

# Plasmafysik og Fusionsenergi

Jens Juul Rasmussen, Alexander S. Christensen

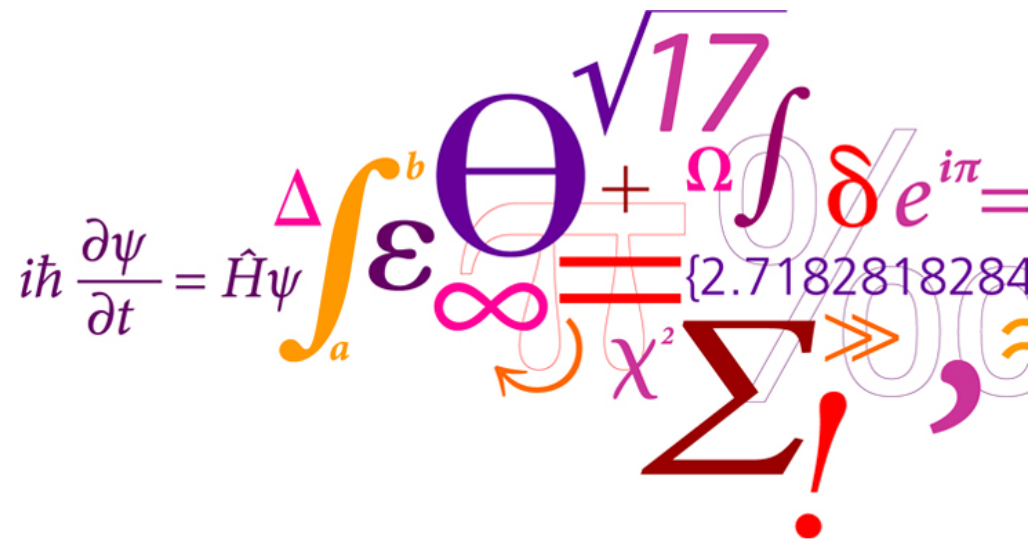
Plasmafysik og Fusionsenergi, PPFE

Institut for Fysik

Danmarks Tekniske Universitet

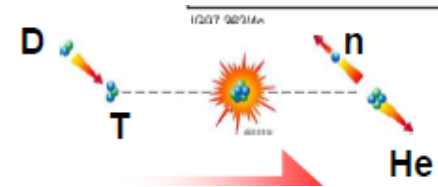
Kgs. Lyngby

[jjra@fysik.dtu.dk](mailto:jjra@fysik.dtu.dk)



# Fusionsenergi – kerneenergi - "atomkraft"

Sammensmeltning af lette atomkerner



Meget høj energitæthed:

$10^6$  ton olie : 0.14 ton Deuterium (tungt brint) og Tritium (supertungt brint)

En "ubegrænset" energikilde

Ingen drivhusgasser

"Kortlivet" radioaktivitet – 100 år

Med det nuværende energiforbrug rækker fusionsenergien til mere end **1.000.000.000 år**

**VEDVARENDE ENERGIKILDE**

**Fusionsenergi – forventet første kraftværk omkring 2050**

# Plan

Baggrund – energi forbrug

Hvad er fusion

Plasma - definitioner og egenskaber

Plasma og fusions roadshow

Energiproduktion

Hvordan kan vi realisere fusionsenergi

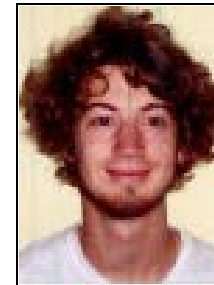
Road-map til fusionsenergi

Fusionsforskning i Danmark

# Fusionsenergi roadshow



**Søren Bang  
Korsholm**



**Asger Schou  
Jacobsen**



**Alexander Simon  
Christensen**

# 1. Energiforbrug

I år 2013 brugte Danmark  $763 \times 10^{15}$  J/år = 24.2 GW  
Dvs. at en dansker bruger = 4.31 kW

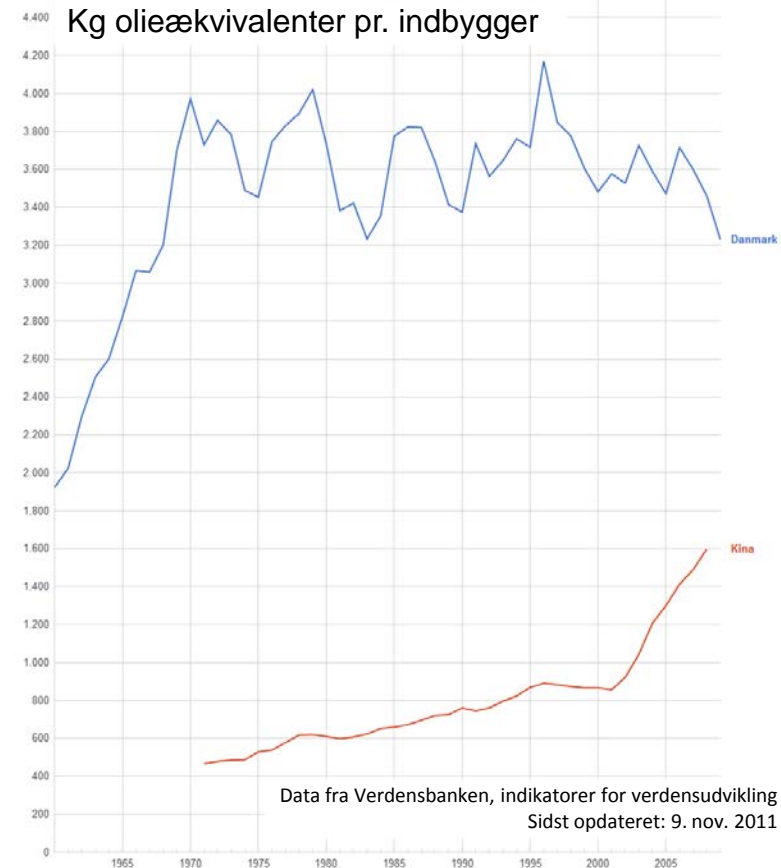


# 1. Energiforbrug

I år 2013 brugte Danmark  $763 \times 10^{15}$  J/år = 24.2 GW  
Dvs. at en dansker bruger = 4.31 kW

En kineser bruger ~ 1.5 kW (2004)  
~ 2.3 kW (2009)

