

Modul 2

Vejen til fusion



Kapitel 1: Opdagelsen af fusion

- 1920'erne
 - Hvorfor er **Solen** ikke brændt ud endnu?
- Arthur Eddington
 - **Proton-proton-kæden**
 - Fire **protoner** fusionerer til en **helium-4**-kerne
 - Store mængder energi frigivet
- George Gamov
 - **Kvantemekanisk tunnelering**



Kilde: Library of Congress, Prints & Photographs Division, LC-B2- 6358-11.

Opgave 2.1

- a) Solen har en masse på omkring $1.989 \cdot 10^{30}$ kg. En proton har massen 1.007 amu. Antag, at Solen udelukkende består af protoner. Hvor mange protoner er der i Solen? Husk, at 1 amu er lig $1.661 \cdot 10^{-27}$ kg.
- b) P-P-kæden frigiver energien 26.73 MeV pr. heliumkerne produceret. Hvor meget energi frigives, hvis alle protonerne fra (a) i Solen fusionerer og bliver til heliumkerner? Husk, at 1 MeV er lig $1.602 \cdot 10^{-13}$ J.

Opgave 2.1

- c) Hvor lang tid kan Solen skinne, hvis den udsender stråling med den konstante effekt $3.828 * 10^{26}$ W?
- d) Astrofysikere forventer, at Solen kun vil være i stand til at fusionere 10% af sine protoner, før den vil gå til den næste fase i sin livscyklus. Hvorfor tror du, at Solen ikke vil være stand til at fusionere alle protonerne?
- e) Hvor lang tid tror du, at Solen faktisk kan skinne? Diskuter med personen ved siden af dig.

Opgave 2.1 – Løsning

$$\text{a) } N_{\text{proton}} = \frac{m_{\text{Sol}}}{m_{\text{proton}}}$$

Indsæt værdier $\rightarrow N_{\text{proton}} \approx 1.19 * 10^{57}$ protoner

$$\text{b) } E_{\text{Sol}} = \frac{N_{\text{proton}}}{4} \cdot E_{\text{fusion}}$$

Indsæt værdier $\rightarrow E_{\text{Sol}} \approx 1.28 * 10^{45}$ J

Opgave 2.1 – Løsning

c) $t_{\text{levetid}} = \frac{E_{\text{Sol}}}{P_{\text{Sol}}}$,

Indsæt værdier $\rightarrow t_{\text{levetid}} = 3.3 * 10^{18} \text{ s} = 1.1 * 10^{11} \text{ yr} - \text{ca. 110}$
milliarder år

d) Diskuter!

e) Diskuter!

Kapitel 1: Opdagelsen af fusion

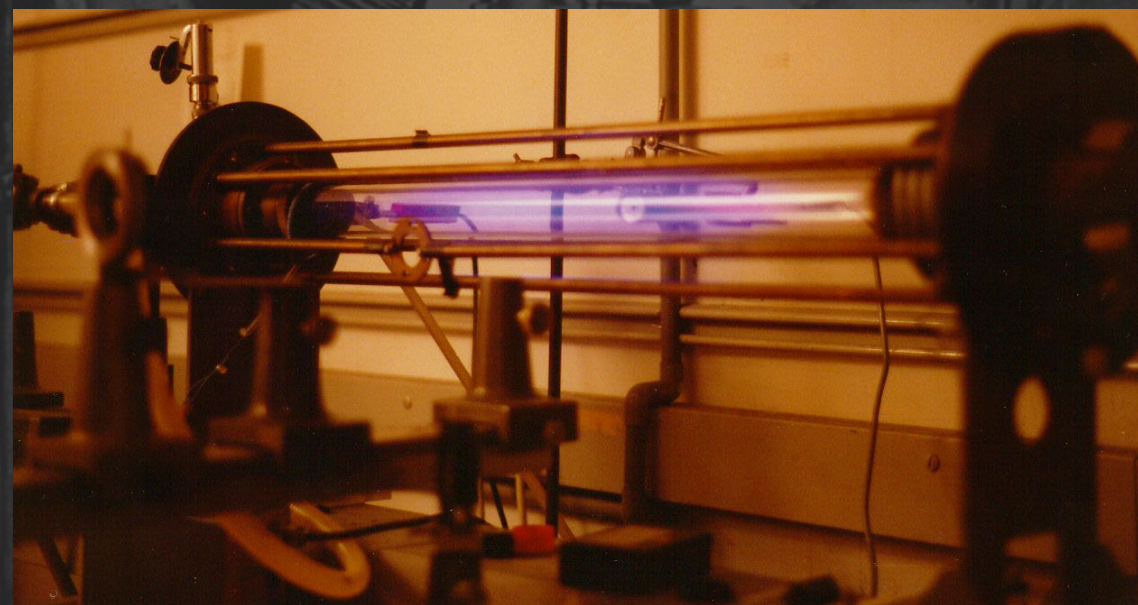
- 1930'erne
- Fusion på Jorden?
- Skyde partikler mod hinanden
- Mere sandsynligt at partikler **spredes** end **fusionerer**
- Behov for en maskine, der kan **indeslutte en lille stjerne**

