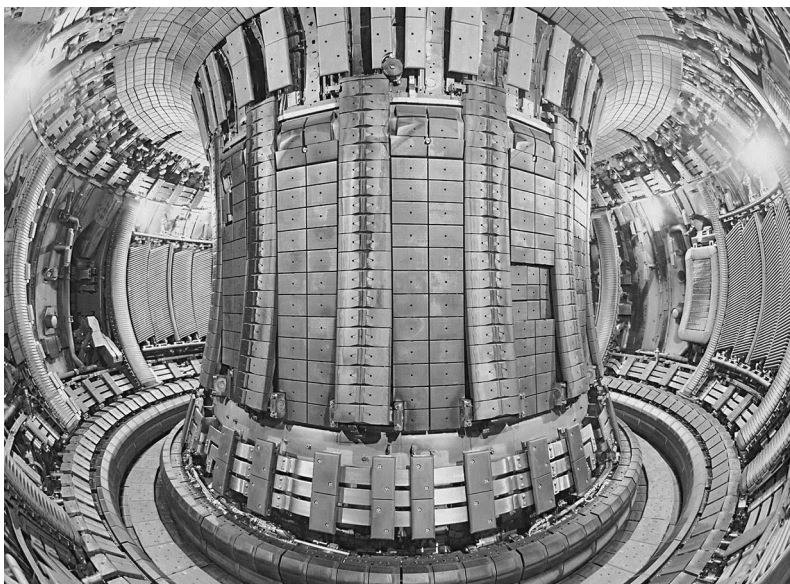


Opgave 4 Tokamak

Lees onderstaand artikel.

Een Tokamak is een kernfusiereactor waarin met behulp van een magnetisch veld een plasma kan worden opgesloten. Zo'n plasma bestaat uit atoomkernen en vrije elektronen. In een Tokamak wordt kernfusie bestudeerd, met als uiteindelijk doel een economisch rendabele energiebron te krijgen.



Kernfusie kan alleen optreden als het plasma heet genoeg is, de dichtheid hoog genoeg is en de opsluittijd lang genoeg is.

Het woord Tokamak is afkomstig uit het Russisch: **тороидальная камера с магнитными катушками**, hetgeen betekent: torusvormige ruimte met magnetische spoelen.

In het plasma vindt kernfusie plaats. Hierbij ontstaan een heliumkern en een neutron uit de fusie van een deuteriumkern (${}^2_1\text{H}$) en een tritiumkern (${}^3_1\text{H}$).

3p 21 Bereken de hoeveelheid energie die bij deze reactie vrijkomt.

Deuterium komt voor in zeewater. De oceanen bevatten voldoende deuterium om de totale wereldbevolking miljarden jaren van energie te voorzien bij de huidige energiebehoefte.

Tritium komt nauwelijks voor in de natuur. Tritium wordt verkregen door lithium-6-kernen te beschieten met neutronen. Bij deze reactie komt naast één tritiumkern nog één ander deeltje vrij.

3p 22 Geef de kernreactievergelijking voor de productie van tritium uit lithium-6.

Het plasma moet een temperatuur hebben van een paar honderd miljoen Kelvin om de kernen zo dicht bij elkaar te laten komen, dat ze kunnen fuseren. Geen enkel materiaal is bestand tegen deze hoge temperatuur. Om die reden mag het plasma de reactorwand niet raken en gebruikt men zogenoemde 'magnetische opsluiting'.

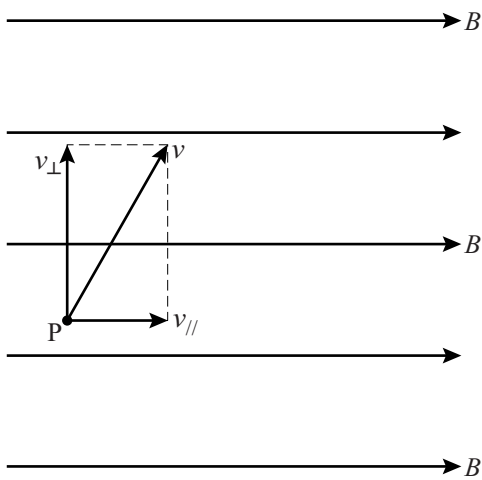
Om magnetische opsluiting van geladen deeltjes te beschrijven, bekijken we een geladen deeltje dat in een magnetisch veld beweegt. Het geladen deeltje komt het magnetisch veld schuin binnen met snelheid v .

Zie figuur 1.