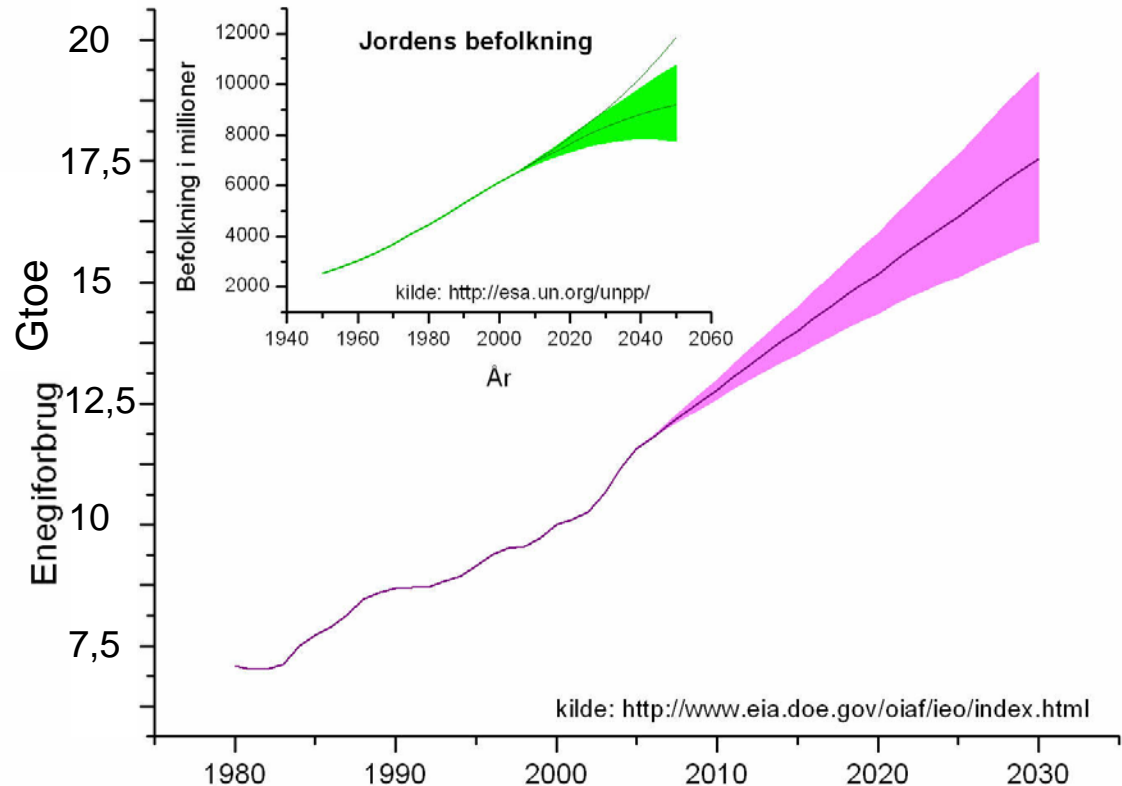
Og Kina åbnede et nyt kraftværk  
hver anden uge (2006)  
hver uge (2007)  
hver fjerde dag (2008)



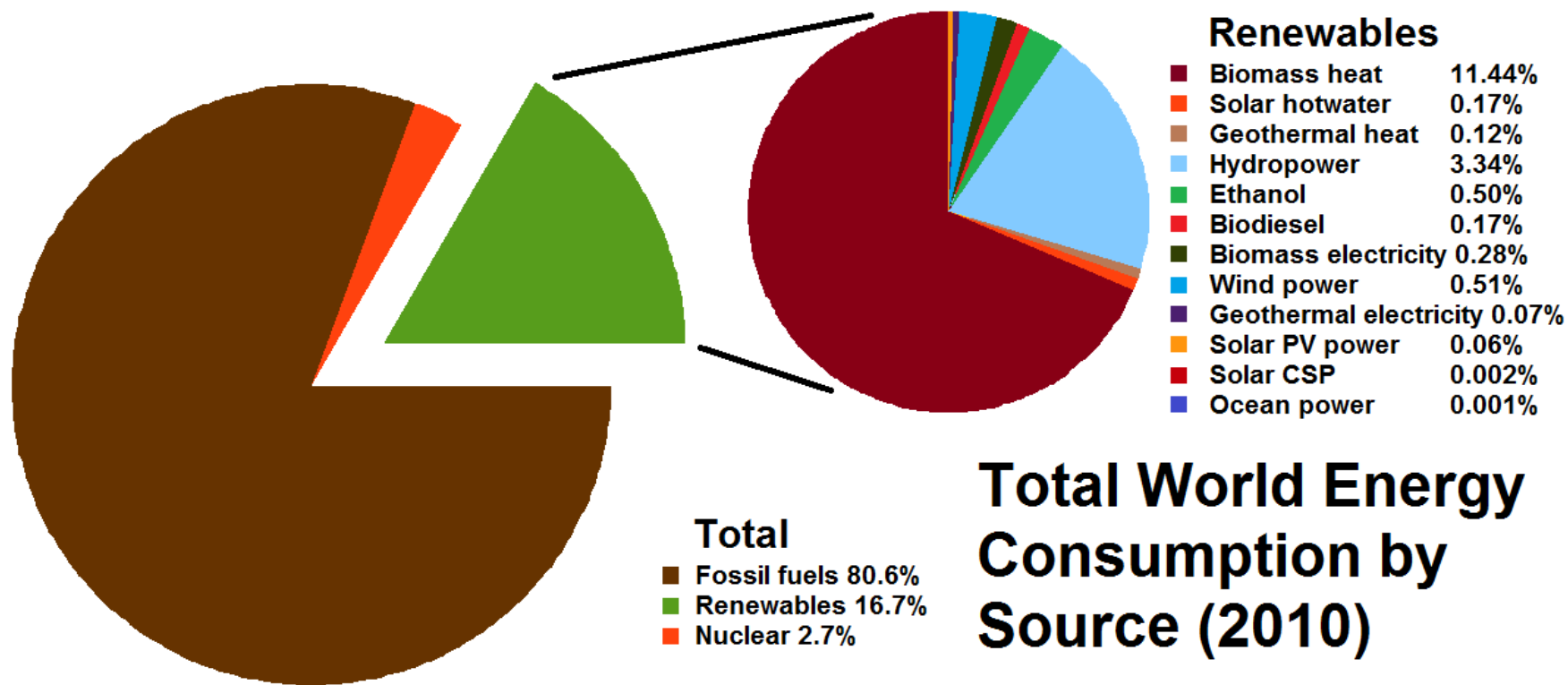
# Menneskehedens energiforbrug

- Vi er ca. 7 milliarder mennesker på Jorden
- Tilsammen bruger vi svarende til ca. 12 mia. ton olie om året.
- Forbruget er voksende fordi:
  - Indbyggerantallet vokser
  - Gennemsnitsforbruget pr person vokser.