Kapitel 2: De første maskiner

- 1950'erne og 1960'erne
- Ronald Richter
- Tre lande arbejdede især meget med fusion
 - Storbritannien (**pinch-maskiner**)
 - USA (**stellaratorer**)
 - Sovjetunionen (**tokamakker**)

2.1 Pinch-maskiner

- **Pinch-maskiner anvender:**
 - Lorentzkraften (fra magnetfelter)
 - Plasma
- **Grundlæggende princip**
 - Lorentzkraften sammenpresser plasmaet
 - Herved er fusion muligt
- **Typer af pinch-maskiner**
 - Z-pinch
 - Strøm i Z-retningen
 - θ -pinch
 - Strøm i θ -retningen



Kilde: Sandpiper, English Wikipedia;
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Z-pinch_H-gamma.jpg

Opgave 2.2

a) Hvilken kraft presser plasmaet sammen i pinch-maskiner?

b) For Z-pinch antag, at plasmastrømmen peger ind i papiret. Tegn så retningen af magnetfeltet fra plasmastrømmen. Tegn nu retningen af Lorentzkraften. Hvad er effekten af Lorentzkraften?

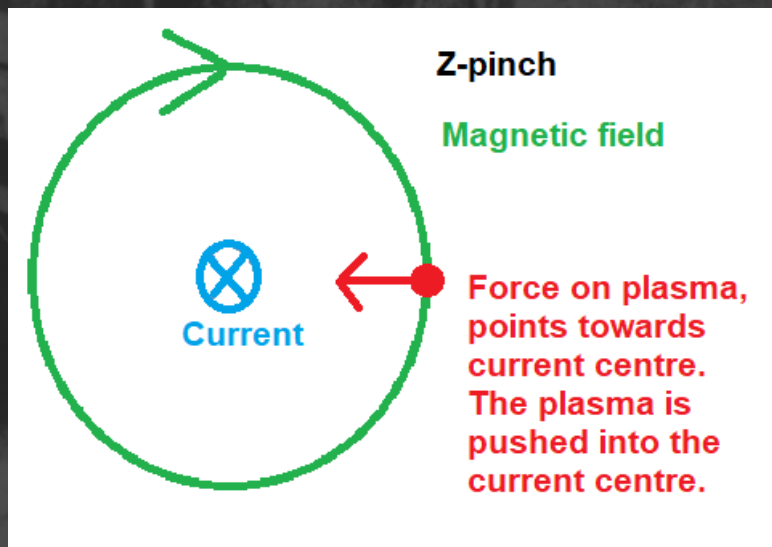
Opgave 2.2

- c) For θ -pinch skal man bruge et eksternt magnetfelt. Tegn en cirkel og en strøm, der løber mod urets retning. Hvilken retning skal det eksterne magnetfelt have, sådan at Lorentzkraften peger indad? Hvilken retning har magnetfeltet fra den cirkulære plasmastrøm? Hvad siger det om styrken af det eksterne magnetfelt?

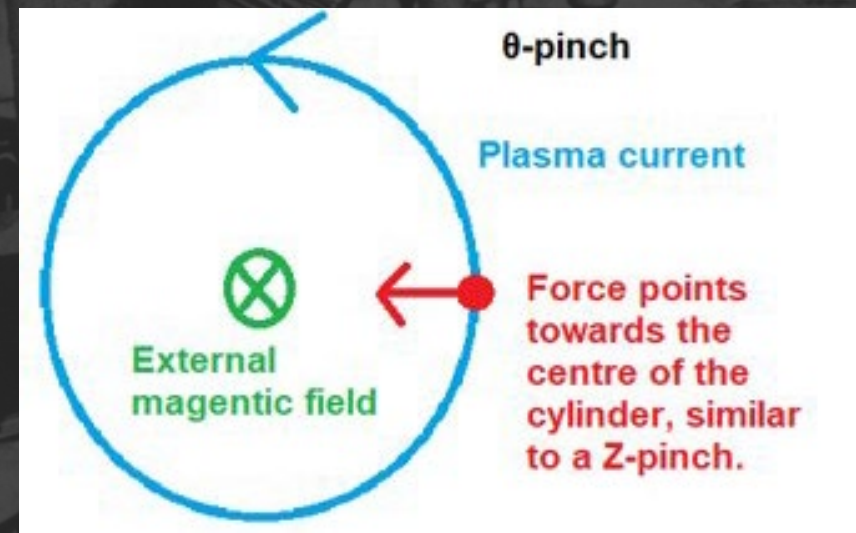
Opgave 2.2 – Løsning

a) Hvilken kraft presser plasmaet sammen i pinch-maskiner?

