moderator; hierbij worden vrijwel geen neutronen geabsorbeerd.*
4. *Daarentegen bestaan de regelstaven uit een stof die neutronen zeer sterk absorbeert. Met deze staven regelt men het aantal splijtingen dat per tijdseenheid optreedt, dus de hoeveelheid energie die per tijdseenheid vrijkomt.*

- 27.3 Een kerncentrale geeft 575 MW aan elektrisch vermogen af. Het rendement van de centrale is 25%, d.w.z. dat van de kernenergie 25% wordt omgezet in elektrische energie.
- a. Waar blijft de resterende 75% van de kernenergie?
 - b. Bereken het aantal splijtingen dat per seconde plaatsheeft, als per splijting gemiddeld 175 MeV aan energie vrijkomt.
 - c. Bereken het aantal kg materie dat de centrale per uur 'verbruikt' bij onveranderd afgegeven vermogen.

27.4 In een kernreactor komt energie vrij bij het splijten van zware kernen. Een doorsnede van een kernreactor die met uranium (U) als splijtingsmateriaal werkt, is weergegeven in figuur 92.

Er volgt een splijting als een ^{235}U -kern getroffen wordt door een zogenaamd langzaam neutron. Dit is een neutron met een kinetische energie van ongeveer $1 \cdot 10^{-20}\text{J}$. Eén van de mogelijke splijtingen verloopt als volgt:



Bij deze splijting komt een energie vrij van $3 \cdot 10^{-11}\text{J}$, voornamelijk in de vorm van kinetische energie van de twee zware brokstukken ^{92}Kr en ^{141}Ba .

In een kernreactor komt tengevolge van deze splijtingen een energie van $9 \cdot 10^{12}\text{J}$ per uur vrij. Neem aan dat alleen bovengenoemde splijtingsreactie plaatsvindt.

- Bereken het aantal splijtingen dat per uur plaatsvindt.
- Bereken hoeveel massa per uur wordt omgezet in energie.

De kernenergiecentrale waarvan deze kernreactor de energiebron is, kan $4 \cdot 10^8\text{W}$ aan elektrisch vermogen afgeven.

- Bereken het nuttig effect (rendement) van deze kernenergiecentrale.

Bij bovengenoemde splijting ontstaan de kernen ^{92}Kr en ^{141}Ba en komen drie neutronen vrij.

- Waarom vliegen de twee kernen ^{92}Kr en ^{141}Ba in vrijwel tegengestelde richting uiteen? Neem aan dat de ^{235}U -kern vóór de splijting stilstond.

De drie vrijkomende neutronen hebben elk een energie van ongeveer $1 \cdot 10^{-12}\text{J}$. Als zo'n vrijkomend neutron kan worden afgeremd tot een energie van ongeveer $1 \cdot 10^{-20}\text{J}$, is er weer een grote kans dat een ^{235}U -kern wordt gespleten.

Het afremmen kan gebeuren door botsingen te laten plaatsvinden tegen kernen van een remstof (in vaktaal: een moderator).

- Waarom kan men als moderator beter een stof met lichte kernen gebruiken dan een stof met zware kernen?

Als alle drie vrijgekomen neutronen na afremming een nieuwe splijting veroorzaken, zegt men: 'de vermenigvuldigingsfactor $k = 3$ '.

- Wat is het gevolg voor de energieproductie als $k = 3$?

- Wat is het gevolg voor het aantal splijtingen per seconde als door verlies van neutronen k kleiner dan 1 wordt?

Het aantal neutronen dat aan het splijtingsproces blijft deelnemen kan men onder meer regelen door gebruik te maken van cadmium-staven. Bij botsing tegen een cadmium-kern wordt een neutron in deze kern opgenomen. Door meer cadmium tussen het uranium te schuiven (zie figuur 92) kan men een groter deel van de vrijgekomen neutronen absorberen.

Een reactor werkt op een bepaald constant vermogen.

- Welke handelingen moet men met de cadmium-staven uitvoeren om deze reactor op een lager, constant vermogen in te stellen? Licht het antwoord toe.