## Verdens energiforbrug



# Globale energikilder 2010





# Alternative energikilder uden netto CO<sub>2</sub>-udledning

*solenergi*



*vindenergi*



*vandkraft*



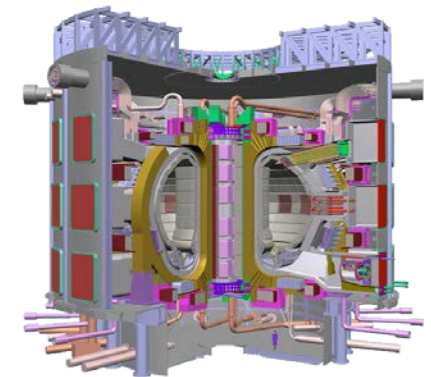
*biomasse*



*fission/A-kraft*



*fusion*



# Fremtidige energiforsyning

- Behov for flerstrengnet, fleksibel energiforsyning

## Et energimix

- **IEA:** Verden må investere 10 mia. kr/dag i energiteknologier de næste 30 år (1% af global BNP) (Verden bruger energi for ca. 60 mia. kr/dag)
- **IEA:** 2035 – vedvarende energikilder vil dække 20% af forbruget; **men** forbruget er vokset med 50-60% så anvendelsen af fossile kilder og evt. atomkraft må også øges!
- **Fusionsenergi** kan yde et væsentligt bidrag; men skal udvikles nu for at kunne bidrage væsentligt i sidste halvdel af dette århundrede.

# Fusionsenergi

Kerneenergi som fremkommer ved sammensmeltning  
– fusion - af lette atomer – Brint-, Helium-isotoper ...

# Fusion er en universel energikilde...

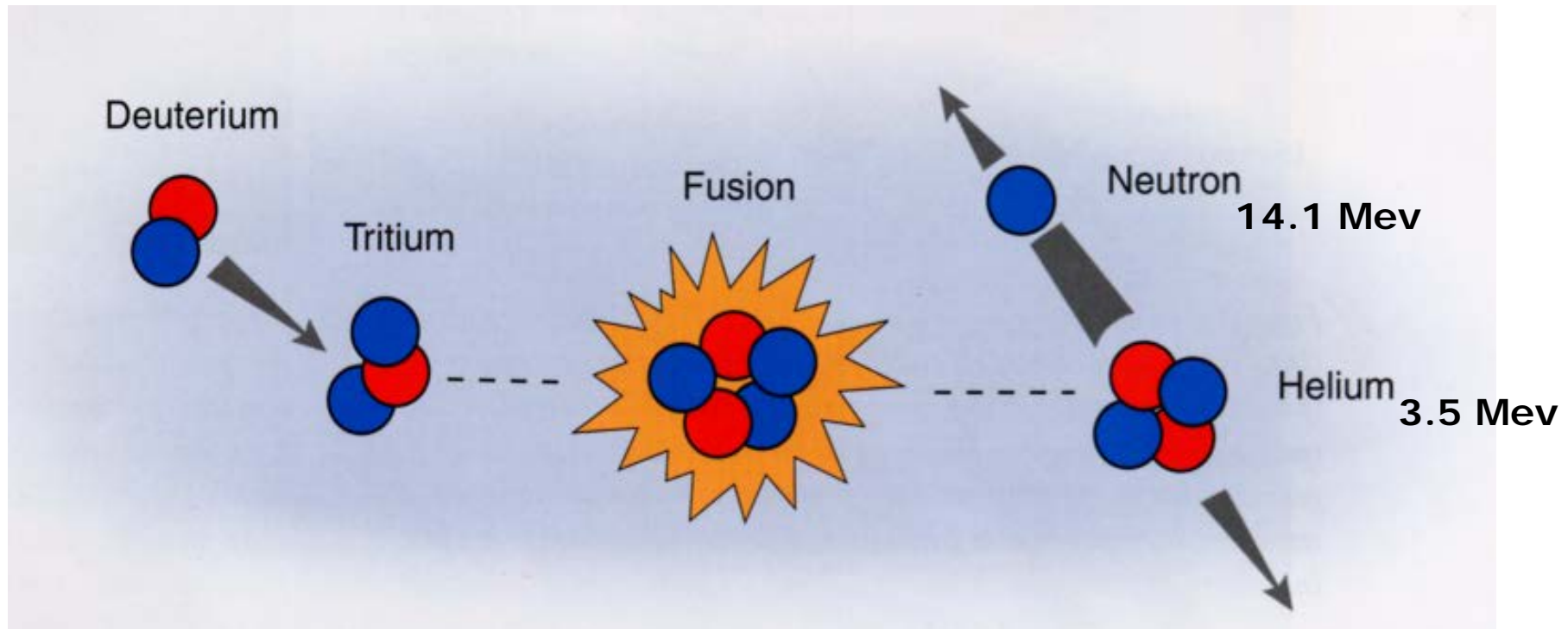
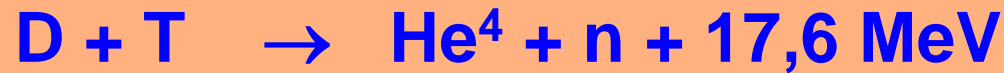
Solens og stjernernes energi kommer fra fusion af brintkerner – protoner.

Solen producerer hele tiden energi med en total effekt på  $3.6 \cdot 10^{17}$  GW!!!??  
Hvert sekund omdannes 4.000.000 tons af solens masse til energi!