Lorentzkraften



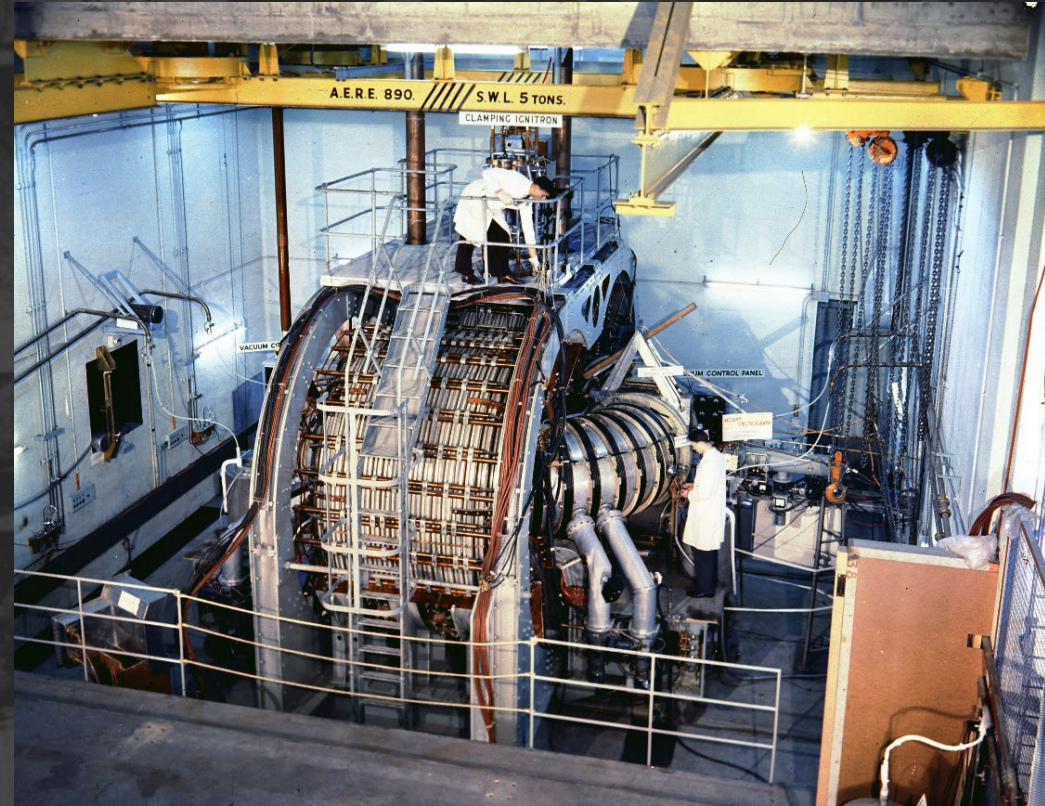
b)



c)

2.1 Pinch-maskiner

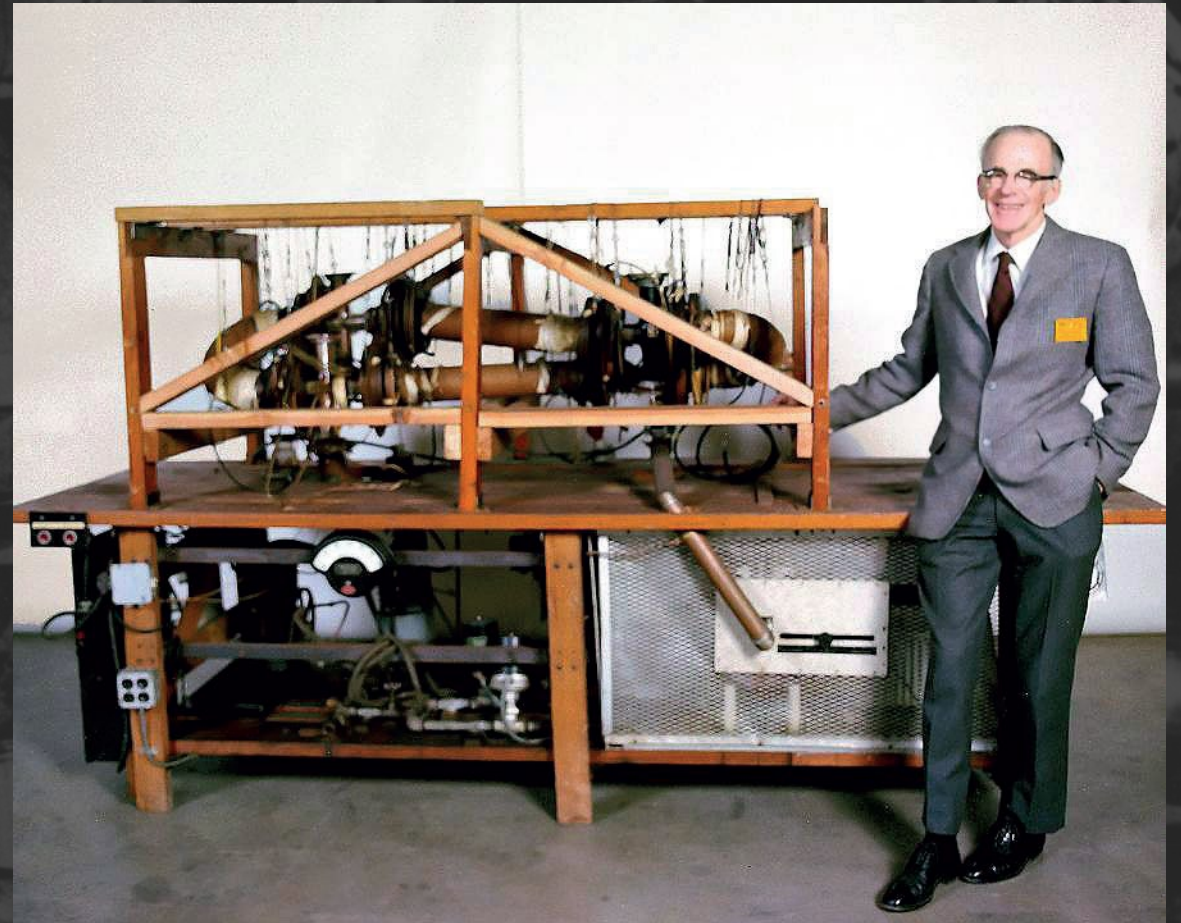
- Den kolde krig
- 1956 Sovjetisk fusionsforedrag
- Deling af viden om fusion
- Scylla
- ZETA



