



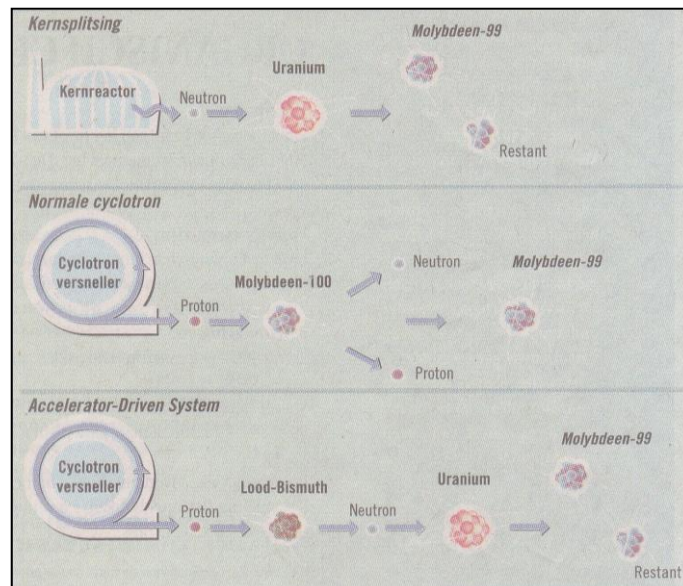
Achtergrondinformatie

Productie van medische isotopen

De kernreactor in Petten is de belangrijkste Europese leverancier van medische isotopen voor diagnose en therapie met kernstraling. De belangrijkste medische isotoop is de β -straler ^{99}Mo (molybdeen-99). Deze langlevende isotoop wordt gebruikt als radioactieve koe voor de productie van de kortlevende γ -straler $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (technetium-99m) voor gebruik als tracer bij medisch onderzoek – zie de pagina [Toepassingen van ioniserende straling](#). Het ^{99}Mo is echter ook op een andere manier te produceren: met een *cyclotron* – een kleine deeltjesversneller.

Reactorproces

Een kernreactor produceert neutronen: deeltjes zonder elektrische lading die vervolgens op de kernen van de omliggende uraniumatomen botsen. Daardoor vallen die uraniumkernen in brokstukken uit elkaar. Tussen die brokstukken zitten de radioactieve stoffen die bruikbaar zijn als medische isotopen, waaronder molybdeen en iridium (zie figuur 1 boven). Omdat het proces gebaseerd is op het toevoegen van extra neutronen aan bestaande stoffen, hebben de ontstane brokstukken ook relatief veel neutronen in hun kern. Sommige medische isotopen bestaan echter uit stoffen met juist relatief weinig neutronen in hun kern. Een kernreactor kan die niet maken, een cyclotron wél.



Figuur 1 – Alternatieven voor de aanmaak van ^{99}Mo : in een kernreactor (boven), in een cyclotron (midden) en in een combinatie van het cyclotron- en reactorproces (onder).

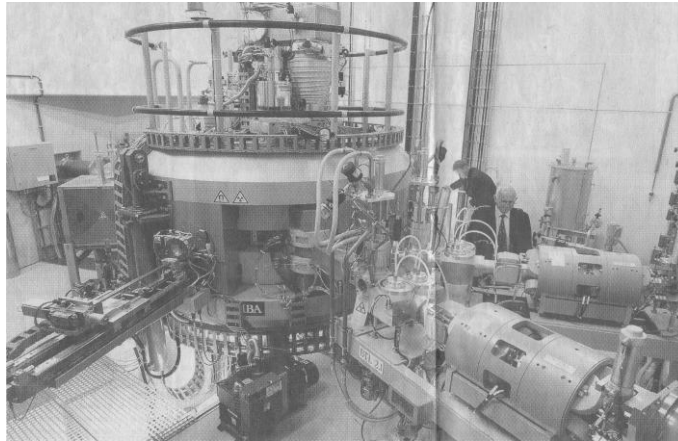
Cyclotronproces

Een cyclotron kan elektrisch geladen deeltjes, zoals protonen, versnellen totdat ze uiteindelijk met hoge energie op een doelwit botsen – zie het kader over het cyclotron hieronder. Dat doelwit valt vervolgens uit elkaar. Daarbij gaan neutronen verloren, zodat de producten neutron-arm zijn, zoals de bedoeling is.