(Uit examen havo 1978)

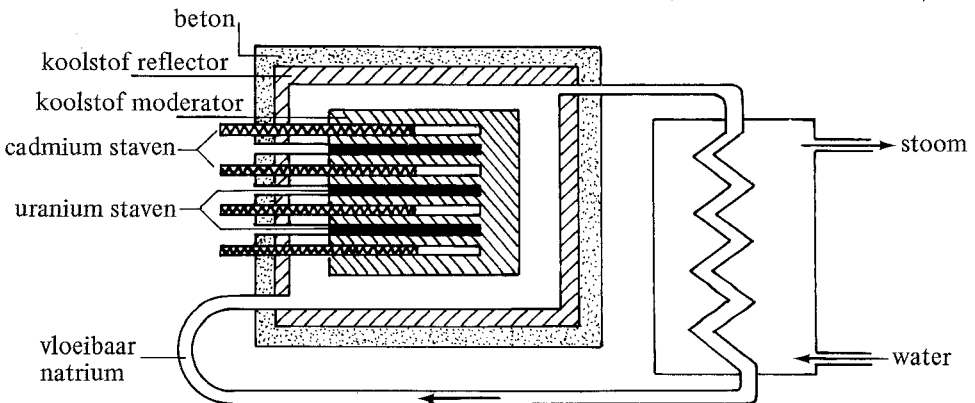
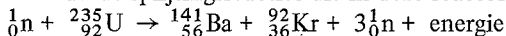


fig. 92

- * 27.5 In een bepaalde thermische kernreactor (zie figuur 92) vindt splijting van de isotoop ^{235}U plaats.

Eén van de splijtingsreacties die in deze reactor kunnen verlopen is de volgende:



De atoommassa's van de bij de reactie betrokken deeltjes zijn:

$$\text{massa } {}_{92}^{235}\text{U} = 235,04392 \text{ u}, \quad \text{massa } {}_{36}^{92}\text{Kr} = 91,92616 \text{ u},$$

$$\text{massa } {}_{56}^{141}\text{Ba} = 140,91405 \text{ u}, \quad \text{massa } {}_0^1\text{n} = 1,00867 \text{ u}.$$

- Bereken de energiewinst bij deze splijtingsreactie.
- Hoeveel van de bij een splijting vrijkomende neutronen veroorzaken gemiddeld een nieuwe splijting als de reactor een constant vermogen levert?
- Geef duidelijk aan hoe men er met behulp van de cadmiumstaven voor kan zorgen dat deze reactor een groter maar eveneens constant vermogen gaat leveren.

De kinetische energie van de neutronen die bij een splijting van ^{235}U in de reactor van figuur 92 vrijkomen ligt tussen 0,05 MeV en 17 MeV. De splijtingen in deze reactor worden echter in hoofdzaak veroorzaakt door thermische neutronen. Deze thermische neutronen hebben een kinetische energie in de orde van grootte van 0,05 eV. De koolstofmoderator zorgt ervoor dat de neutronen vertraagd worden tot deze energie.

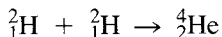
- Toon aan dat de afname van de kinetische energie van een neutron bij een volkomen elastische centrale botsing tegen een stilstaand koolstofatoom ongeveer 28% bedraagt.
- Bereken hoeveel van deze botsingen er zouden moeten plaatsvinden voordat een 0,5 MeV-neutron vertraagd is tot 0,05 eV.

(Uit examen vwo 1975 (ged.))

28.3 Kernfusie als energiebron

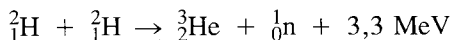
Ter herinnering: kernen van 'zware waterstof' (${}^2_1\text{H}$) worden deuteriumkernen of kortweg deuteronen genoemd.

Veronderstel eens dat twee deuteriumkernen fuseren, zó, dat een heliumkern ontstaat volgens:

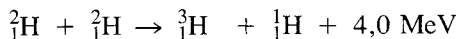


Er zou dan sprake zijn van een massavermindering van 0,0256 u. (Ga dit na; merk op dat er geen rekening hoeft te worden gehouden met de massa's van elektronen.) Inderdaad zou dus energie vrijkomen, zoals voor kernfusie is voorspeld in §28.2. De vrijkomende energie zou dan $(0,0256) \cdot (931) \text{ MeV} = 23,8 \text{ MeV}$ per gevormde heliumkern bedragen.