Kilde: Ukendt UKAEA fotograf - Nick Holloway, Media Manager, Communications Team, United Kingdom Atomic Energy Authority

2.2 Stellaratorer

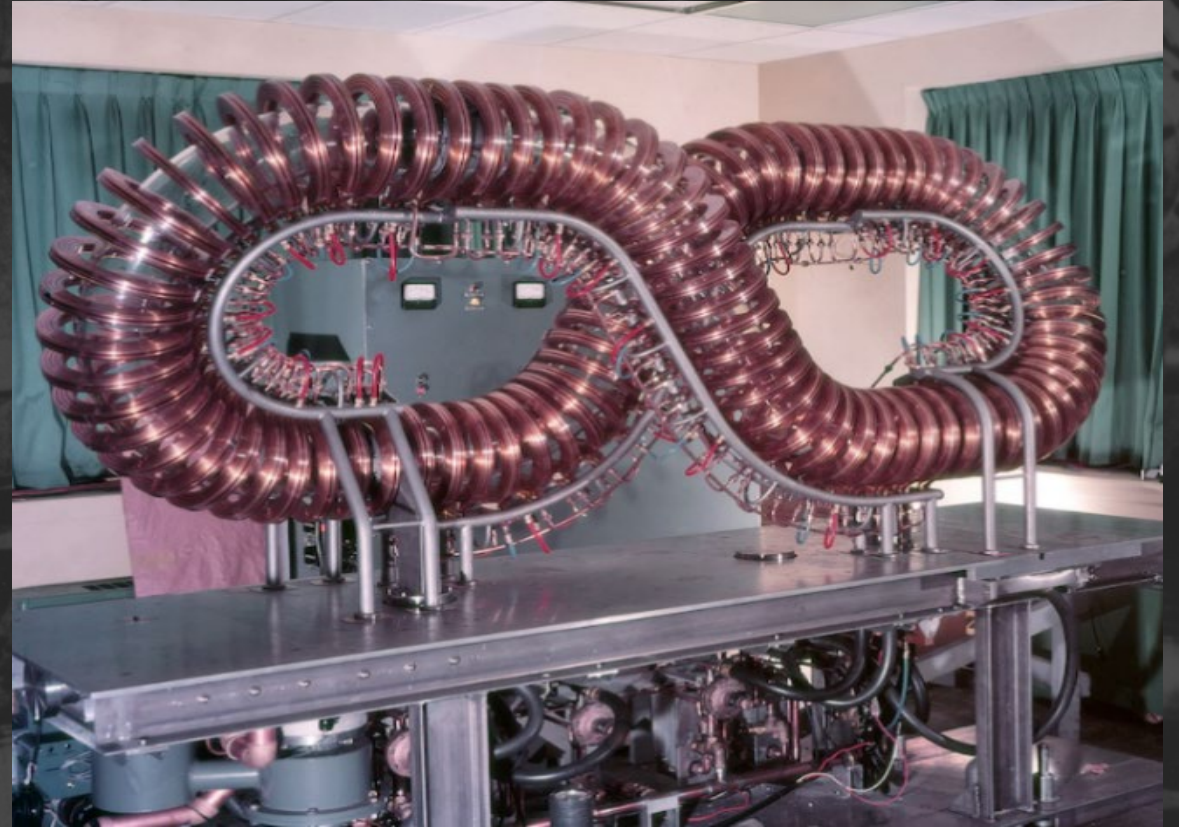
- Lyman Spitzer
- **Partikeldrift**
- Lad driften modvirke sig selv
- **Formen** af maskinen, spolerne (magnetfelterne)



Kilde: Ukendt fotograf, <https://www.pppl.gov/about/history/timeline>

2.2 Stellaratorer

- Model A
- Model B
- 'Pump out'
- Model C
- 4.6 millioner grader
- Bohm-diffusion



Kilde: Ukendt fotograf, <https://lynceans.org/wp-content/uploads/2017/08/1958-stellarator-model.png>

2.3 Tokamakker

- Igor Tamm (venstre) og Andrei Sakharov (højre)
- **Strøm** inde i plasmaet
- **Magnetisk induktion**



Kilde, Igor Tamm: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1958/tamm/biographical/>