... som vi gerne vil udnytte direkte på jorden

# Fusion på jorden

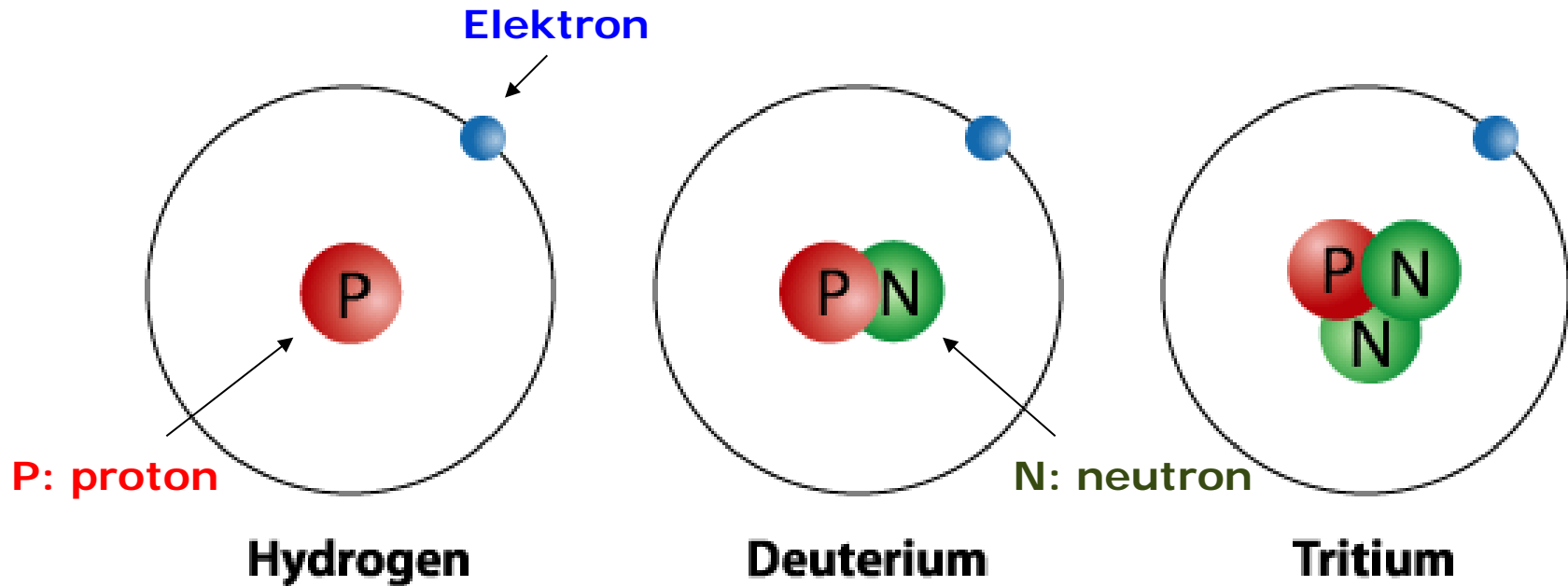
Den fusionsproces, der forløber lettest, er:



3.52 MeV pr nucleon  $\rightarrow$   $338 \times 10^6$  MJ/kg (1 eV =  $1.602 \times 10^{-19}$  J)

Fossile brændstoffer, f.eks. benzin: 47.2 MJ/kg og kul: 24 MJ/kg

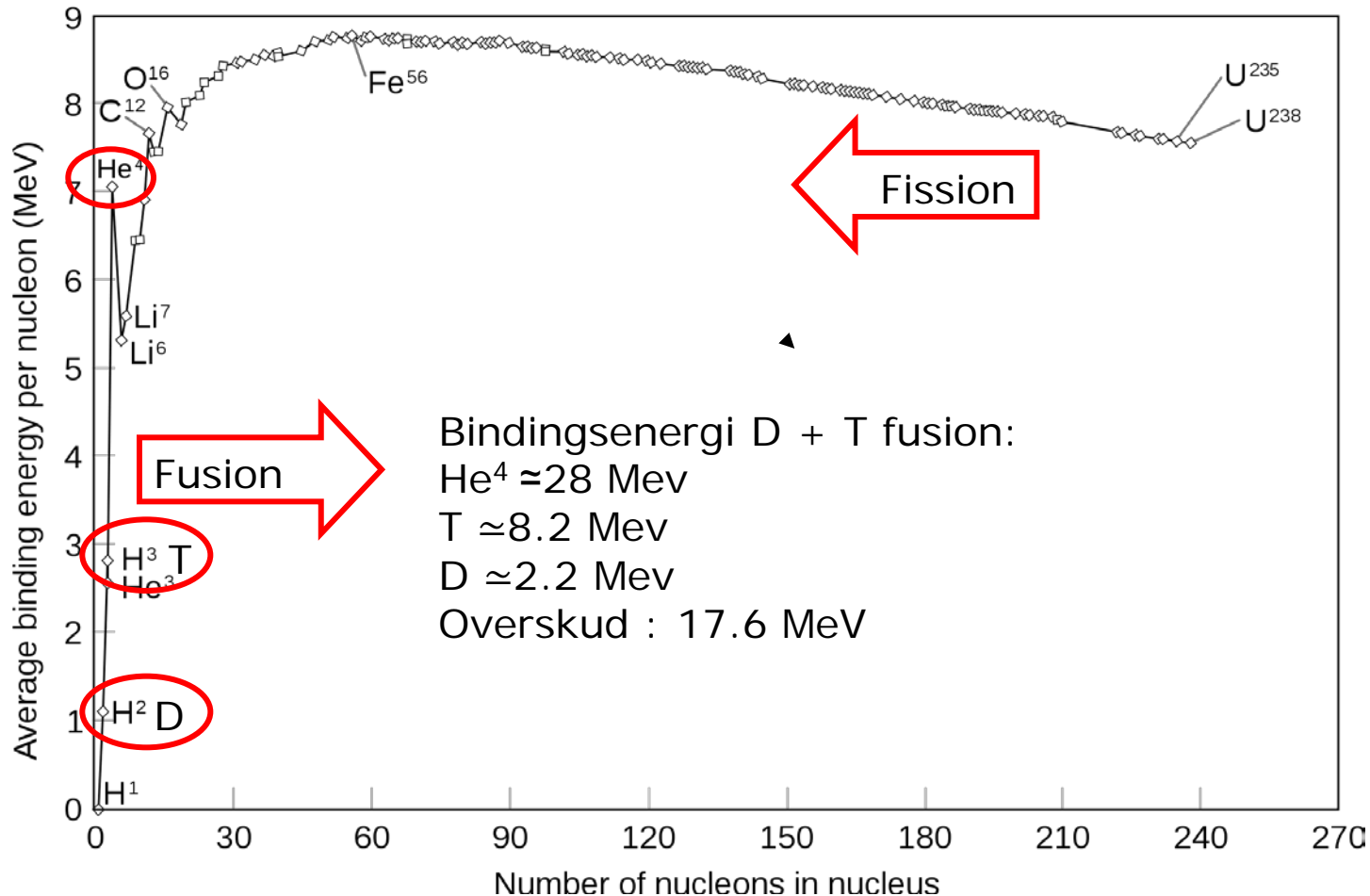
# Hydrogen – brint - isotoper



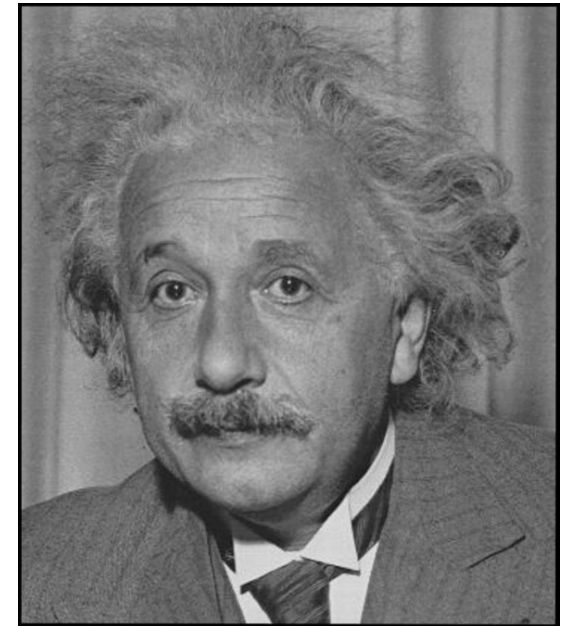
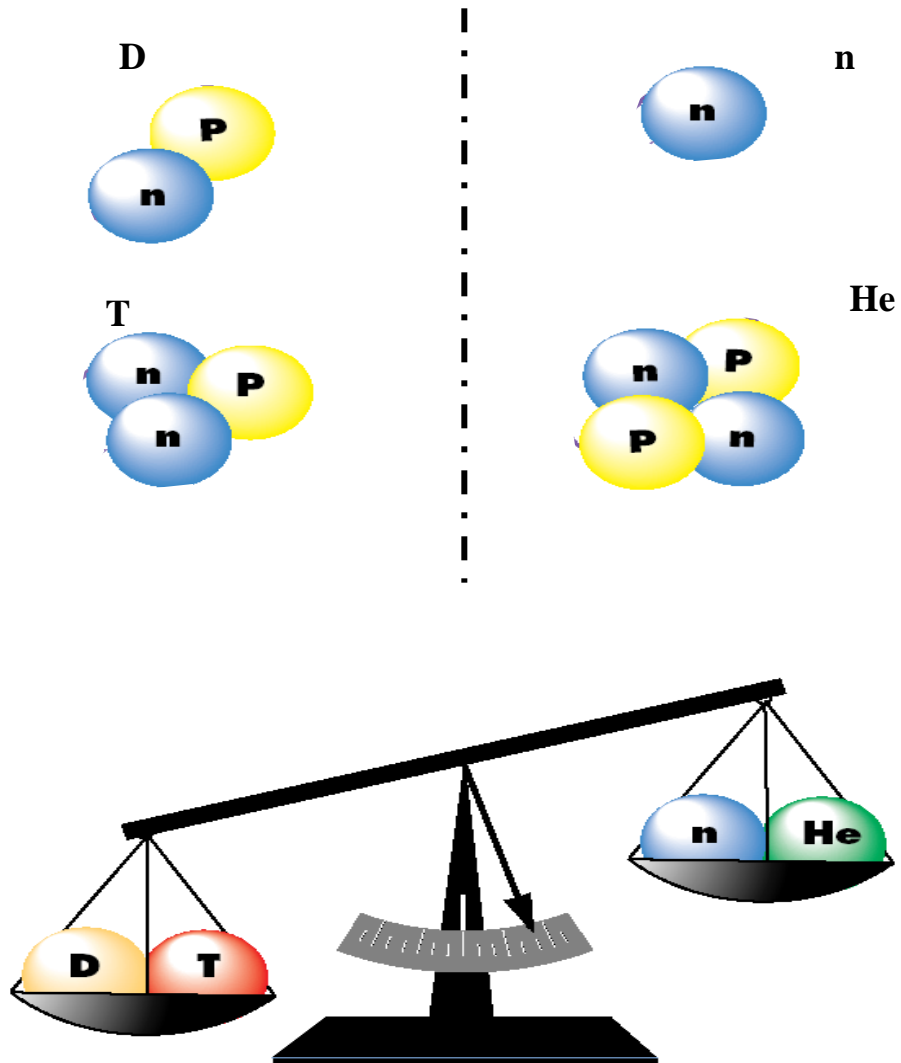
**Protoner og Neutroner = Nukleoner**

# Bindingsenergi pr nucleon

Energien der medgår til at spalte en kerne med givet massetal i frie nucleoner – protoner og neutroner



# Masse $\Rightarrow$ Energi



$$E = m c^2$$



# Energi fra fusion

- 15 g deuterium (udvundet af 500 L havvand) og 23 g tritium (udvundet af 46 g litium – 65 g/ton jord) er nok til en livslang energiforsyning for en dansker
- Fusionsenergien i D-indholdet i 1 L vand = brændværdien i 300 L olie
- Et 1 GW<sub>e</sub> kraftværk skal årligt have tilført:
  - 2.700.000 tons kul
  - 1.900.000 tons olie
  - ¼ tons D+T (450 kg D+Li)



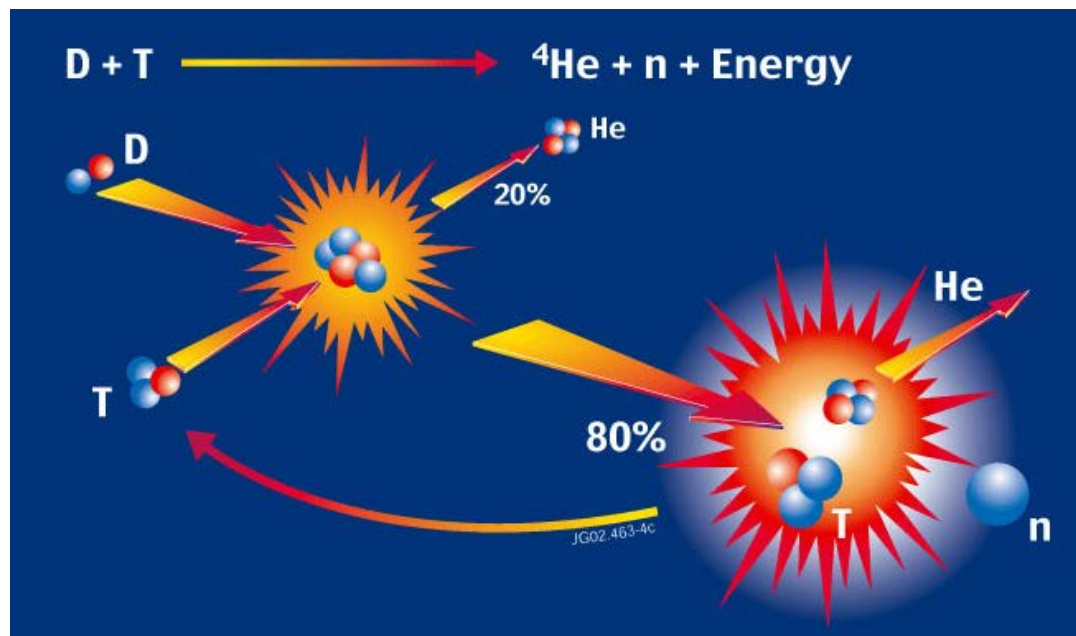
Med det nuværende energiforbrug rækker fusionsenergien til mere end **1.000.000.000 år**