Deze fusiereactie is echter niet bekend. Toch kunnen twee deuteriumkernen fuseren, hierbij zijn er twee mogelijkheden met ongeveer even grote waarschijnlijkheid:



resp.



Het is dus *niet* noodzakelijk dat bij een fusiereactie slechts één enkele kern wordt gevormd! Meestal ontstaan er twee kernen, of een kern met een ander deeltje (in het bijzonder een neutron of een positron).

De ${}^3_1\text{H}$ -kern die bij de tweede reactie ontstaat, wordt een *tritiumkern* of kortweg een *triton* genoemd.

We denken ons nu een kern A die op een kern B wordt afgeschoten, waarbij B zich niet kan verplaatsen. Omdat A en B positief geladen zijn, ondervindt A een

*) Dit is als volgt in te zien. We stellen ons voor dat de nucleonen van een zware kern (b.v. van een uraniumkern) van elkaar worden gescheiden. Hiervoor is per nucleon een energie nodig van 7,6 MeV. Vervolgens denken we ons de twee middelzware kernen gevormd uit de ontstane losse nucleonen. Hierbij komt per nucleon een energie vrij van gemiddeld 8,5 MeV. Het resultaat is een overschot aan energie: bij kernsplijting komt energie vrij!

afstotende coulombkracht van B. Bij nadering van B neemt deze kracht sterk toe ($F_c \sim 1/r^2$).

Voor fusie is het echter noodzakelijk dat B zó dicht door A wordt genaderd dat beide kernen elkaar vrijwel raken. Alleen dan gaan een of meer nucleonen van A kernkrachten ondervinden van een of meer nucleonen van B, zodat fusie kan optreden.

Welnu, wegens de coulombafstoting is fusie alleen mogelijk als A bij afschieten een zeer grote kinetische energie bezit. Zo blijkt de kinetische energie van A minstens 0,4 MeV te moeten bedragen als A en B deuteriumkernen zijn (dit komt ter sprake in opgave 28.3).

Toch is de benodigde kinetische energie aanzienlijk kleiner dan de energie die bij fusie van twee deuteriumkernen vrijkomt (zie bovenstaande twee vergelijkingen). Dit betekent echter *niet* dat elk proces waarbij deuteriumkernen fuseren, energetisch gezien rendabel is! Zou b.v. een deuteriumhoudend plaatje worden beschooten met energierijke deuteriumkernen, dan veroorzaakt slechts één op de vele duizenden projectielen een fusiereactie. De hoeveelheid energie die bij deze reactie vrijkomt, is dan veel kleiner dan de hoeveelheid energie die aan de vele duizenden projectielen is toegevoerd tijdens het versnellen van deze deeltjes!

Een fusieproces kan pas 'als energiebron dienen' als met de energie die bij één fusiereactie vrijkomt, andere kernen op hun beurt gaan fuseren. In dat geval blijft het fusieproces verder gaan, waarbij geen verdere energietoevoer van buiten meer nodig is (vergelijk een verbrandingsproces).

In theorie is zo'n 'fusiekettingreactie' mogelijk als zich in een afgesloten ruimte een hoeveelheid deuterium in gasvorm bevindt, waarbij de deeltjes een voldoende grote kinetische energie bezitten. Berekend kan worden (zie opgave 28.3), dat het gas dan een temperatuur van ruim een miljard kelvin moet hebben! Bij een dergelijke temperatuur zijn de atomen al hun elektronen kwijtgeraakt (door botsingen), zodat het gas bestaat uit een mengsel van afzonderlijke kernen en elektronen, een zgn. *plasma*. (Kernreacties die tot stand komen als gevolg van de temperatuurbeweging van de reagerende deeltjes, noemt men *thermonucleaire* reacties.)