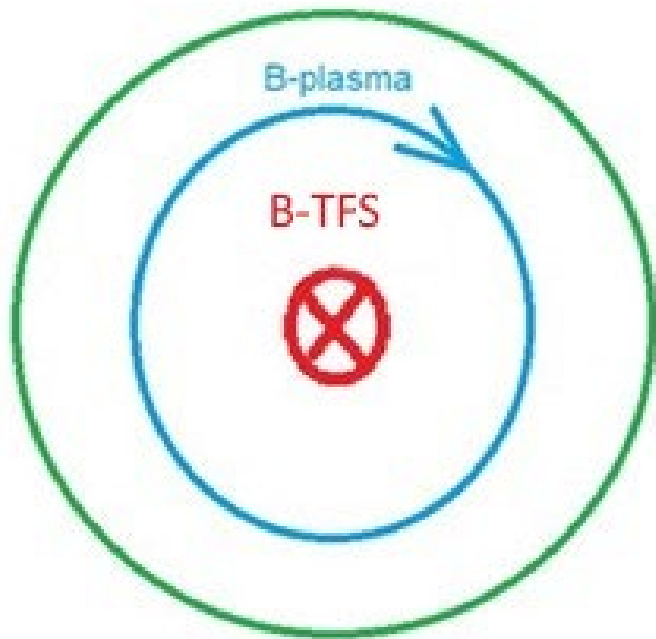
Kilde, Andrei Sakharov:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/RIAN_archive_25981_Academician_Sakharov.jpg

Opgave 2.3

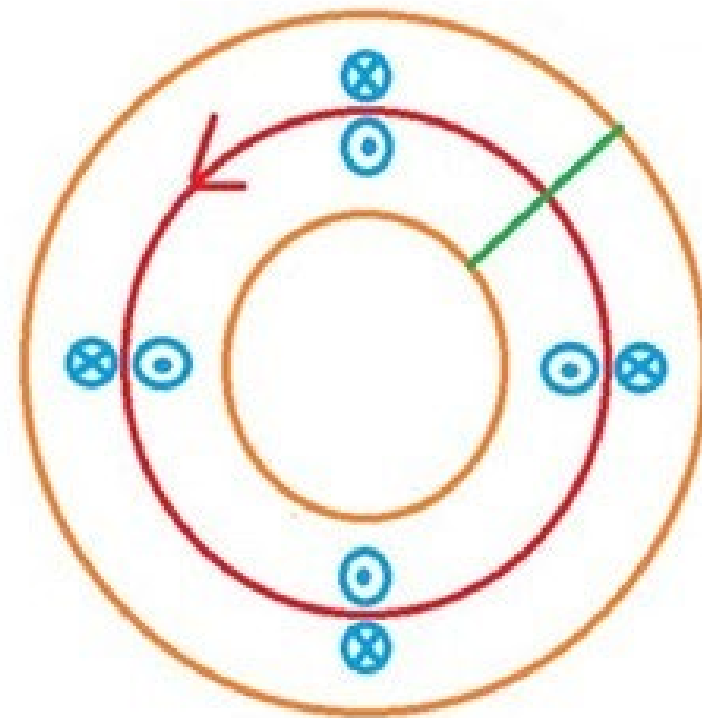
- a) Tegn retningen af magnetfeltet fra de toroidale feltspoler (TFS) i et poloidalt tværsnit. Tegn også retningen af magnetfeltet fra plasmastrømmen i samme tegning.
- b) Gør nu det samme for et toroidalt tværsnit.