# Produktion af tritium

- Tritium er radioaktivt med henfaldstid på 12,6 år
- Produceres på fusionskraftværket fra  ${}^6\text{Li}$  og  ${}^7\text{Li}$

**Deuterium + Tritium** → **Neutron + Helium**

**Litium + Neutron** → **Tritium + Helium**

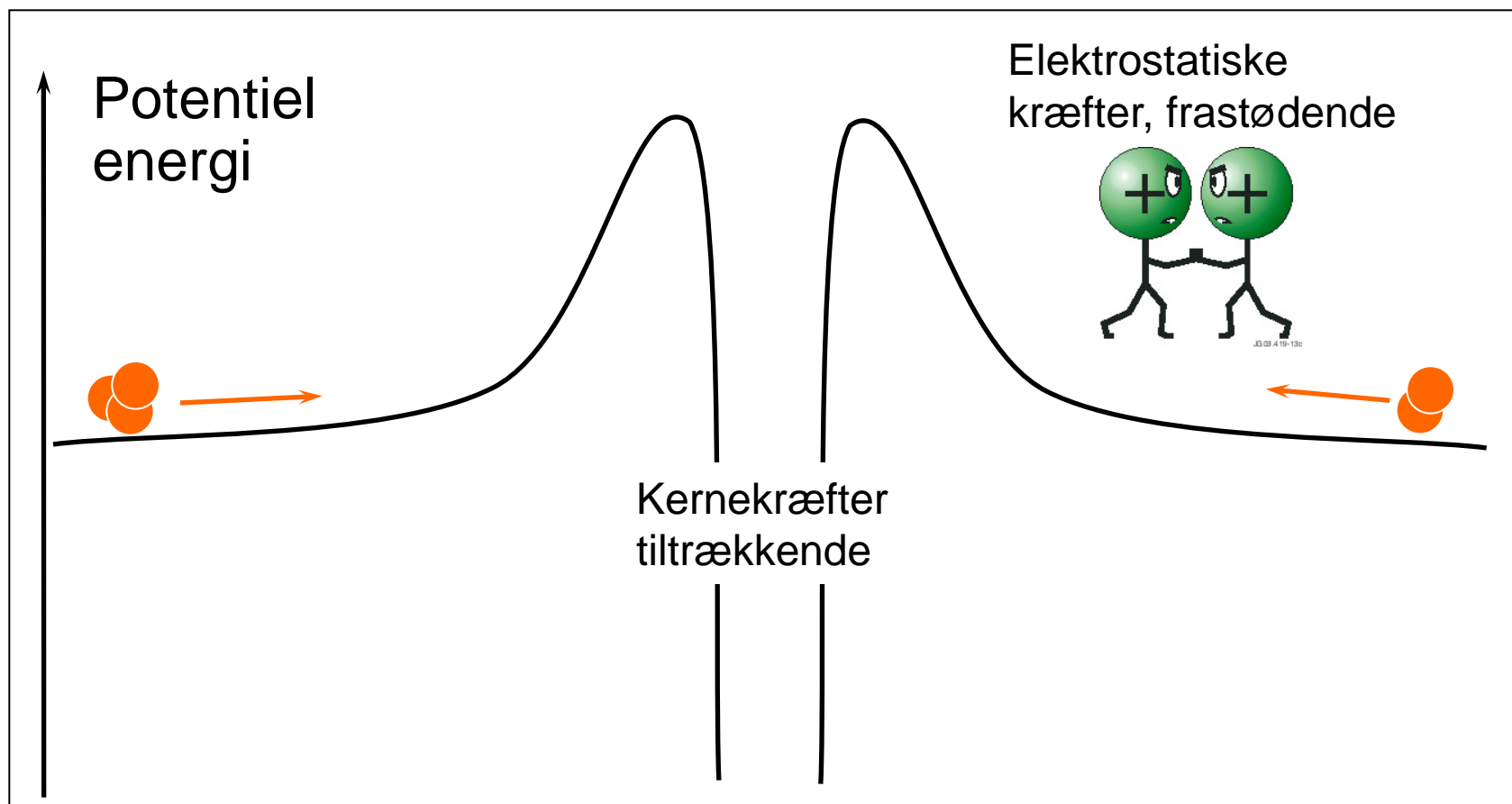


# Fusion og sikkerhed

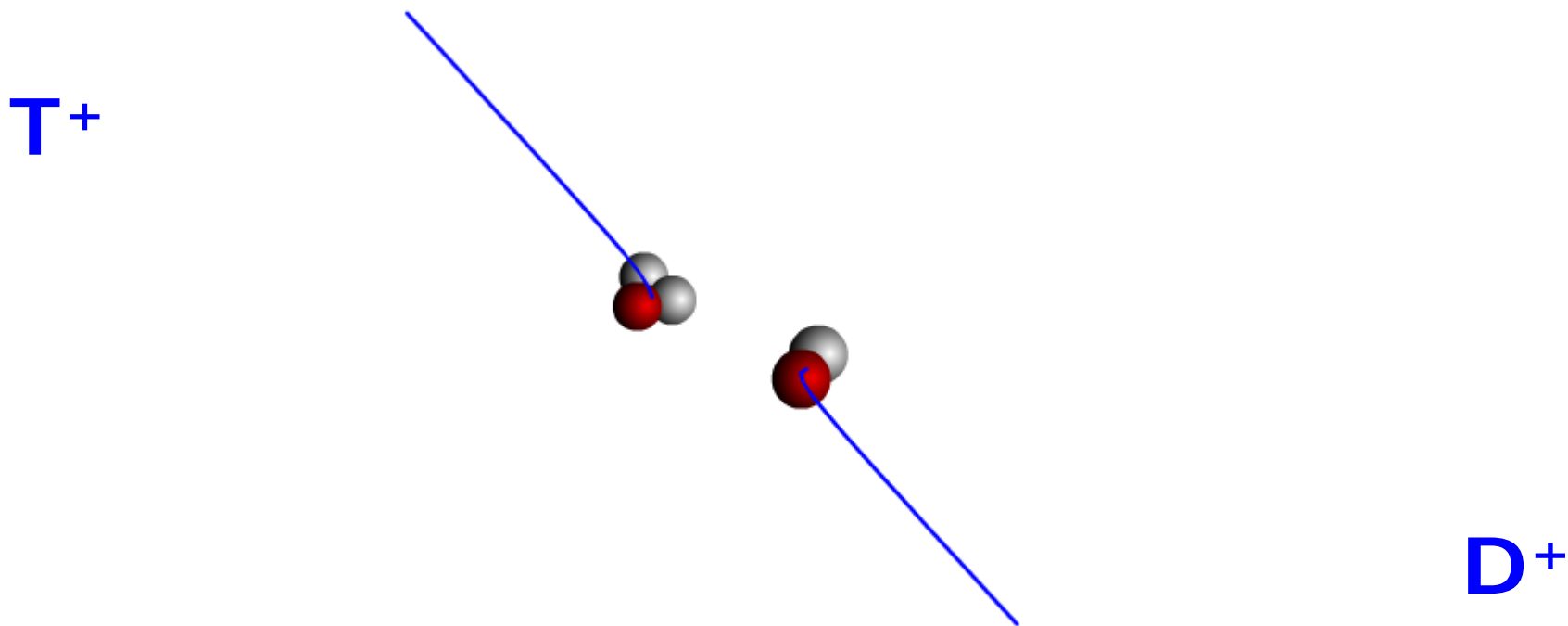
- Ingen kædereaktioner
- Ingen risiko for nedsmeltning
  - overophedning af brændstof  $\Rightarrow$  reduceret fusionseffekt
  - tab af kontrol  $\Rightarrow$  øjeblikkelig afkøling af brændstof mod væg
  - 2 g brændstof – der tilføres hele tiden brændstof
- Ingen transport af radioaktivt brændsel eller affald
- Ingen produktion af langlivet radioaktiv affald

# Nødvendig opvarmning af brændslet

Pga. elektrisk frastødning mellem D- og T-kernerne er kraftig opvarmning af brændstoffet nødvendig  $\Rightarrow T \approx 200 \text{ mio. } ^\circ \text{C}$