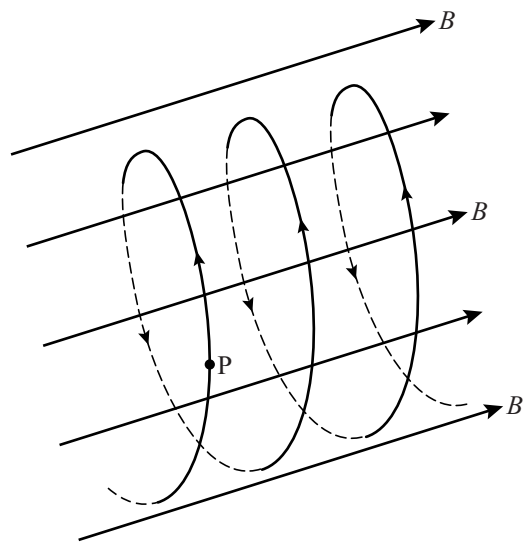
De snelheidsvector is te ontbinden in een component evenwijdig aan de magnetische veldlijnen en een component loodrecht op de magnetische veldlijnen. In figuur 1 is dit schematisch weergegeven voor punt P.

Het deeltje gaat in een spiraalvorm bewegen, zoals in figuur 2 is weergegeven.

figuur 1
'2-dimensionaal'



figuur 2
'3-dimensionaal'



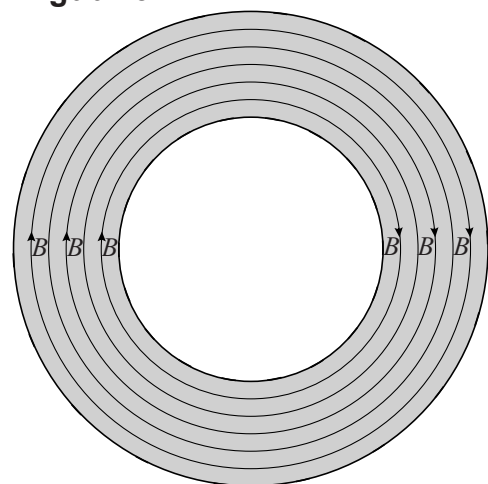
- 4p 23 Voer de volgende opdrachten uit:
- Leg uit dat het deeltje in een spiraalvorm gaat bewegen.
 - Leg uit of het deeltje positief of negatief geladen is.

In een Tokamak is het magnetisch veld toroïdaal. Dat wil zeggen dat de veldlijnen de vorm van een ring (een torus) hebben.

Dit is schematisch in bovenaanzicht weergegeven in figuur 3.

We bekijken een deuteriumkern die binnen in zo'n magnetisch veld een spiraalvormige beweging maakt. De component van de snelheid loodrecht op het veld v_{\perp} heeft een waarde van $5,1 \cdot 10^6 \text{ m s}^{-1}$ en de straal van de spiraalbaan bedraagt 0,20 m.

figuur 3



- 4p 24 Bereken de sterkte van het magneetveld.

Er ontsnapt veel energie uit de torus. Enerzijds is dat gewenst, want deze energie wordt omgezet in thermische energie. Dit is de energie die de centrale levert. Anderzijds is dat ongewenst, want er is een hoge temperatuur nodig om het fusieproces op gang te houden. Daarom moet er bij de bestaande kleinere Tokamaks energie van buiten toegevoerd worden.

In Zuid-Frankrijk is de nieuwe Tokamak-ITER in aanbouw, die veel groter is dan de bestaande Tokamaks. Alle afstanden in de Tokamak-ITER zijn een factor k groter dan bij een bestaande Tokamak.

Bij de Tokamak-ITER hoeft geen energie van buitenaf te worden toegevoerd om het fusieproces op gang te houden.

3p **25** Leg uit hoe dat komt.

Om de voorwaarden te beschrijven waaronder een plasma in een Tokamak kan blijven bestaan en kernfusie kan optreden, gebruiken wetenschappers het begrip 'tripelproduct'.
(Dat betekent een product van drie factoren.)

Hiervoor geldt:

$$\text{tripelproduct} = n \cdot \tau \cdot T$$

Hierin is:

- n deeltjesdichtheid;
- τ opsluittijd;
- T temperatuur.

Als het tripelproduct boven een bepaalde drempelwaarde ligt, kan kernfusie plaatsvinden. Een probleem is dat de drie factoren van het tripelproduct elkaar beïnvloeden. Als één factor groter wordt, kunnen andere factoren daardoor kleiner worden.

Stel dat de opsluittijd τ groter wordt.

2p **26** Noem één andere factor die daardoor kleiner wordt en geef de reden daarvoor.