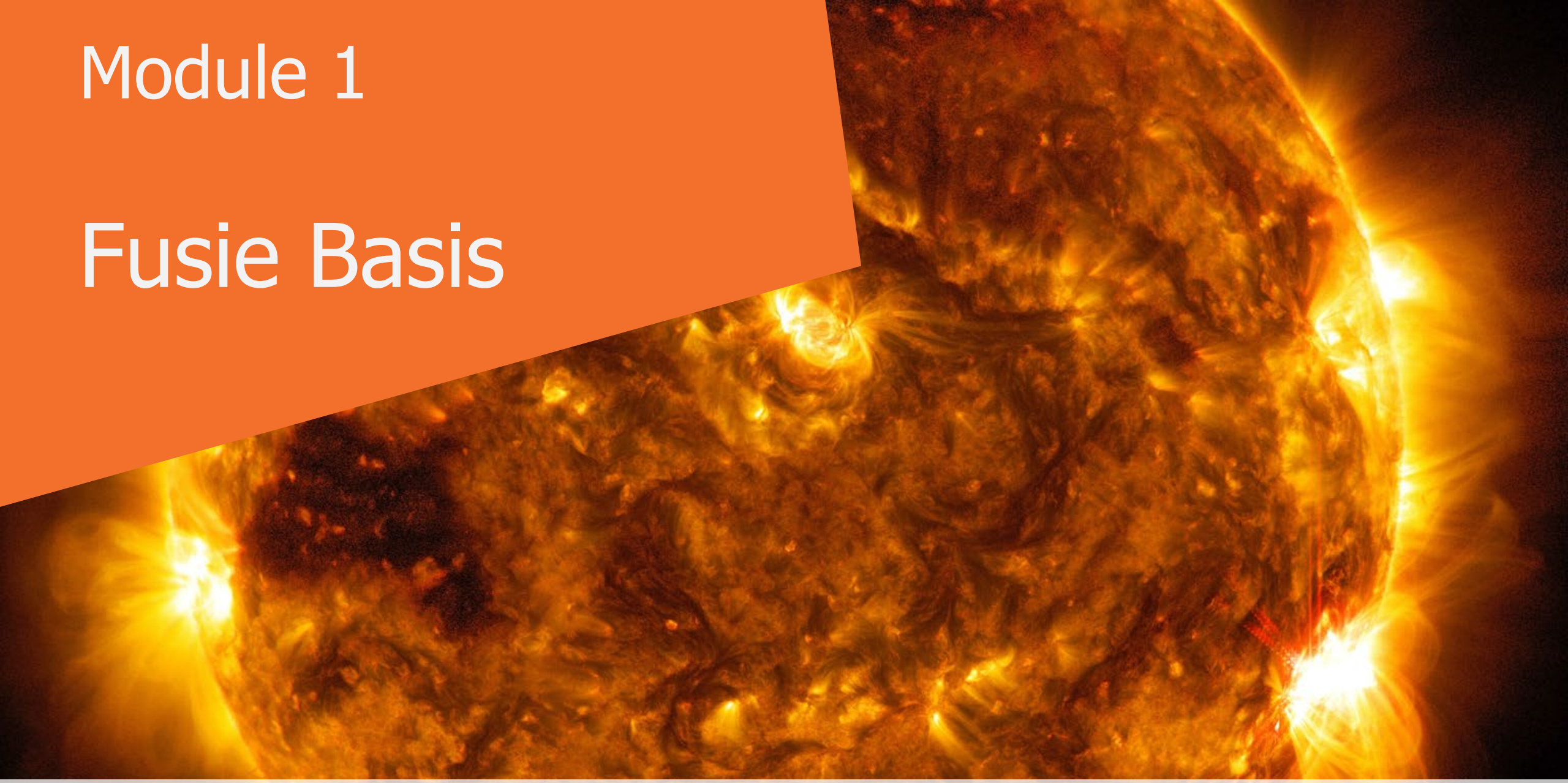
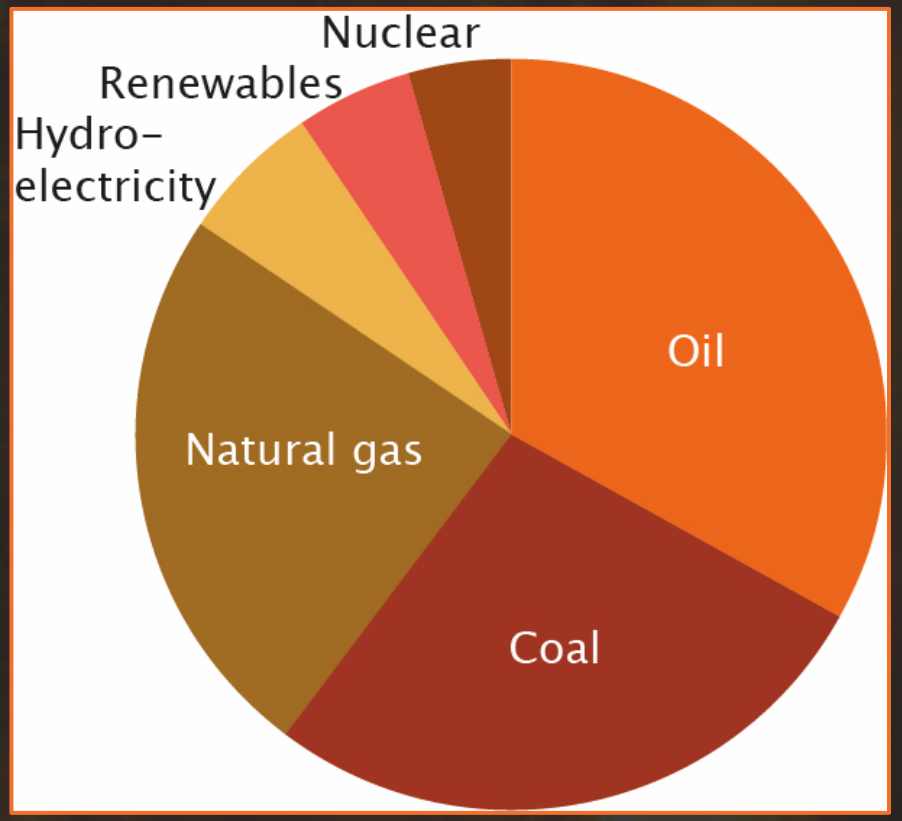
Module 1

Fusie Basis



1.1 Energie en haar rol in onze wereld

- De energiemix
  - Hernieuwbaar vs niet-hernieuwbaar



Source: BP Statistical Review of World Energy, 2020.

Klassikale opdracht 1.1

- a) Schat hoeveel procent van de Nederlandse energie wordt geproduceerd door hernieuwbare energiebronnen, zoals zonne-energie, windenergie, waterkrachtenergie, etcetera. Leg jouw redenering uit. Welke aannames heb jij gedaan?
- b) Vergelijk jouw schatting met die van een andere leerling. Verschillen jullie aannames veel? Vergelijk ook jullie redeneringen, hebben jullie andere aannames gedaan?
- c) Zoek op het internet de energiemix op van Nederland. Vergelijk jullie schattingen met deze data. Zaten jullie schattingen in de buurt van de werkelijke data