Opgave 2.3 – Løsning

Poloidal cross section

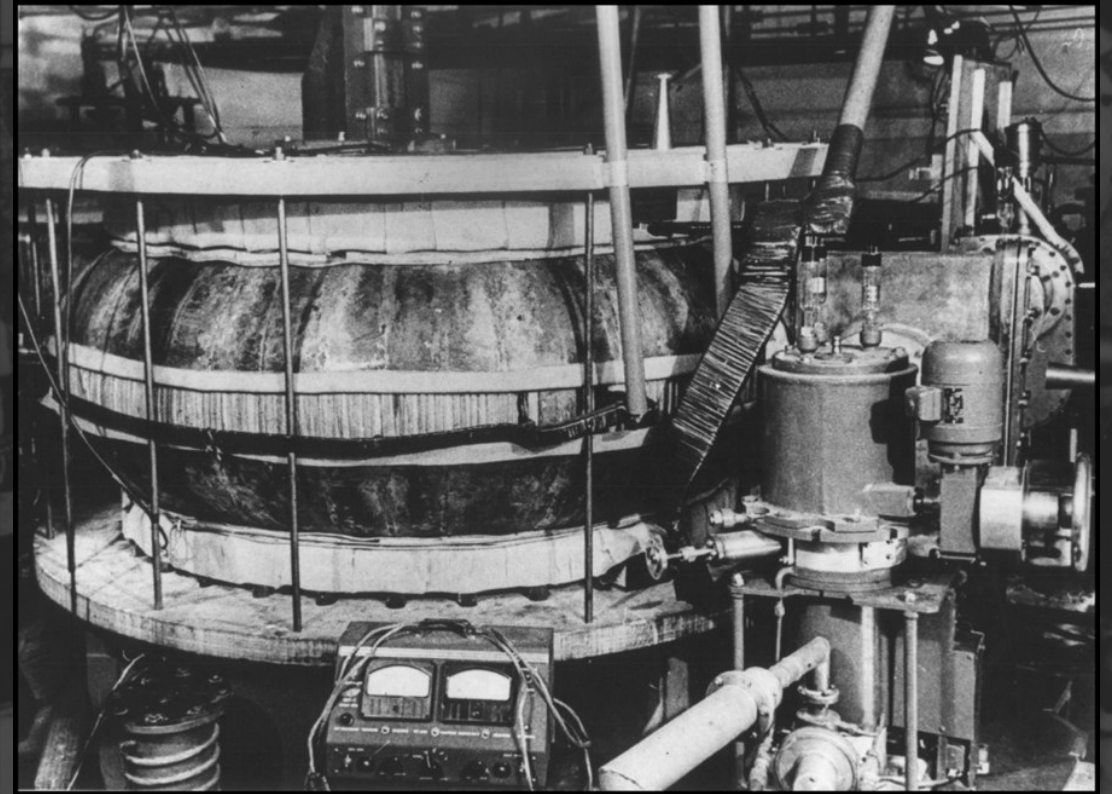


Toroidal cross section



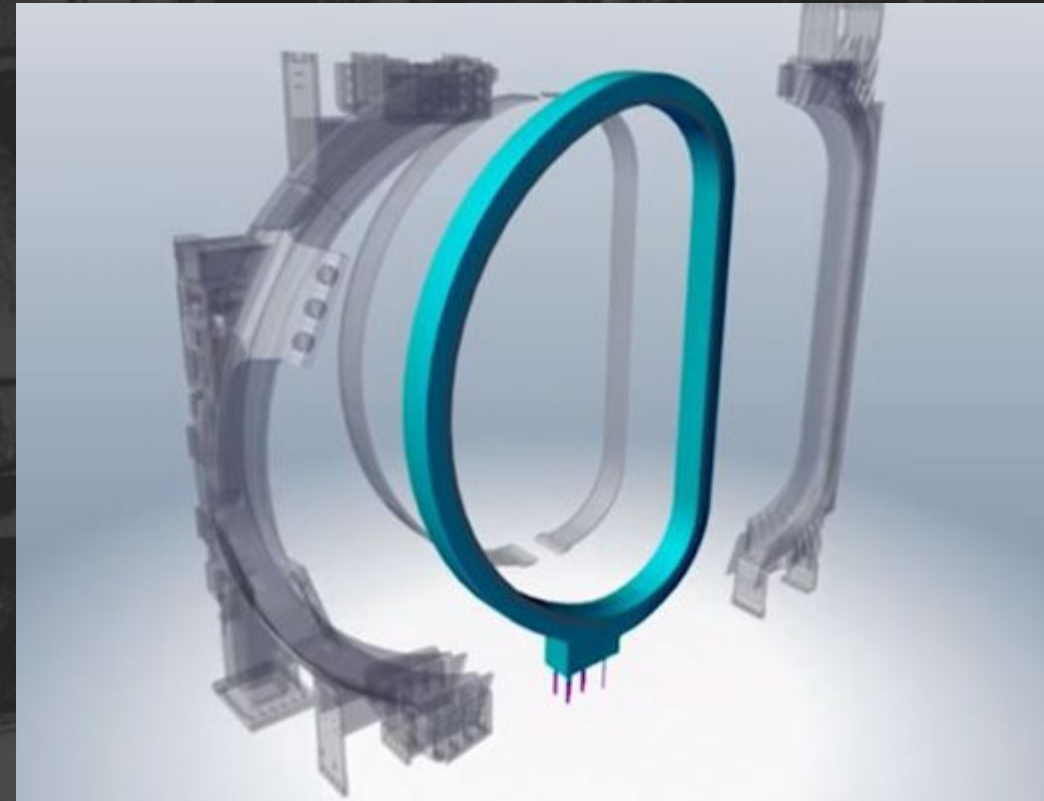
2.3 Tokamakker

- T-1 og T-2
- Natan Yavlinsky
- T-3
- Temperatur 10 gange højere
- The Culham Five
- Tokamak-optimisme



Kapitel 3: Gennembrud og nedbrud

- Princeton Large Torus (PLT)
- **Energikrisen 1973**
 - Investering i fusion
- **Superledende** magneter
- **D-formede toroidale feltspoler**



Kapitel 3: Gennembrud og nedbrud

- Volumen vs. overfladeareal
- Videnskabeligt break-even $Q=1$
- Større maskiner
 - TFTR (USA)
 - JT-60 (Japan)
 - JET (Europa)
 - T-15 (Sovjetunionen)
- Nye **instabiliteter**

Opgave 2.4

En stor forskel mellem stellaratorer og tokamakker er, hvor lang tid de kan køre ad gangen. Moderne stellaratorer kan opretholde et plasma i op til 30 minutter. Tokamakker er derimod begrænset af deres **pulsvarighed** t_{puls} (husk, tokamakker er pulseret pga. den centrale solenoide):

$$t_{\text{puls}} = \frac{\Psi - L_p I_p}{V_{\text{loop}}}$$

Her er Ψ den tilgængelige magnetiske flux, L_p er induktansen af plasmaet (hvor kraftigt det reagerer på magnetfelter), I_p er den nødvendige strømstyrke af plasmastrømmen og V_{loop} er den påkrævede spændingsforskel for at drive plasmastrømmen. For ITER er værdierne af disse givet nedenfor. Hvor lang tid varer ITER's pulser?