In de praktijk schept deze uiterst hoge temperatuur echter grote problemen. Zo bestaat er geen enkel materiaal dat een dergelijke temperatuur kan doorstaan, zodat de deeltjes van het plasma niet in aanraking mogen komen met de wanden van het reactievat. Dit wordt bereikt door het aanleggen van een sterk magnetisch veld, waaruit de (elektrisch geladen!) deeltjes niet kunnen ontsnappen. Een tweede probleem is hoe men de temperatuur van het plasma voldoende kan verhogen om het fusieproces op gang te brengen. Een behandeling hiervan gaat echter te ver.

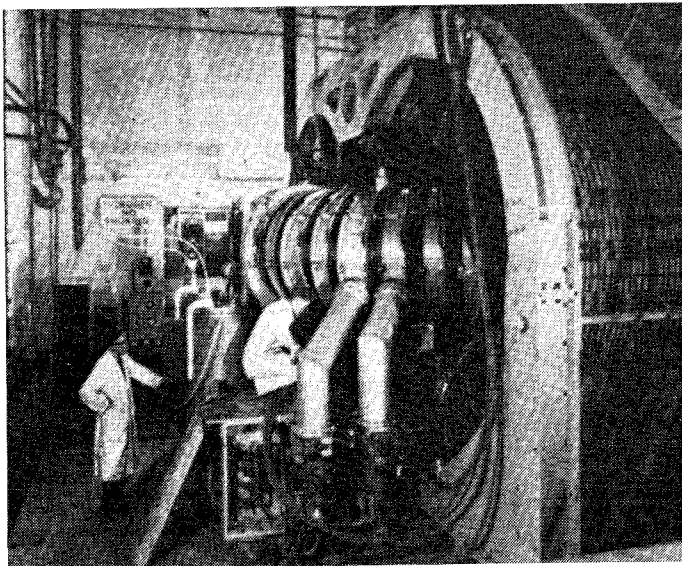


fig. 113 Engels apparaat om kernfusie tot stand te brengen. De horizontale, ringvormige buis is het reactievat.

Er zijn verschillende toestellen gebouwd (figuur 113) waarin èn het bijeenhouden van het plasma èn het voldoende verhitten van het plasma tot op zekere hoogte zijn gerealiseerd. Het probleem hoe men de vrijkomende energie aan het plasma kan onttrekken, is nog geheel niet opgelost. In tegenstelling met kernsplijtingsreactoren bestaan er dan ook nog geen kernfusiereactoren.

Zou een continu en regelbaar fusieproces kunnen worden gerealiseerd, dan vormt kernfusie een vrijwel onuitputtelijke energiebron. 1 m³ water bevat namelijk ca. 33 gram deuterium, waarbij het deuterium met betrekkelijk weinig kosten uit water is af te scheiden.

Dit is een eerste voordeel van kernfusie als energiebron boven kernsplijting: op aarde komt véél meer deuterium voor dan uranium. Een tweede voordeel is het feit dat bij kernfusie radioactieve afvalprodukten ontbreken.

Opmerkingen:

1. Het uitzenden van de reusachtige hoeveelheden stralingsenergie door de zon en sterren, wordt toegeschreven aan fusieprocessen. We komen hierop terug in het volgende hoofdstuk.
2. De werking van een *waterstofbom* berust niet alleen op een fusieproces. De zeer hoge temperatuur die nodig is voor het op gang brengen van het fusieproces wordt namelijk verkregen door een splijtingsproces.

28.4 Een opvallend verschil tussen kernfusie en kernsplijting

Het gebruik van kernsplijting als energiebron is gebaseerd op een continu en regelbaar splijtingsproces. Voor het op gang brengen van het proces zijn slechts 'enkele' neutronen met geringe kinetische energie nodig.

Het gebruik van kernfusie als bron van energie zal zijn gebaseerd op een continu en regelbaar fusieproces. Voor het op gang brengen van het proces is (onder meer) vereist dat de deeltjes van het plasma een zeer grote kinetische energie bezitten.



fig. 114a

fig. 114b

We zouden het winnen van energie uit kernfusie resp. uit kernsplijting kunnen vergelijken met het winnen van energie door verplaatsing van het water van een bergmeer. Bij kernfusie moet als het ware eerst veel energie worden toegevoerd om het water over de bergwand te brengen (figuur 114a), bij kernsplijting hoeft slechts weinig energie te worden toegevoerd om hetzelfde te bereiken (figuur 114b). In beide gevallen is het hoogteverschil h een maat voor de winst aan energie.