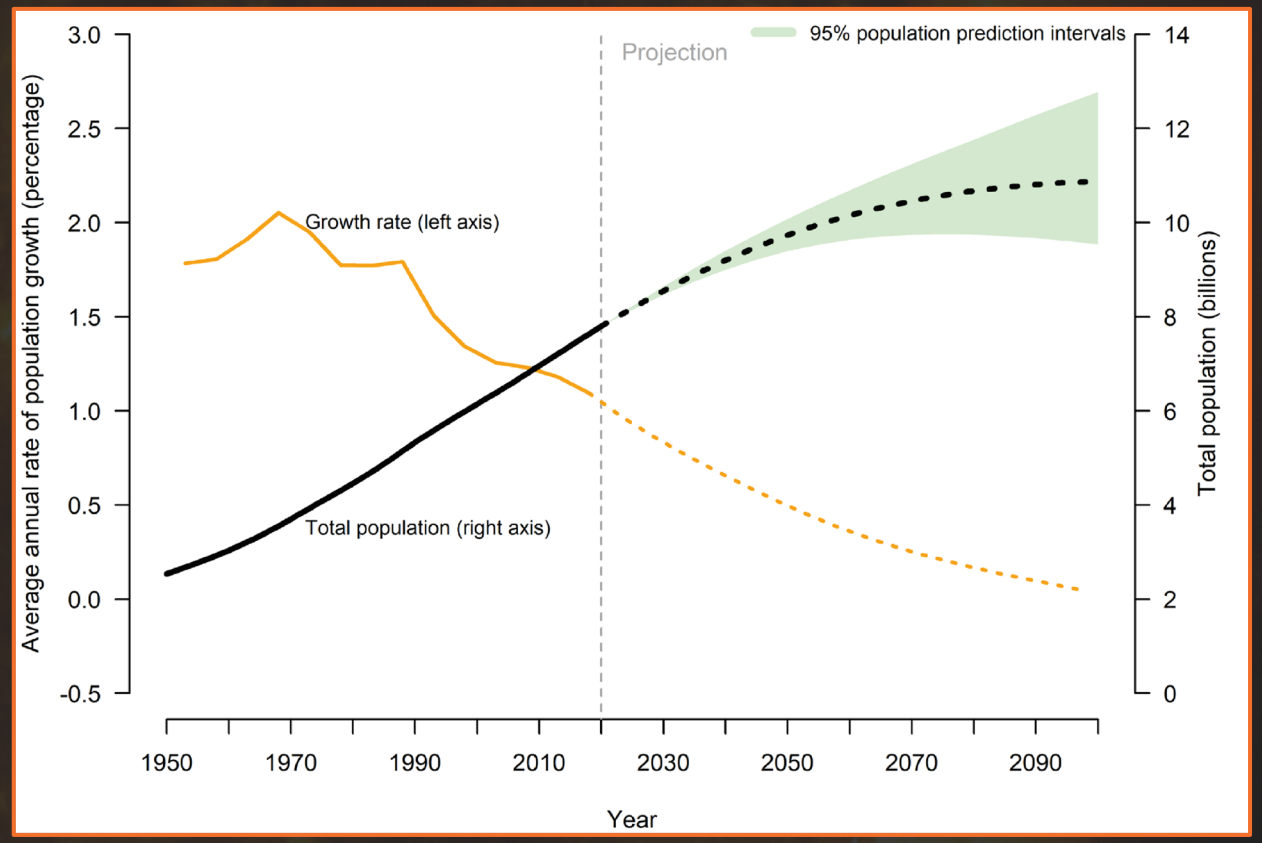
Klassikale opdracht 1.1 - antwoorden

a) en b): Overleg!

c): kijk bijvoorbeeld op
https://www.cbs.nl/nl-nl/economie/industrie-en-energie/energietransitie

Het energieprobleem

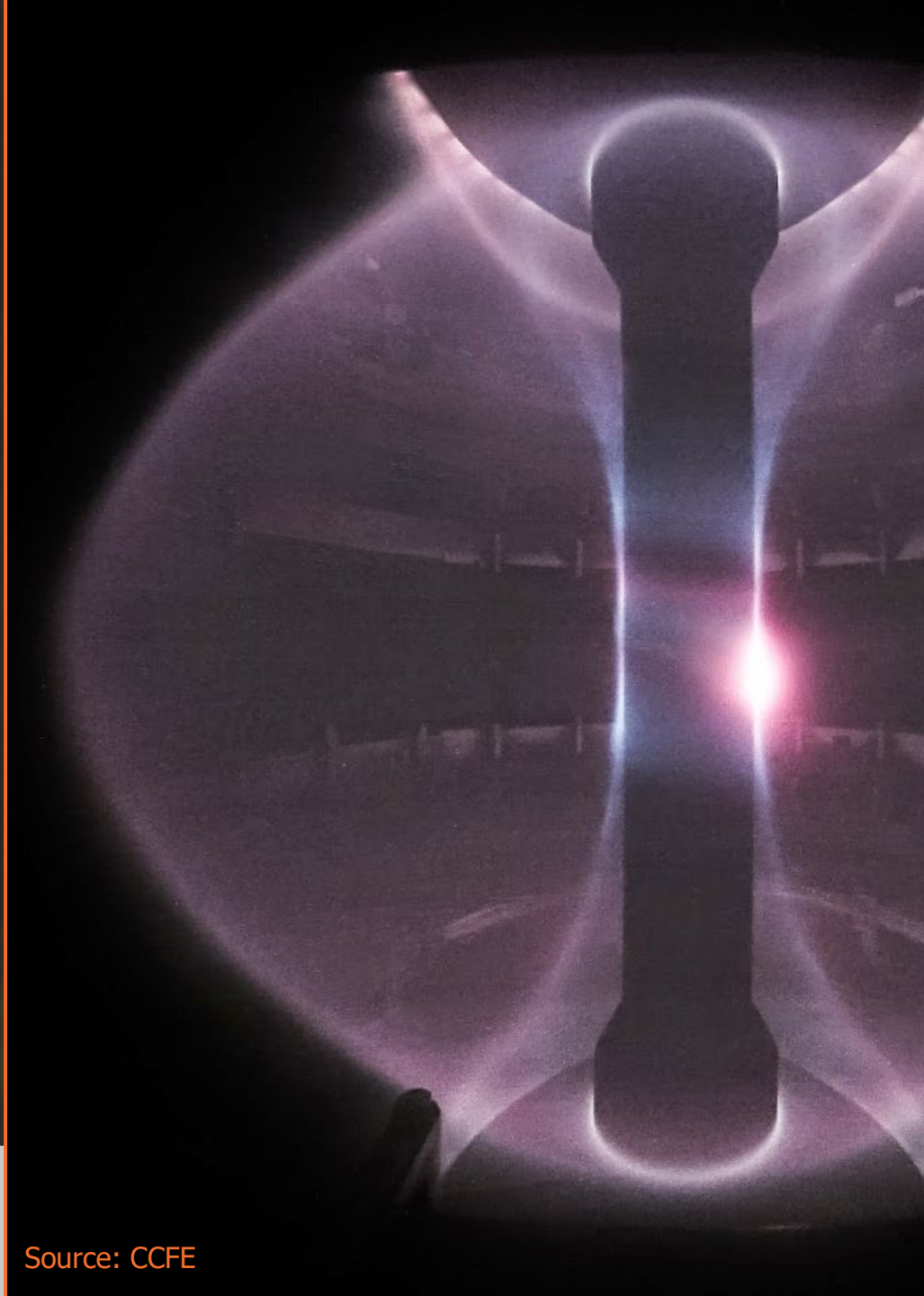
- Probleem
  - Toeneemende populatie
  - Toenemend energieverbruik
  - Energiebronnen die schadelijk zijn voor het milieu



Source: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). World Population Prospects 2019: Highlights. ST/ESA/SER.A/423.

Het energieprobleem

- Oplossingen
  - Verminder de energiebehoefte
  - Meer duurzame energiebronnen
- Hoe?
  - Betere opslag
  - Alternatieve energiebronnen
  - Back-up oplossing: Kernfusie!



Source: CCFE

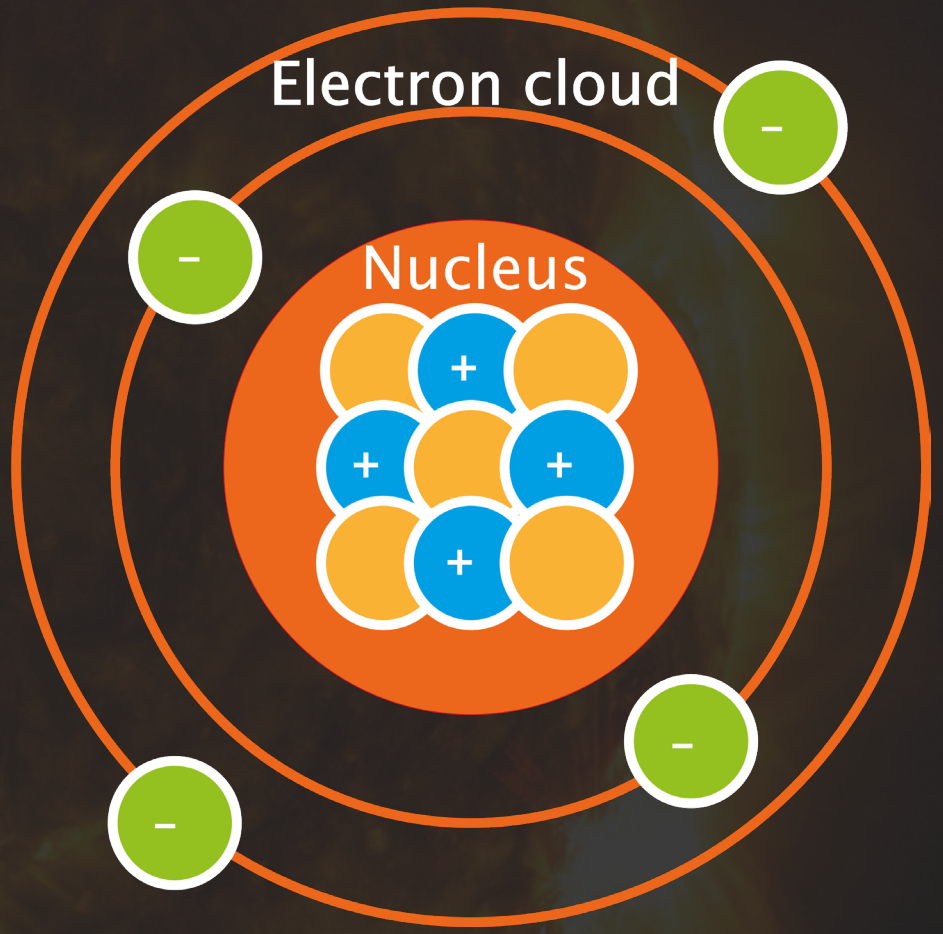
1.2 Fusie in de Zon

- De Zon
  - Ster
  - Bij elkaar gehouden door zwaartekracht
  - Enorme uitwaartse druk
  - In evenwicht
- Energie komt van fusie!
  - Laten we hier verder naar kijken!