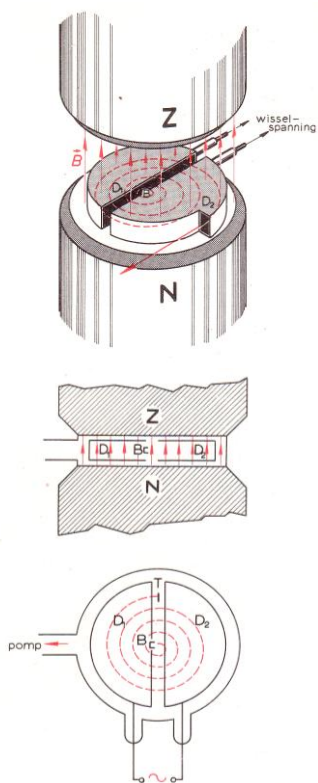
Sommige stoffen kunnen dus alleen in reactoren worden gemaakt, en andere alleen in cyclotrons. Maar er zijn uitzonderingen: de elementen die niet neutron-arm en niet neutronrijk zijn, maar precies er tussenin – zoals ^{99}Mo . Die isotoop is op beide manieren te produceren. In een cyclotron gebeurt dat door ^{100}Mo , dat één neutron meer heeft dan ^{99}Mo , te beschieten met een proton, waarna er een proton en een neutron uit de kern vrijkomen (zie figuur 1 midden):

Het voordeel van een cyclotron is dat er geen kans is op uit-de-hand-lopende kettingreacties, en dat er veel minder radioactief afval bij vrijkomt. Aan de andere kant heeft een kernreactor het voordeel van een veel grotere opbrengst. Cyclotrons werken met smalle deeltjesbundels, terwijl de neutronen in een reactor overal in het rond vliegen. Er is nog een ander nadeel aan cyclotronproductie: de grondstof ^{100}Mo komt maar voor tien procent in natuurlijk molybdeen voor. Dat natuurlijk molybdeen zal dus eerst verrijkt moeten worden. Met een cyclotron zijn ook andere medische isotopen te produceren. Door protonen in een

gas van zuiver ^{124}Xe (xenon-124) te schieten ontstaat ^{123}I (jodium-123), in gebruik voor diagnose van de ziekte van Parkinson. Of op ^{81}Rb (rubidium-81) voor de productie van ^{81}Kr (krypton-81), in gebruik voor diagnose van longembolie. Met een cyclotron is echter ook op een andere manier ^{99}Mo te produceren. Het *Accelerator-Driven System* is eigenlijk een mix van het cyclotron- en reactorproces. Een deeltjesversneller schiet protonen op een doelwit van lood en bismuth, dat neutronen genereert die anders uit de reactor zouden komen (zie figuur 1 onder). Dit systeem werkt met subkritische splijstof, zodat een kettingreactie zoals in een reactor onmogelijk is.



Figuur 2 – Het cyclotron voor de productie van medische isotopen bij de Technische Universiteit Eindhoven. In dit cyclotron bereiken de protonen een snelheid van ongeveer een-derde van de lichtsnelheid en een energie van 30 MeV.



Figuur 3 – Het cyclotron (boven) in zij- en bovenaanzicht (midden en onder).

Cyclotron

Het cyclotron is een deeltjesversneller. Deze versneller bestaat uit twee helften van een platte metalen trommel: D_1 en D_2 in figuur 3. Dicht bij de spleet tussen deze twee trommelhelften en dicht bij het middelpunt bevindt zich de protonenbron. Beide trommelhelften bevinden zich in een homogeen magnetisch veld B , loodrecht op het onder- en bovenvlak. De beide trommelhelften zijn aangesloten op een wisselspanningsbron. Die spanningsbron zorgt voor een wisselend elektrisch veld in de spleet tussen de twee trommelhelften.

Een proton dat de bron verlaat op het moment dat de wisselspanning maximaal is, wordt in het elektrisch veld tussen de twee trommelhelften versneld. Daarna doorloopt het in één van de trommelhelften onder invloed van het magnetisch veld met constante snelheid een halve cirkelbaan. De frequentie van de wisselspanning is zo ingesteld dat het elektrisch veld na het doorlopen van die halve cirkelbaan van teken is omgekeerd. Daardoor wordt het proton opnieuw versneld in het elektrisch veld tussen de twee trommelhelften. In de andere trommelhelft doorloopt het weer een halve cirkelbaan, maar nu met een grotere snelheid en dus een grotere baanstraal. Het elektrisch veld tussen de trommelhelften wisselt opnieuw van richting, het proton wordt versneld enzovoort. Na een groot aantal omlopen met een langzaam toenemende baanstraal botst het proton met grote snelheid tegen een trefplaatje: T in figuur 3.