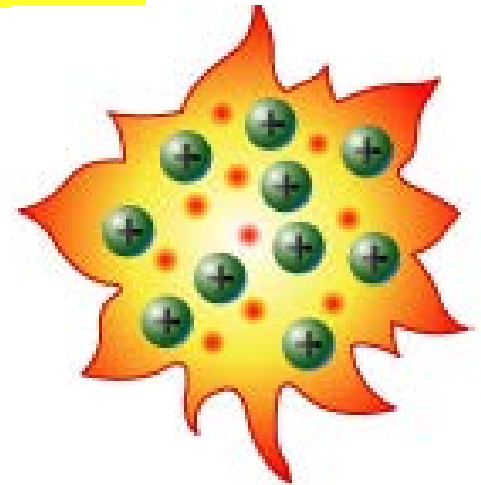


# Vekselvirkning mellem $D^+$ og $T^+$



# Plasma

Ved meget høje temperaturer : Plasma tilstand : gas af ioner og elektroner

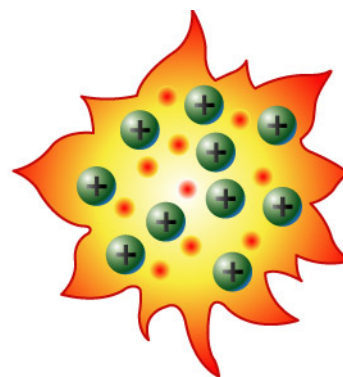
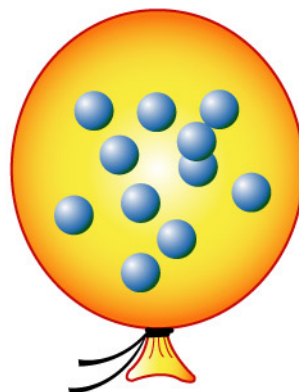
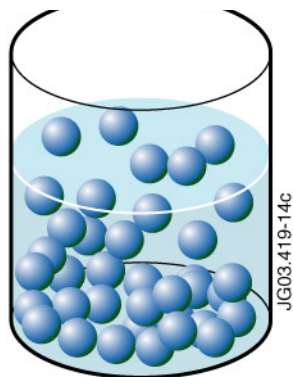
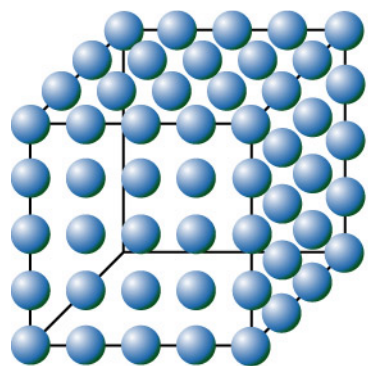
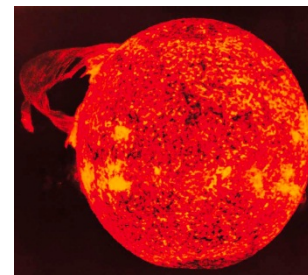
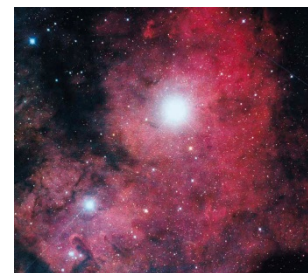
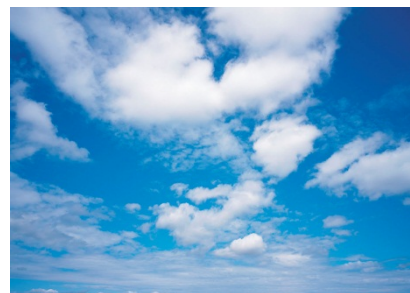


## Energienheder:

- $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$  (joule)
- $1 \text{ eV}$  – svarer til  $11.605 \text{ K}$  ( $200 \text{ mio K}$  – ca.  $20 \text{ keV}$ )
- $1 \text{ eV}$ : energien en partikel med en elektronladning opnår når den bevæger igennem et spændingsfald på  $1 \text{ V}$ .