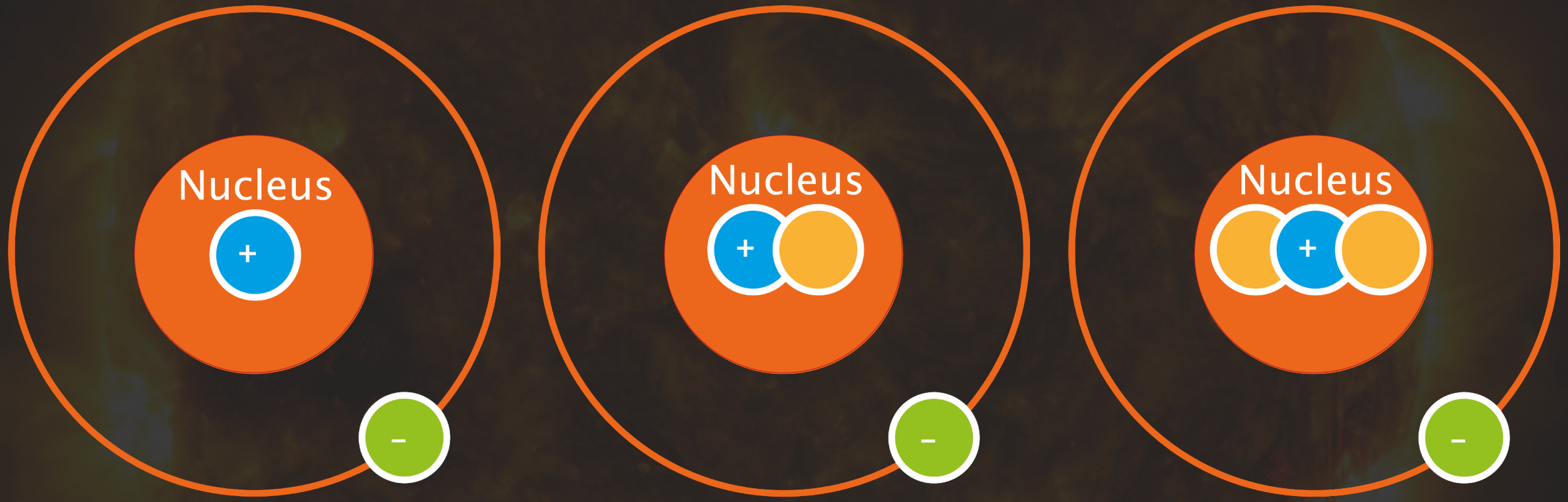
Source: NASA

In het atoom

- Kern
  - Proton: bepaald welk element, positieve lading
  - Neutron: bepaald welk isotoop, geen lading
- Elektronenwolk
  - Elektron: bepaald lading/ion, negatieve lading



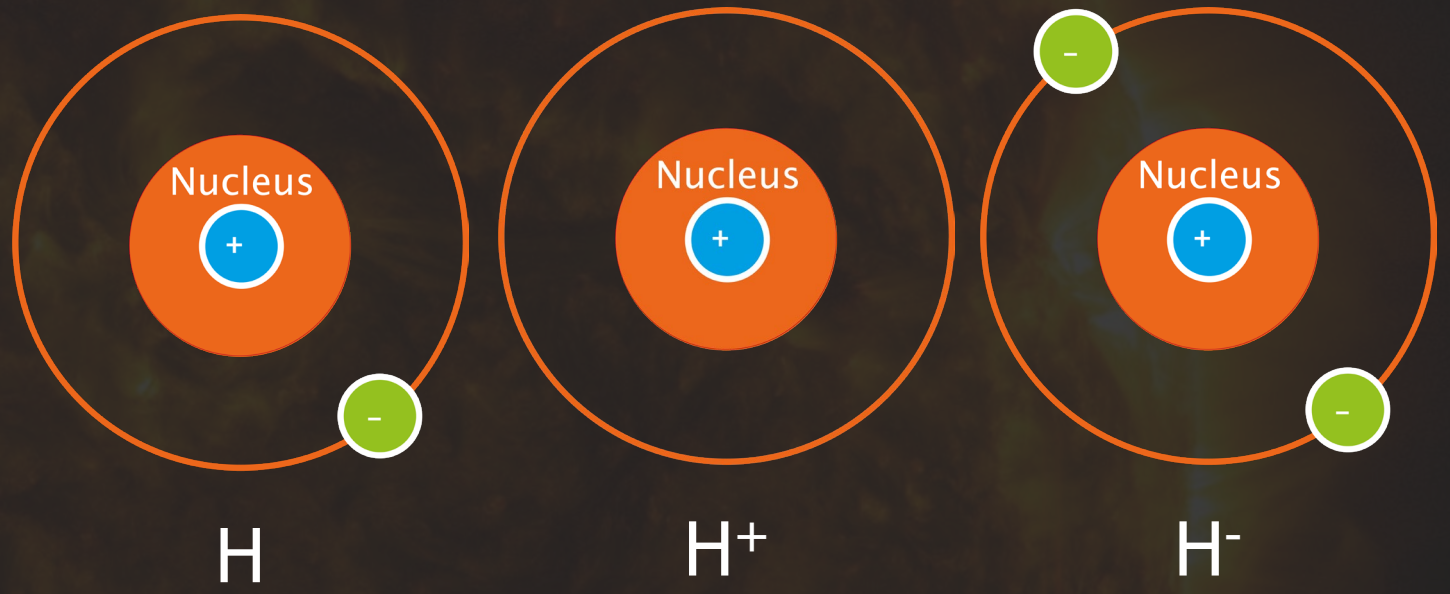
Isotopen



Waterstof Deuterium Tritium

Atomen en ionen

- Atomen
  - Neutraal
- Ionen
  - Geladen
  - Kunnen positief of negatief



Lading

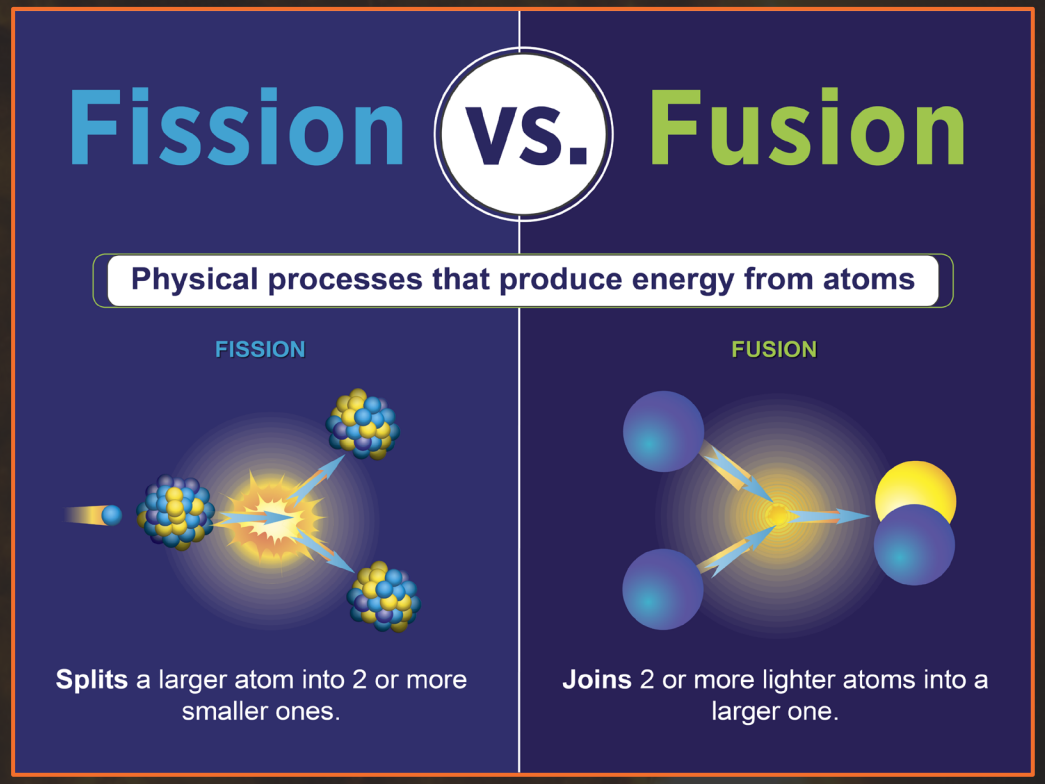
- Geladen deeltjes beïnvloeden elkaar

Aantrekking: (+/-)

Afstoting: (+/+) or (-/-)

Kernreacties

- Splijting
  - Een zware kern splijt in twee (of meer) kleinere delen, wat energie oplevert
- Fusie
  - Twee lichte kernen fuseren tot één zwaardere kern, wat energie oplevert



Graphic by Sarah Harman | U.S. Department of Energy

De kernfusiereactie

- Makkelijkste: D-T fusie

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He} + \mathrm{n} + 17.6\ \mathrm{MeV}$$

  - Deuterium en tritium
  - Twee isotopen van waterstof

17.6 MeV = 0.000000000000282 Joules → heel veel energie voor twee kleine deeltjes!

1 amu = 1.661×10^{-27} kg

= 0.000000000000000000000000001661 kg

Klassikale opdracht 1.2

Het begrip energiedichtheid is belangrijk in natuurkunde. Het klinkt ingewikkeld, maar komt hier neer op “hoeveel energie kunnen wij halen uit een bepaald volume van een brandstof”. Als wij één liter benzine verbranden en meten hoeveel energie er is vrijgegeven (in de vorm van hitte) en dat delen door het volume dat is verbrand, dan krijgen wij een getal voor de energiedichtheid van benzine. Dit kunnen wij doen voor allerlei brandstoffen.