Cirkelbaan – Een bewegend geladen deeltje zoals het proton ondervindt in een magnetisch veld een kracht: de *lorentzkracht*. Deze lorentzkracht veroorzaakt een kromming van de baan waarlangs het proton beweegt. Bij een bewegingsrichting loodrecht op de richting van een homogeen magnetisch veld is deze baan cirkelvormig en is de baansnelheid van het proton constant. De lorentzkracht F_L levert de voor deze cirkelbeweging benodigde middelpuntzoekende kracht F_{mpz} . Met dat gegeven is de straal r van de cirkelbaan en de omlooptijd T van het proton in die cirkelbaan te bepalen:

$$F_L = F_{mpz} \rightarrow B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r} \rightarrow r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$$

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T} \rightarrow T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot v}{B \cdot q \cdot v} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{B \cdot q}$$

In deze formules is B de sterkte van het magnetisch veld, v de snelheid, q de lading en m de massa van het proton.

Met de eerste formule is te zien dat de baanstraal r van het proton in het cyclotron toeneemt bij toenemende snelheid v . Met de tweede formule is te zien dat de omlooptijd T van het proton daarbij – dus: bij toenemende snelheid en baanstraal – constant blijft. Die omlooptijd geeft dan ook de in te stellen frequentie f van de wisselspanning: $f = 1/T$.

Bronnen

- *de Volkskrant*, 15 februari 2003 – Michael Persson: *Petten kan wel dicht*
- *de Volkskrant*, 10 mei 2003 – Martijn van Calmthout: *Dagelijks vers uit het cyclotron*

1 Reactievergelijkingen

In een cyclotron worden medische isotopen geproduceerd door atoomkernen te beschieten met protonen.

- Geef de reactievergelijking voor de productie van ^{99}Mo uit ^{100}Mo .
- Geef de reactievergelijking voor het daarop volgende verval van ^{99}Mo naar $^{99\text{m}}\text{Tc}$ en van $^{99\text{m}}\text{Tc}$ naar ^{99}Tc .

2 Cyclotron

In het cyclotron van figuur 3 worden protonen afwisselend versneld in een elektrisch veld en afgebogen in een magnetisch veld.

- Leg uit waarom de ruimte waarin de protonen in het elektrisch en magnetisch veld bewegen vacuüm is gepompt.
- Leg uit dat het in figuur 3 getekende magnetisch veld B inderdaad zorgt voor het afbuigen van de protonen in de aangegeven richting.
- De omlooptijd T van een proton in een homogeen magnetisch veld is onafhankelijk van zijn snelheid v en van de straal r van zijn cirkelbaan. Leg uit dat dit verschijnsel het mogelijk maakt om protonen in een cyclotron te versnellen.
- De maximale straal van de cirkelbaan van protonen in een cyclotron is gelijk aan de straal R van het cyclotron. Geef een formule voor de maximale snelheid v_m van protonen in het cyclotron.
- Geef met behulp van deze formule twee manieren om de maximale snelheid v_m van protonen in een cyclotron groter te maken. En leg uit op welke technische grenzen het steeds groter maken van die maximale snelheid zal vastlopen.
- Naast deze technische grenzen is er ook een theoretische grens. Uit de relativiteits-theorie van Einstein volgt dat bij toenemende snelheid de massa van de protonen niet constant blijft, maar groter wordt. Welk effect heeft dit op de omlooptijd van het proton in het cyclotron? En welk effect heeft dit op het versnellen van het proton in de spleet tussen de twee trommelhelften van het cyclotron?

Deeltjesversnellers

Het cyclotron is een kleine deeltjesversneller. Er zijn bij deze deeltjesversneller technische en theoretische grenzen aan de maximale snelheid en energie van de protonen (of andere geladen deeltjes). Voor het steeds verder opvoeren van snelheid en energie zijn grotere deeltjesversnellers nodig, zoals die van het CERN (Centre Européenne pour la Recherche Nucléaire) in Genève. Die deeltjesversnellers worden gebruikt voor onderzoek naar de structuur van materie.

Website: <http://public.web.cern.ch> > about CERN