Conclusie:

In tegenstelling met kernsplijting moet bij kernfusie een enorme hoeveelheid energie worden toegevoerd, om een nòg grotere hoeveelheid energie vrij te maken.

§28 Bindingsenergie van kernen; kernfusie

- * 28.1
- Geef een definitie van de bindingsenergie van een kern.
 - Als de bindingsenergie van een kern A groter is dan die van een kern B, kan dan worden gezegd dat A stabiel is dan B? Licht het antwoord toe.
 - Idem als het de bindingsenergie per nucleon betreft.
 - Schets in een diagram het verloop van de bindingsenergie per nucleon als functie van het aantal nucleonen (van het massanummer)
 - Leg aan de hand van dit diagram uit dat bij fusie van lichte kernen (in het algemeen) energie vrijkomt.

- * 28.2 Bereken van een ${}^4\text{He}$ -kern in MeV
- de bindingsenergie;
 - de bindingsenergie per nucleon;
 - de energie die nodig is om de kern te splitsen in een ${}^3\text{He}$ -kern en een neutron;
 - de energie die nodig is om de kern te splitsen in een ${}^3\text{H}$ -kern en een proton.
- Het verschil tussen de onder *c* en *d* berekende energieën is te verklaren uitgaande van de krachtwerking tussen de nucleonen in een ${}^3\text{He}$ -kern en de krachtwerking tussen de nucleonen in een ${}^3\text{H}$ -kern.
- Licht dit toe.
 - Welke kern is stabiel, een ${}^3\text{He}$ -kern of een ${}^3\text{H}$ -kern? Waarom?

- * 28.3 We denken ons een deuteriumkern A die in rechte lijn op een tweede deuteriumkern B af beweegt. Gemakshalve wordt aangenomen dat B zich niet kan verplaatsen. Een fusiereactie is pas mogelijk als de afstand van de middelpunten van A en B ca. $4 \cdot 10^{-15}$ m is.
- Bereken de kinetische energie die A op grote afstand van B moet bezitten om een fusiereactie teweeg te brengen.

Vervolgens denken we ons een plasma bestaande uit een groot aantal deuteriumkernen (en elektronen). De gemiddelde kinetische energie van de deeltjes is een maat voor de temperatuur van het plasma; er geldt (zie §31.4 van deel B):

$$E_{k,\text{gemiddeld}} = \frac{3R}{2N_A} \cdot T = \frac{3}{2} k \cdot T$$

- Zoek in het tabellenboekje de waarden van R en N_A op en bereken k . (Overigens is in dezelfde tabel de waarde van k opgegeven!)
- Bereken de minimale temperatuur van het plasma waarbij fusiereacties tussen deuteriumkernen mogelijk zijn.

- * 28.4 Een deuteriumkern A heeft een kinetische energie van 2,0 MeV. Deze kern beweegt in rechte lijn op een stilstaande deuteriumkern B af. Er heeft een fusiereactie plaats. Hierbij ontstaat een proton dat zich met een kinetische energie van 4,5 MeV verplaatst in een richting die een hoek α maakt met de oorspronkelijke bewegingsrichting van kern A. Bovendien ontstaat een tritiumkern waarvan de bewegingsrichting een hoek β maakt met de oorspronkelijke bewegingsrichting van kern A.
- Stel de vergelijking van deze fusiereactie op.
 - Bereken de kinetische energie van de tritiumkern.
 - Als m de massa van een deeltje is, p de impuls is en E_K de kinetische energie, leid dan af dat $p = \sqrt{2m \cdot E_K}$
 - Bereken de verhouding van de impulsen van de kernen.
 - Stel de vergelijkingen op die samenhangen met de wet van behoud van impuls, toegepast op dit proces.
 - Bereken α en β .