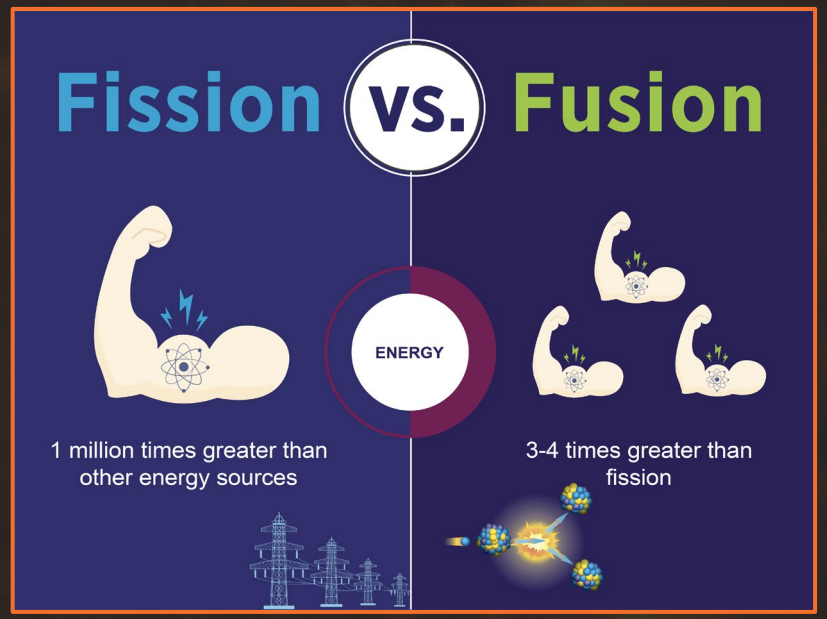
- a) Van de brandstoffen hieronder genoemd, welke denk jij dat die de hoogste energiedichtheid heeft? En welke de laagste? Rangschik de brandstoffen van hoogste naar laagste energiedichtheid.
- b) Vergelijk jouw rangschikking met die van een andere leerling. Overleg waarom jullie denken dat deze volgorde correct is.
- c) Zoek de energiedichtheid op van deze brandstoffen. Vergelijk jouw rangschikking met deze data. Zat jouw inschatting in de buurt?

Benzine – olie – kool – hout – waterstof (gas) – ethanol – Deuterium – Uranium

Klassikale opdracht 1.2 – antwoorden

Van hoog naar laag:

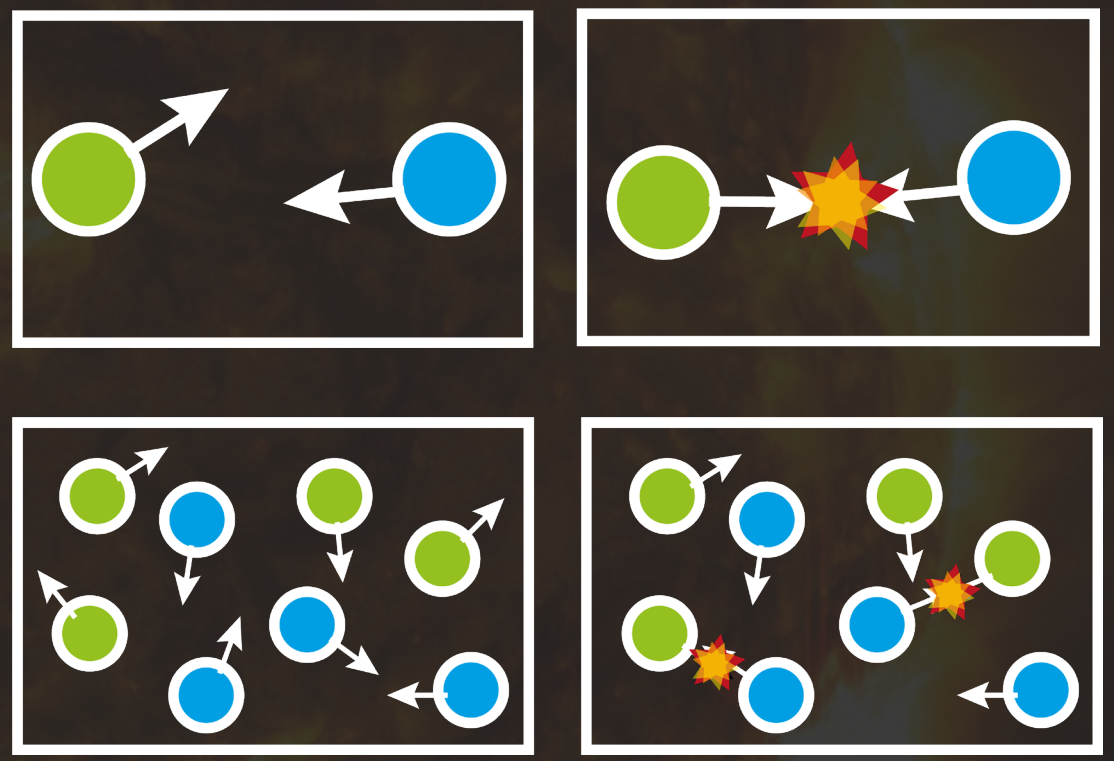
1. Deuterium
2. Uranium
3. Kool
4. Olie
5. Benzine
6. Ethanol
7. Hout
8. Waterstof (gas)



Graphic by Sarah Harman | U.S. Department of Energy

Criteria voor fusie

- Benodigd:
  - Hoge temperatuur (= hoge snelheid)
  - Hoge dichtheid
- En:
  - Energie-opsluitingstijd

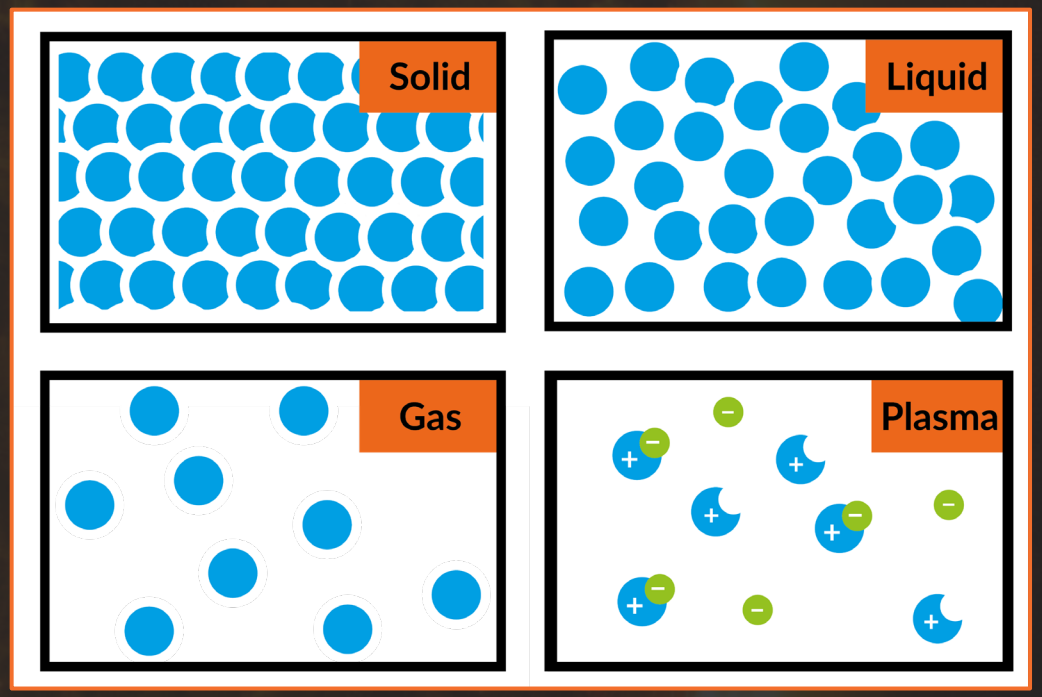


Criteria voor fusie

- In de Zon: zwaartekracht
  - Zorgt voor deze extreme omstandigheden, houdt energie lang opgesloten
- Op Aarde: een andere manier nodig
  - Fusiereactors
  - Plasma!