$$\Psi = 250 \text{ Vs}, \quad L_p = 12.5 \mu\text{Vs/A}, \quad I_p = 16 \text{ MA}, \quad V_{\text{loop}} = 0.1 \text{ V}$$

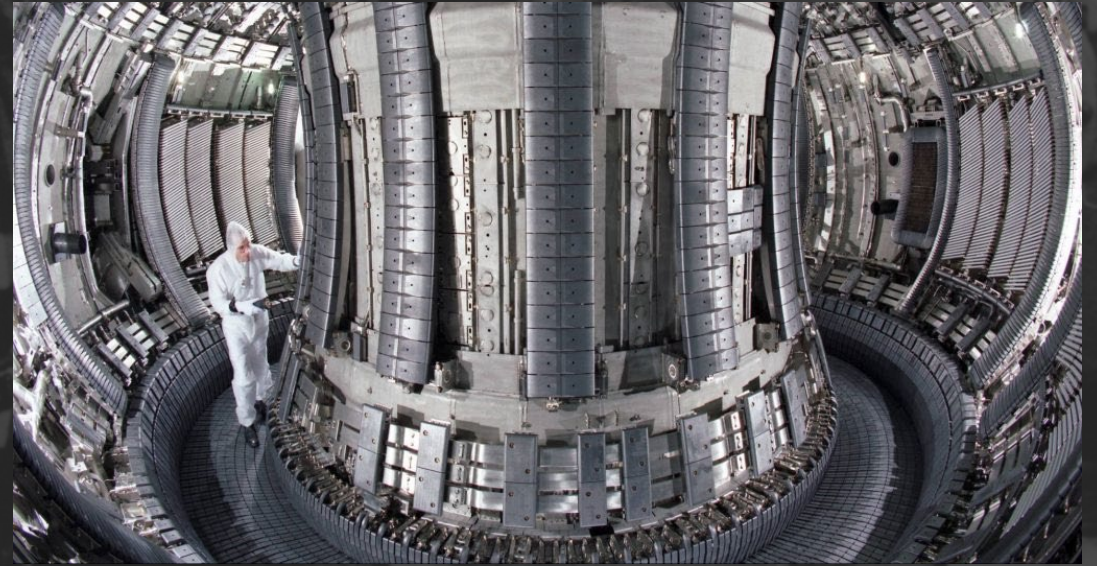
Opgave 2.4 – Løsning

- Indsæt værdier $\rightarrow t_{\text{puls}} = 500 \text{ s}$. Det er lige over 8 minutter. Meget kortere tid end hvad moderne stellaratorer kan køre i ad gangen.