1.3 Plasma

- De “vierde fase”
- Geïoniseerd gas
  - Bevat vrije ladingen:
    - Positieve ions
    - Negatieve elektrons
  - Volledig-geïoniseerd plasma
    - Alleen ionen en elektronen, geen neutrale deeltjes



Ionisatie vs faseovergang

- **Ionisatie**
- Gas
- Hoge druk en temperatuur
- Gasafbraak:
  bindingen *binnen* het atoom breken
- Criterium voor gasafbraak
  - Energie hoger dan ionisatie-energie

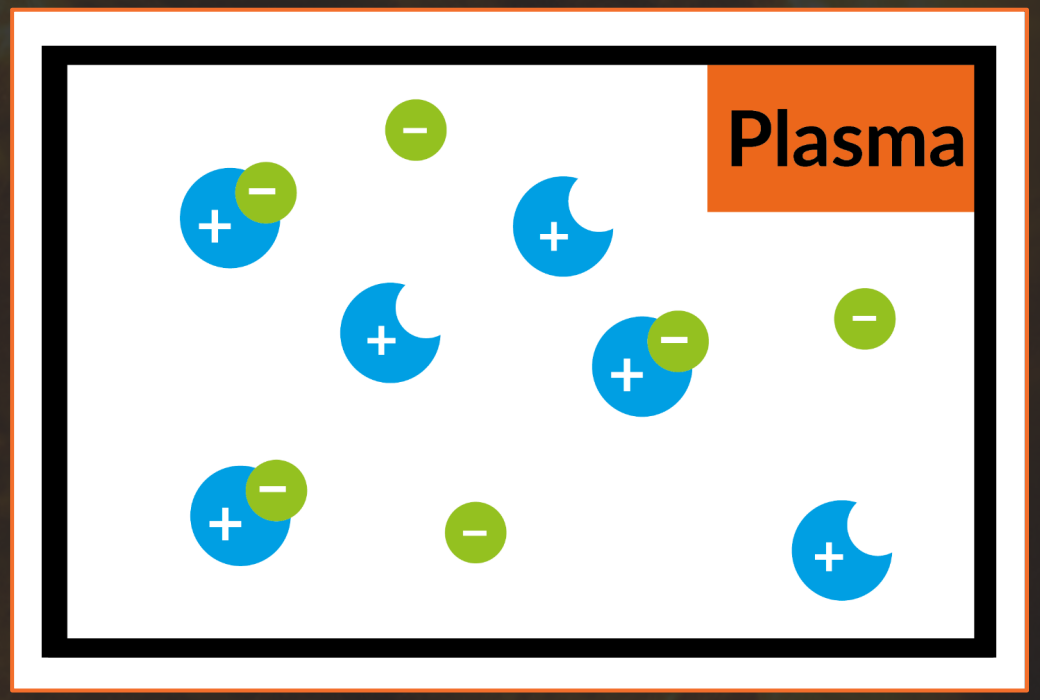
- **Faseovergang**
- Vaste stof / vloeistof / gas
- Op specifieke druk en temperatuur
- Overgang:
  bindingen *tussen* verschillende atomen breken
- Criterium voor overgang
  - Energie hoger dan drempelwaarde

Plasma geleidt energie

- Plasma bestaat uit vrij-bewegende geladen deeltjes

- Kan elektriciteit geleiden
  - Elektrische stroom in plasma

- Gevoelig voor
  - Elektrische velden
  - Magnetische velden



Voorbeelden van plasmas

- Meest voorkomende vorm van materie in het universum!

- Noorderlicht (Aurora Borealis)
- Neonlicht
- Bliksem
- Plasma ontlading
- Zon
- In een tokamak

Klassikale opdracht 1.3 – multiple choice

Het verschil tussen een plasma en een gas zit er dus in of er geladen deeltjes aanwezig zijn of niet. Daarnaast gloeien de meeste plasma's zichtbaar, terwijl gassen dat niet doen en vaak onzichtbaar zijn. Waarom gloeien plasma's?

Kies uit:

(A) Op hoge temperatuur begint alles te gloeien. Plasma's gloeien dus doordat zij vaak een hoge temperatuur hebben.

(B) De geladen deeltjes kunnen vrij bewegen en botsen. Er is een kans dat een vrij elektron een positief ion tegenkomt, botst, samenvoegt, en een neutraal atoom vormt. Bij dit proces komt licht vrij, wat in het zichtbare spectrum kan vallen.

(C) Bij sommige kernreacties komt licht vrij. Als dit licht in het zichtbare spectrum valt, lijkt het plasma te gloeien.

Klassikale opdracht 1.3 – multiple choice

Het verschil tussen een plasma en een gas zit er dus in of er geladen deeltjes aanwezig zijn of niet. Daarnaast gloeien de meeste plasma's zichtbaar, terwijl gassen dat niet doen en vaak onzichtbaar zijn. Waarom gloeien plasma's?

Kies uit:

(A) Op hoge temperatuur begint alles te gloeien. Plasma's gloeien dus doordat zij vaak een hoge temperatuur hebben.

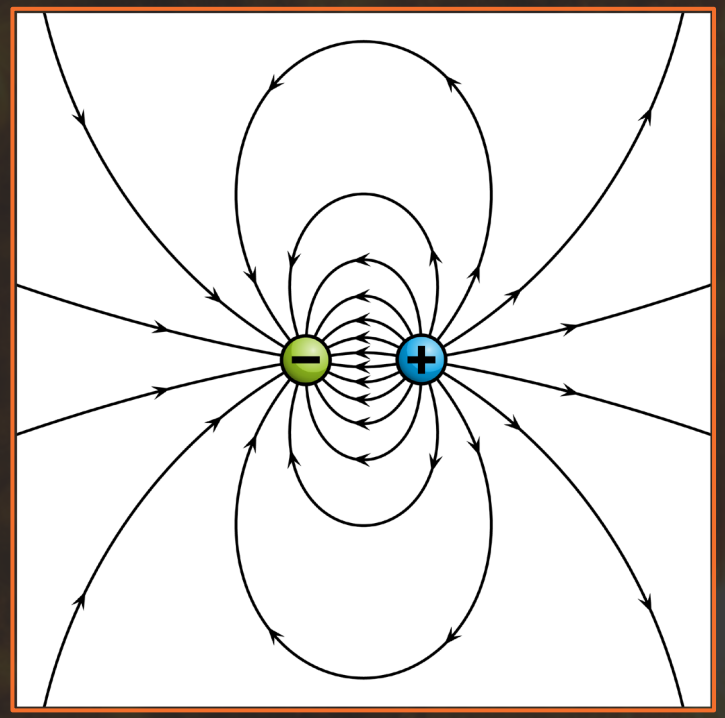
(B) De geladen deeltjes kunnen vrij bewegen en botsen. Er is een kans dat een vrij elektron een positief ion tegenkomt, botst, samenvoegt, en een neutraal atoom vormt. Bij dit proces komt licht vrij, wat in het zichtbare spectrum kan vallen.

(C) Bij sommige kernreacties komt licht vrij. Als dit licht in het zichtbare spectrum valt, lijkt het plasma te gloeien.

Elektrisch veld

- Invloed van lading op de omgeving
- Sterk veld dichtbij lading

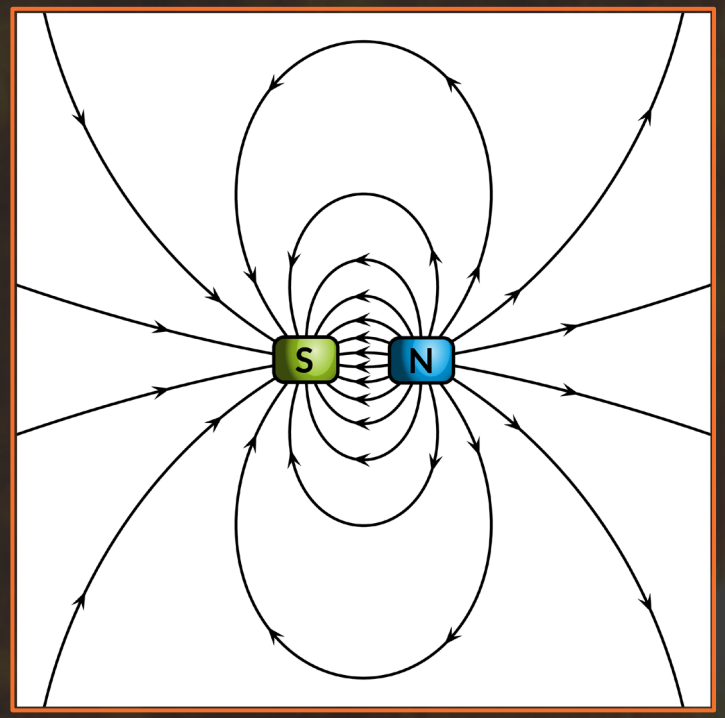
- Elektrische veldlijnen
  - Denkbeeldig
  - Kruisen elkaar nooit
  - Dichtbij elkaar = sterk veld!
  - Van + naar -



Magnetisch veld

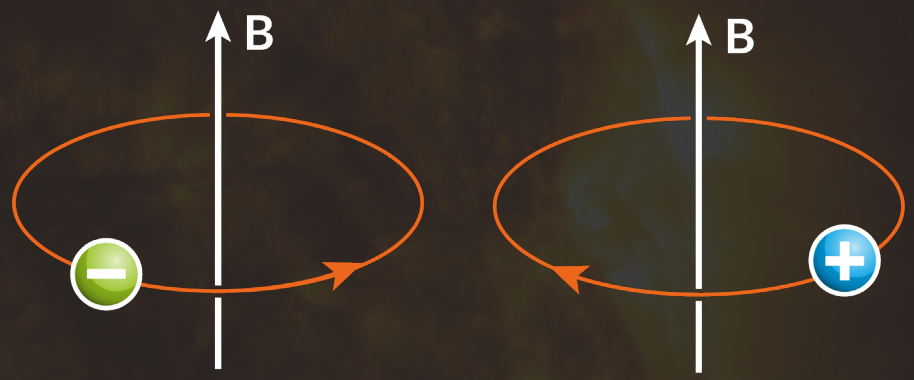
- Invloed van bewegende lading op de omgeving
- Sterk veld dichtbij de polen

- Magnetische veldlijnen
  - Denkbeeldig
  - Kruisen elkaar nooit
  - Dichtbij elkaar = sterk veld!
  - Van N naar S
  - Altijd gesloten kringen

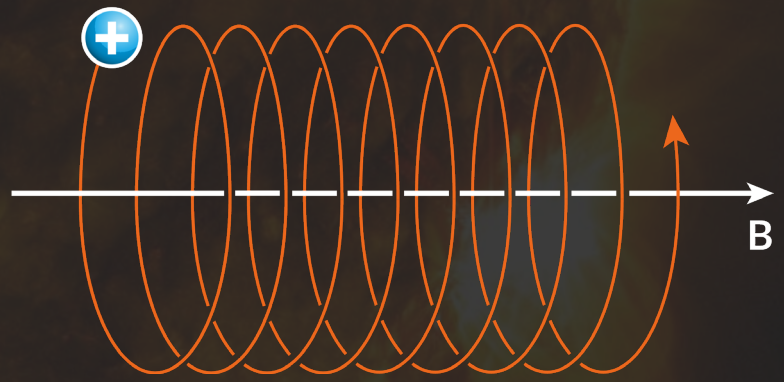


Lading in een magnetisch veld

- Gyratiebeweging
  - Lading reageert op magnetisch veld
  - Ronde beweging rondom magnetische veldlijn



- Als deeltje ook een snelheid heeft in de richting van de veldlijn:
  - Helische beweging rondom de veldlijn



Plasmaopsluiting

- Waarom hebben wij elektrische en magnetische Velden nodig in fusie?

- Om het plasma op te sluiten!
- Plasma → hoge temperatuur en snelle deeltjes

- Reactorwand smelt als deeltjes die aanraken
- Gebruik een magnetisch veld om de deeltjes van de wand af te houden!

Klassikale opdracht 1.4

De richting van een magnetisch veld (ookwel, de richting van de magnetische veldlijnen) is afhankelijk van de richting waarin geladen deeltjes bewegen. Teken de richting van het magnetisch veld door een aantal magnetische veldlijnen te tekenen voor de volgende voorbeelden:

a) Een elektrische stroom die door een rechte draad loopt.
b) Een elektrische stroom die tegen de klok in loopt door een ronde draad.
c) Een elektron dat met de klok mee ronddraait, en een proton dat tegen de klok in ronddraait. Vergelijk deze tekening met die van vraag (b): wat valt jou op?
d) Wat kan jij nu zeggen over de richting van een magnetisch veld als gevolg van de richting van een bewegend geladen deeltje?

Klassikale opdracht 1.4 – antwoorden

a) De stroom komt uit het papier.
Het magnetisch veld draait hier omheen tegen de klok in.

b) Het magnetisch veld in de cirkel komt uit het papier.
Het magnetisch veld buiten de cirkel gaat het papier in.

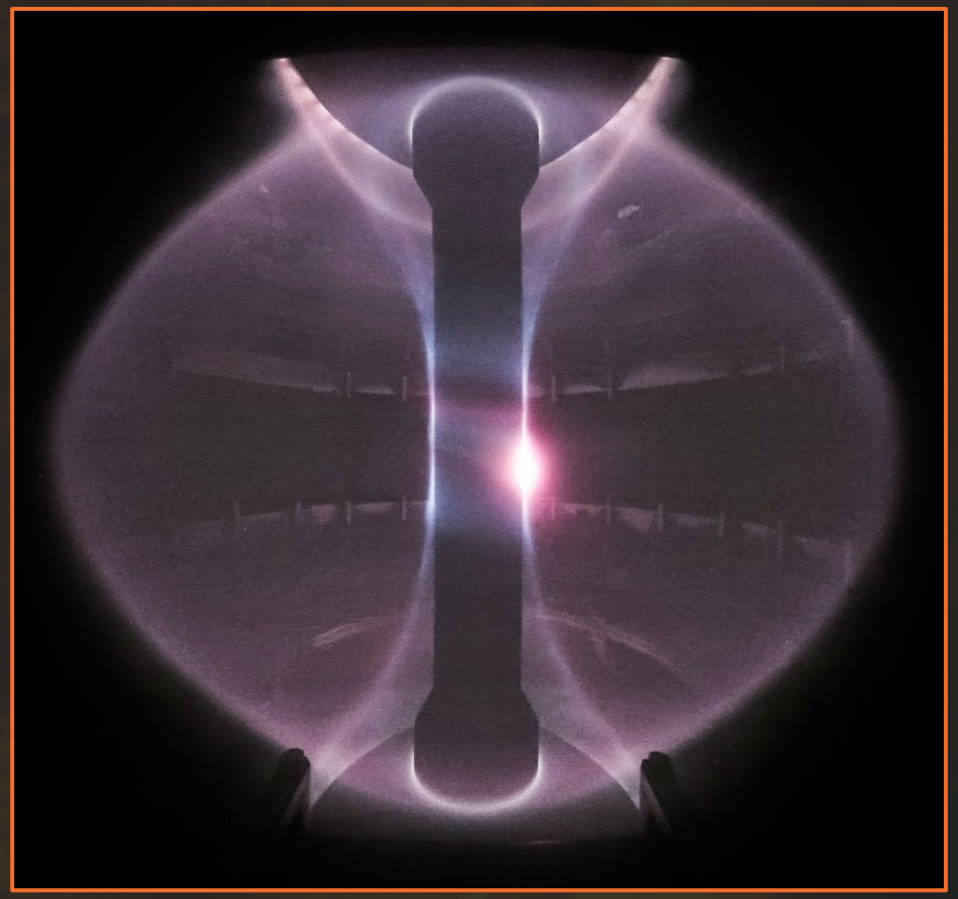
c) Door de tegengestelde lading en tegengestelde beweging heft het magnetisch veld dezelfde richting voor beide deeltjes.

d) De richting van het magnetisch veld staat altijd haaks op de richting van de stroom.

1.4 Een fusiereactor maken

- Magnetisch opgesloten fusie
  1. Houdt een plasma opgesloten met een sterk magnetisch veld
  2. Verhit het plasma tot fusie-omstandigheden

- Meest gebruikte type reactor:
- Tokamak
- Russisch:
  "toroïdische kamer met magnetische spoelen"



MAST (Mega Ampere Spherical Tokamak) | Source: CCFE

De tokamak

- Donut-vormig (torus)
  - In de donut: plasma
  - Buiten de donut: magnetische spoelen
- Geometrie
  - hoofdradius R
  - bijradius a
  - poloïdale hoek θ (theta)
  - toroïdale hoek φ (phi)

Source: Powerpoint stock image

Klassikale opdracht 1.5

Verschillende tokamaks hebben verschillende aspectverhoudingen: de verhouding tussen de grote hoofdradius R en de kleine bijradius a. Hierdoor kan de vorm van tokamaks best verschillend. Laten wij verder kijken naar deze vormen.

a) Schets een torus met een grote hoofdradius, maar een kleine bijradius. Hoe ziet dit er uit?

b) Schets een torus met een kleine hoofdradius, maar een grote bijradius. Waarom is dit moeilijk om te tekenen?

c) Wat gebeurt er als de hoofdradius wordt verkleint, maar de bijradius groot blijft? Welke vorm blijft er uiteindelijk over?

d) Wat gebeurt er als de aspectverhouding veranderd?

e) Wat is de laagst mogelijke aspectverhouding voor een torus?

Klassikale opdracht 1.5 – antwoorden

a) A doughnut

b) The doughnut becomes more spherical, the minor radius cannot be larger than the major radius (otherwise it is no longer a torus!)

c) If we allow the minor radius to be larger than the major radius and take the limiting case we get a sphere

d) The torus changes shape

e) The minor radius cannot be larger than the major radius. If they are equal the aspect ratio is at its minimum, so aspect ratio = 1.