Kapitel 3: Gennembrud og nedbrud

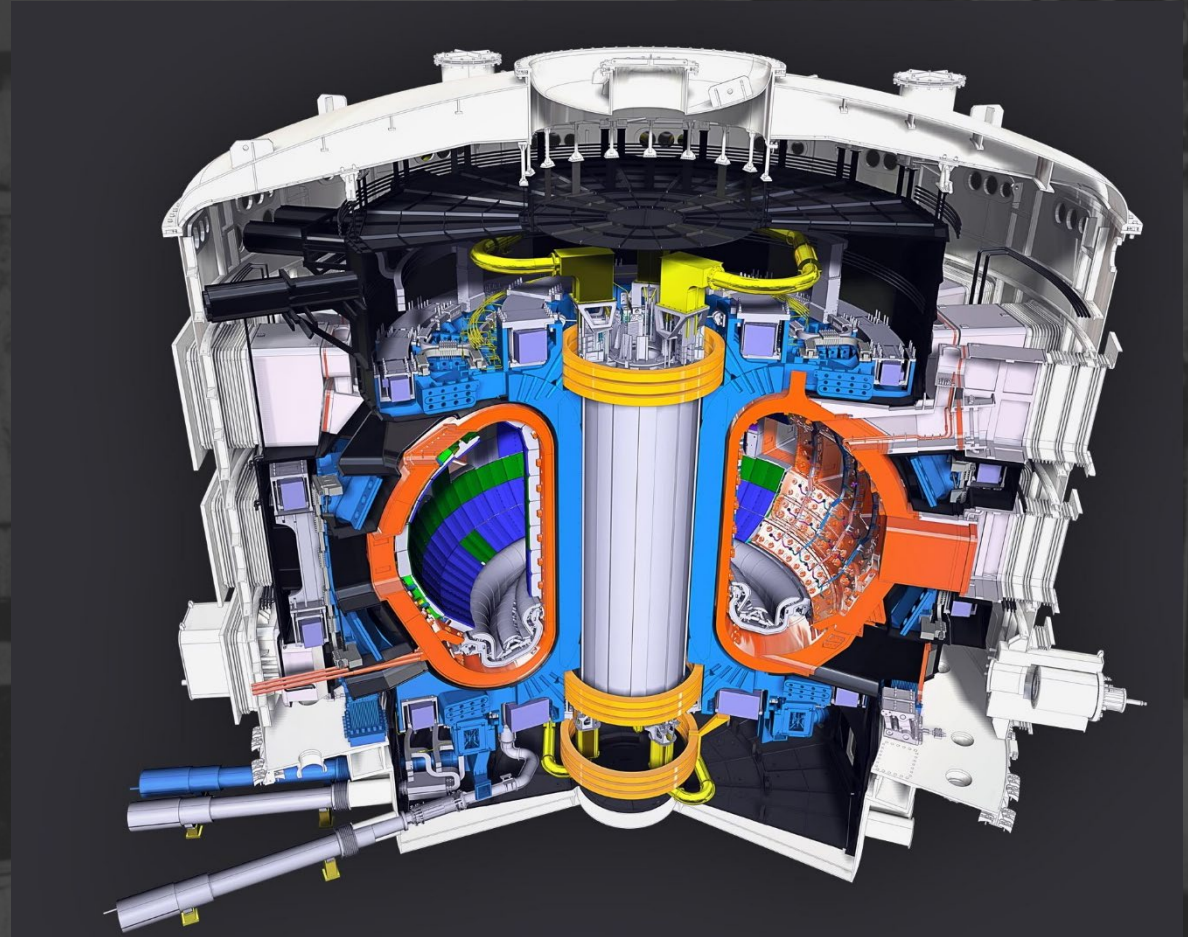
Nye verdensrekorder blev sat

- 522 millioner grader (JT-60)
- 16 MW fusionseffekt (JET)
- $Q = 0.67$ (JET)
 - Bl.a. grundet **alfapartikel-opvarmning**
- SPARC



Kapitel 4: ITER

- 35 lande
- Verdens **største** **plasmafysik-eksperiment**



Kilde: <https://www.iter.org/mach/Tokamak>

Opgave 2.5

ITER er et godt eksempel på fordelene og ulemperne, når mange parter arbejder med det samme projekt. Diskuter følgende i små grupper:

- a. Hvad forventer I er fordelene?
- b. Hvad forventer I er ulemperne?

4.1 ITER's historie

- INTOR
 - Europa, Japan, USA, Sovjetunionen
- Den kolde krig
- 1985 Genevekonferencen
- **ITER**, internationalt projekt
- Kina, Sydkorea og Indien



Source: White House Photographic Office,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Reagan_and_Gorbachev_signing.jpg

Opgave 2.6

Vi har tidligere nævnt, at ITER er en stor maskine – men hvor stor? På ITER's hjemmeside kan man finde meget brugbar og interessant information. Besøg <https://www.iter.org/factsfigures>. Her kan du se, at inde i ITER, i kammeret hvor plasmaet befinder sig, kan der være 840 m^3 . Hvor stort er dette volumen egentlig?

- Et menneske fylder ca. 65 liter. Hvor mange mennesker kan der være i ITER?
- En elefant fylder ca. 5 m^3 . Hvor mange elefanter kan der være i ITER?

Opgave 2.6 – Løsning

- a. Der kan være ≈ 12923 mennesker i ITER
- b. Der kan være ≈ 168 elefanter i ITER

4.1 ITER's historie

- Lokation: Cadarache (Frankrig, tæt på Marseille)
- Estimeret omkostning: 22 milliarder euros
- Første plasma i ITER: 2025
- **D-T plasma**-eksperimenter: 2035-2050
- Forsinkelser, opdateret tidsplan i starten af 2024

Opgave 2.7

Man passerede en anden vigtig milepæl i 2012. Det år blev ITER godkendt til at fungere som en 'Basic Nuclear Installation' (løst oversat: En "basal atomreaktor"). Reaktionsprodukterne af D-T-reaktionen er helium-4 og en neutron. Ingen af disse er radioaktive.

Hvorfor skulle ITER så godkendes ligesom fissionskraftværker, hvor radioaktivt affald er et problem?

4.2 ITER's mål

- $Q=10$
- Undersøge **hvordan alfapartiklerne påvirker plasmaets opførsel**
- Teste materialerne i bestemte komponenter (divertor, first wall og tritium breeding blanket)
- Vise at **fusion er en praktisk mulig energikilde**

Opsummering

- Kapitel 1: Fusion som Solens energikilde
 - Kapitel 2: Pinch-maskiner, stellaratorer og tokamakker
 - Kapitel 3: Forbedringer og nye problemer
 - Kapitel 4: Internationalt samarbejde og ITER
-
- Samlet set: Forskning og videnskab er påvirket af eksterne faktorer såsom politik og investering

Dette modul er skrevet som en del af FuseNets undervisningsmateriale til gymnasieelever og kan findes på FuseNets hjemmeside:

<https://fusenet.eu/education/materials>

For mere information se <https://fusenet.eu>

Skabt af: Sander Korteweg

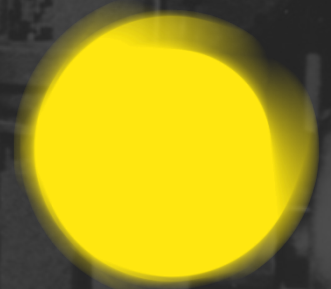
Redaktører: Sjoukje Tijmensen-Hoekstra, Sander Korteweg

Oversat af: Mads Mentz-Jørgensen via 'Fusionsenergi til Alle'-projektet



FuseNet

The European Fusion Education Network



**FUSIONS
ENERGI.DK**

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.