Klassikale opdracht 1.6

Zoals wij hebben gezien, zijn er twee richtingen in een torus te onderscheiden: de toroïdale en poloïdale richting. Deze kunnen verwarrend zijn, dus laten wij er verder naar kijken.

(a) Maak een schets van de twee mogelijke doorsnedes van een torus.

(b) Welke doorsnede is de poloïdale doorsnede? Welke is de toroïdale doorsnede? Wat valt op aan deze doorsnedes?

Klassikale opdracht 1.6 – antwoorden

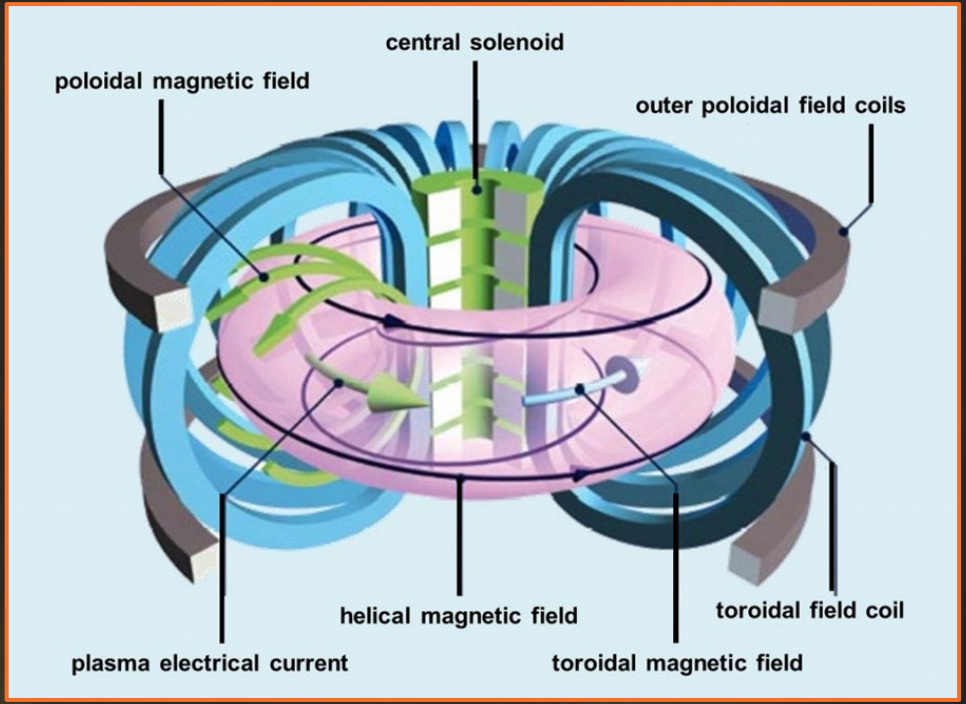
Poloïdale doorsnede

Toroïdale doorsnede

Magnetische spoelen van een tokamak

- Drie magneetsystemen:

- Toroïdale-veld magneten
- Centrale solenoïde
- Poloïdale-veld magneten



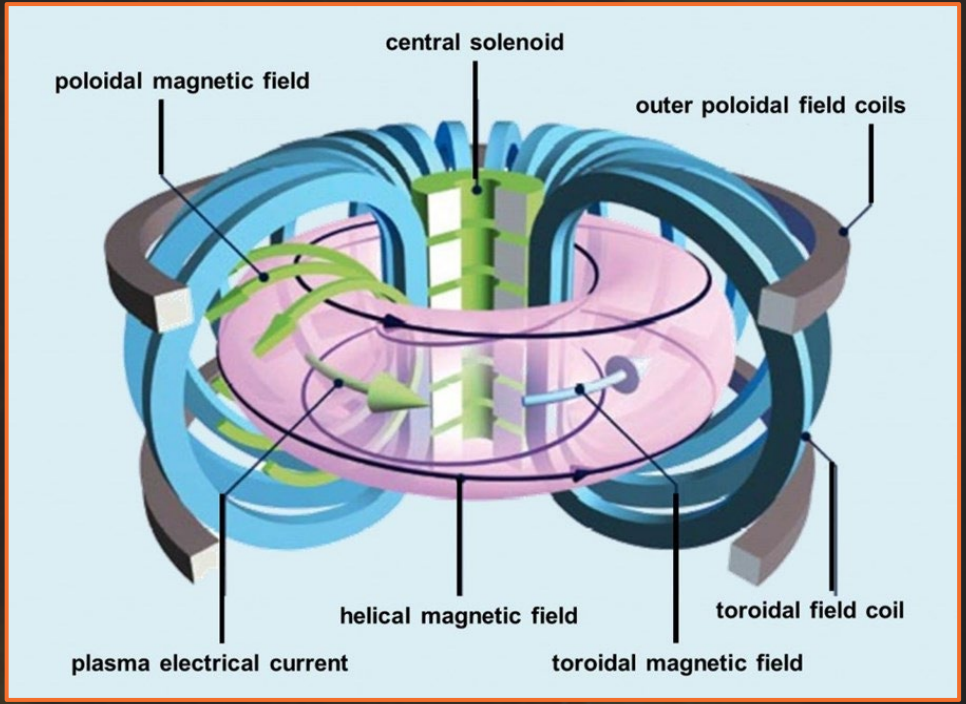
Credit: S. Li et al. https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

Klassikale opdracht 1.7

Laten wij kijken naar de standaard tokamak, met zijn drie magnetische systemen.

(a) Welke magneten zijn zichtbaar in de poloïdale doorsnede?
Hoe heten deze magneten, en is deze naam logisch?

(b) Verklaar de namen van de andere twee groepen magneten.



Credit: S. Li et al. https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

Klassikale opdracht 1.7 – antwoorden

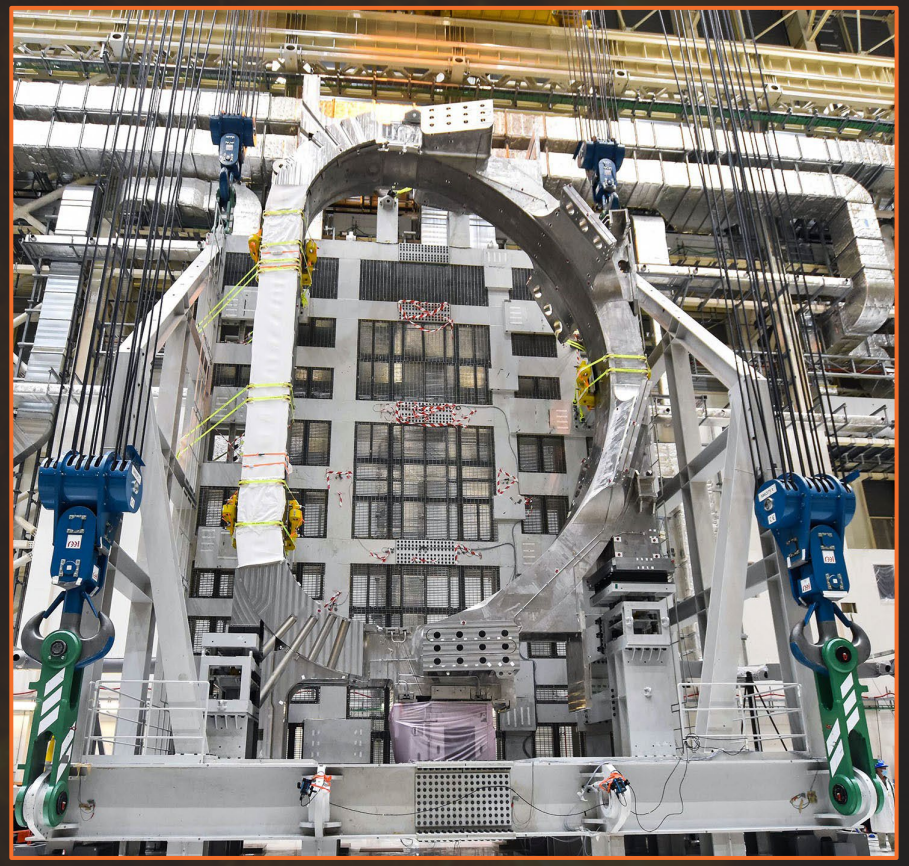
a. Toroïdale-veld magneten – liggen in de poloïdale doorsnede van de tokamak, genereren het toroïdale magnetisch veld

b. Centrale solenoïde – ligt in het “gat van de donut”, in het centrum van de tokamak
Poloïdale-veld magneten – liggen horizontal boven en onder de tokamak (in de toroïdale doorsnede), genereren het poloïdale magnetisch veld

Toroïdale-veld magneten

- Sterkste veld in de tokamak
- D-vormig
- Liggen rondom de donut

- Ook andere magneten nodig voor stabiele opsluiting van het plasma



Credit: ITER

Centrale solenoïde

- Gestapelde set magneten in het “gat van de donut”
- Veld wordt indirect gebruikt:
  magnetische inductie genereert een elektrische stroom in het plasma
- Deze stroom creëert een poloïdaal magnetisch veld
- Toroïdaal + poloïdaal veld → helisch magnetisch veld
- Helisch veld nodig voor stabiele opsluiting

Magnetische grootheden

- Magnetische veldsterkte B
  - Hogere dichtheid van veldlijnen leidt tot hogere B

- Magnetische flux Φ
  - Hoofdletter phi
  - Dichtheid van magnetische veldlijnen door een oppervlak
  - Afhankelijk van hoek tussen lijnen en oppervlak

$$\Phi = B \cdot A \cos(\alpha)$$

Elektromotorische kracht (EMK)

- Afhankelijk van de verandering van magnetische flux
- Berekent door:

$$\text{Aantal windingen in spoel} \times \text{verandering in magnetische flux}$$

- EMK: ε (epsilon)

- Gebruikt in transformators

$$\varepsilon = N \cdot -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

EMK & Magnetische inductie

EMK gaat de verandering in magnetische flux tegen

1. Creëert een voltage
2. Voltage leidt tot stroom
3. Stroom leidt tot tegengesteld magnetisch veld

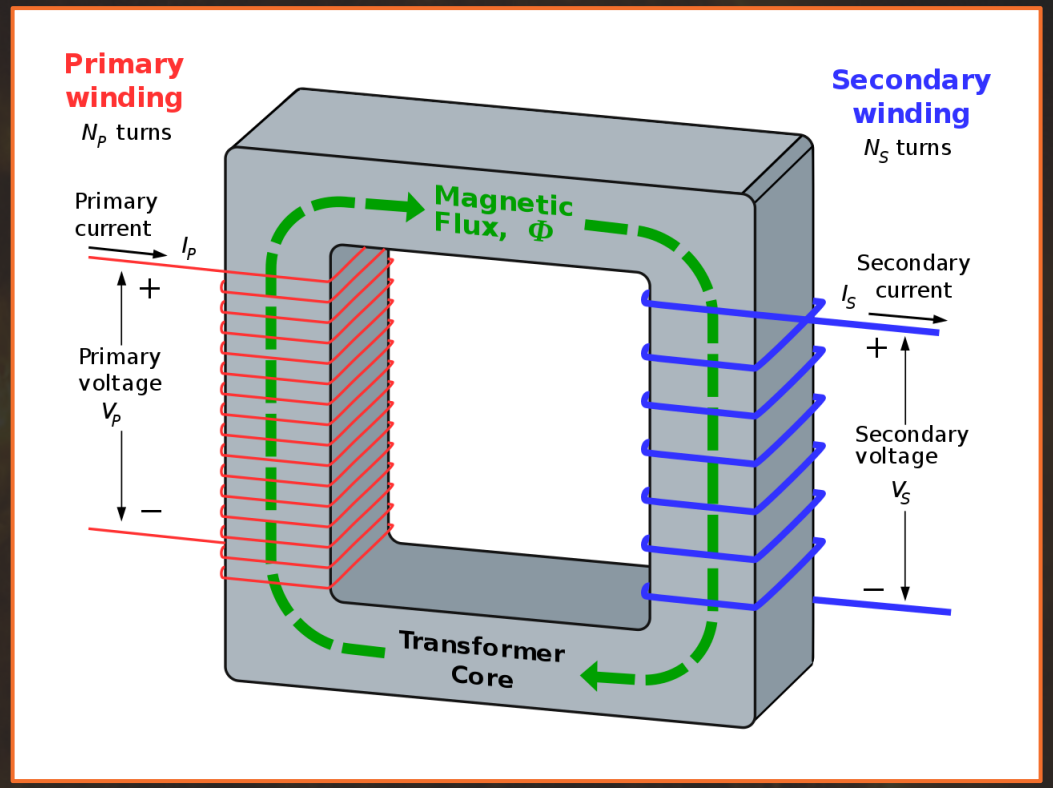
Een tegengesteld magnetisch veld is dus geïnduceert door de EMK: magnetische inductie

Hierdoor kan een wisselstroom in een spoel een wisselstroom in een andere spoel genereren, zonder dat de spoelen contact maken!

Transformators

- Bestaat uit twee spoelen
  - Primaire spoel
  - Secondaire spoel
  - Verschillend aantal windingen
  - Gebruikt magnetische inductie

- Ideale transformator
  - Geen verlies: $P_{coil1} = P_{coil2}$



Onthoud!

$$\text{Vermogen} = \text{Voltage} \times \text{Stroom}$$

$$P = V \times I$$

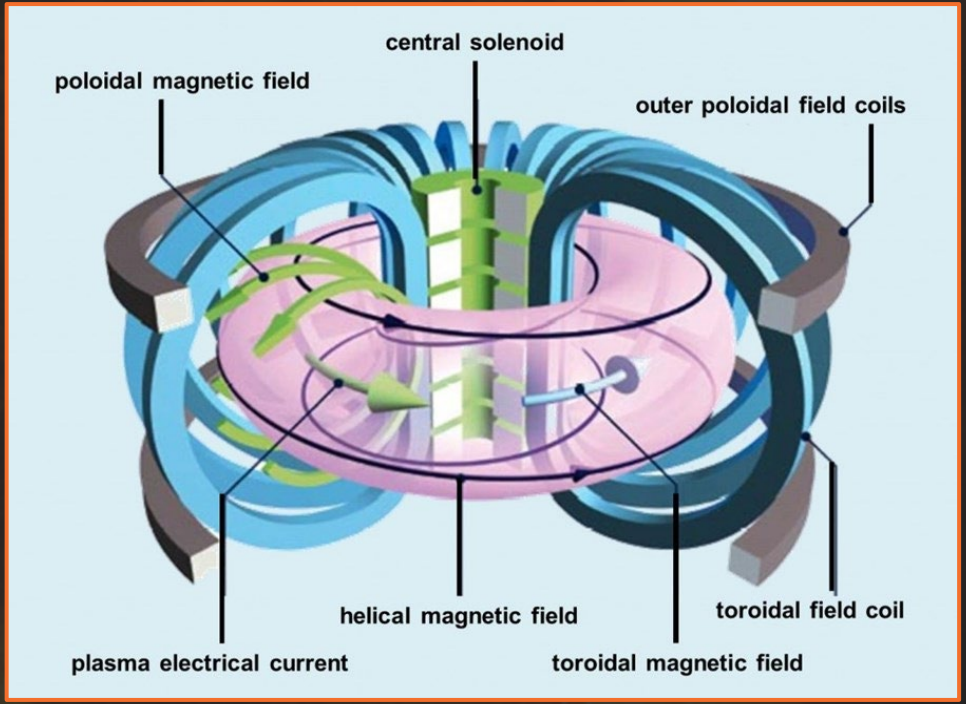
Credit: By BillC at the English-language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, https://tinyurl.com/ye55fpxv

Poloïdale-veld magneten

- Helpen met de positive, vorm en controle van het plasma
  - Nodig voor een stabiel plasma

- Niet gebruikt voor het sterke poloïdale magnetisch veld!

  (Centrale solenoïde creëert poloïdale veld door magnetisch inductie)



Credit: S. Li et al. https://tinyurl.com/4ybcpw65 (CC BY 4.0)

Klassikale opdracht 1.8

Het gebruik van magnetische inductie in een tokamak zorgt voor een groot nadeel: het maakt de tokamak een apparaat dat in pulsen werkt, i.p.v. continue.

a) Hoe zorgt magnetische inductie voor een gepulseerde werking?

b) Waarom is dit een probleem voor een fusiereactor?

Klassikale opdracht 1.8 – antwoorden

a) Inductie is afhankelijk van een veranderende magnetische flux. De flux kan niet blijven veranderen, de magneten bereiken een limiet van de stroom die zij kunnen dragen. De stroom moet dus op- en afgebouwd worden, in pulsen. De centrale solenoïde werkt dus in pulsen, en dus de tokamak in zijn geheel ook.

b) Ideaal zou een fusiereactor non-stop aan staan, voor continueë energieproductie.

Magnetische opsluiting

- Drukbalans in de tokamak
  - Uitwaartse druk: plasma
  - Inwaartse druk: magnetisch veld
    → Lorentz kracht!
  - Evenwicht!
  - Maakt fusie mogelijk op Aarde!

Meer leren over fusie?

Kijk eens naar de andere vier modules!

- Module 2: Weg naar Fusie
- Module 3: Plasma Controle
- Module 4: Fusie Materialen
- Module 5: Toepassing

- Of kijk onder “Verder lezen” in de student reader

Deze module is geschreven als onderdeel van de FuseNet educational materials voor middelbare scholen en kan worden gevonden in de FuseNet educational materials browser: https://fusenet.eu/education/materials

Voor meer informatie, zie https://fusenet.eu

Auteur: Sander Korteweg

Redacteur: Sjoukje Tijmensen-Hoekstra, Sander Korteweg

FuseNet
The European Fusion Education Network

This material has been created and distributed by FuseNet for educational purposes. This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.