# Hvad er et plasma?

## - den fjerde tilstandsform



Kold  
Fast (is)



Lun  
Væske (vand)



Varm  
Gas (damp)



Meget varm  
Plasma

Stigende temperatur

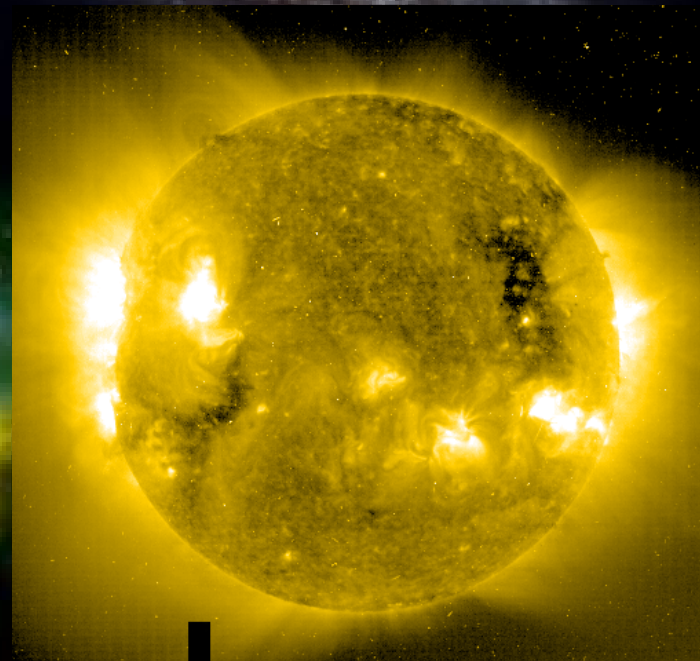
Et plasma er elektrisk ledende

Frie ladningsbærere – ioner og elektroner - vekselvirker gennem elektriske og magnetiske kræfter

# Plasma omkring os

- Solen
- **Interstellare rum**
- Lyn
- Nordlys

99 % af det synlige univers er i plasmatilstanden







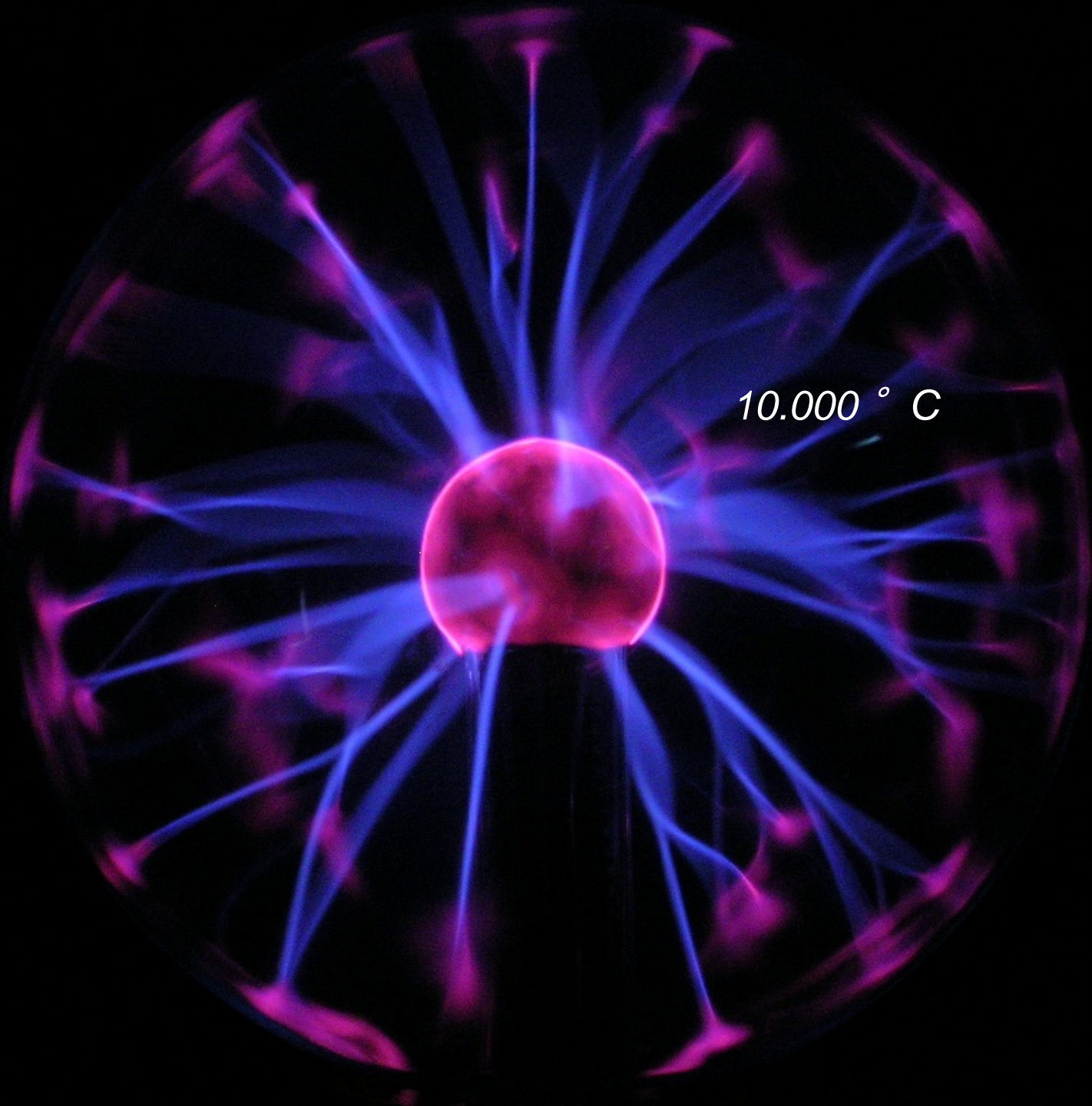


15 millions ° C  
5400 ° C (surface)

30.000 ° C



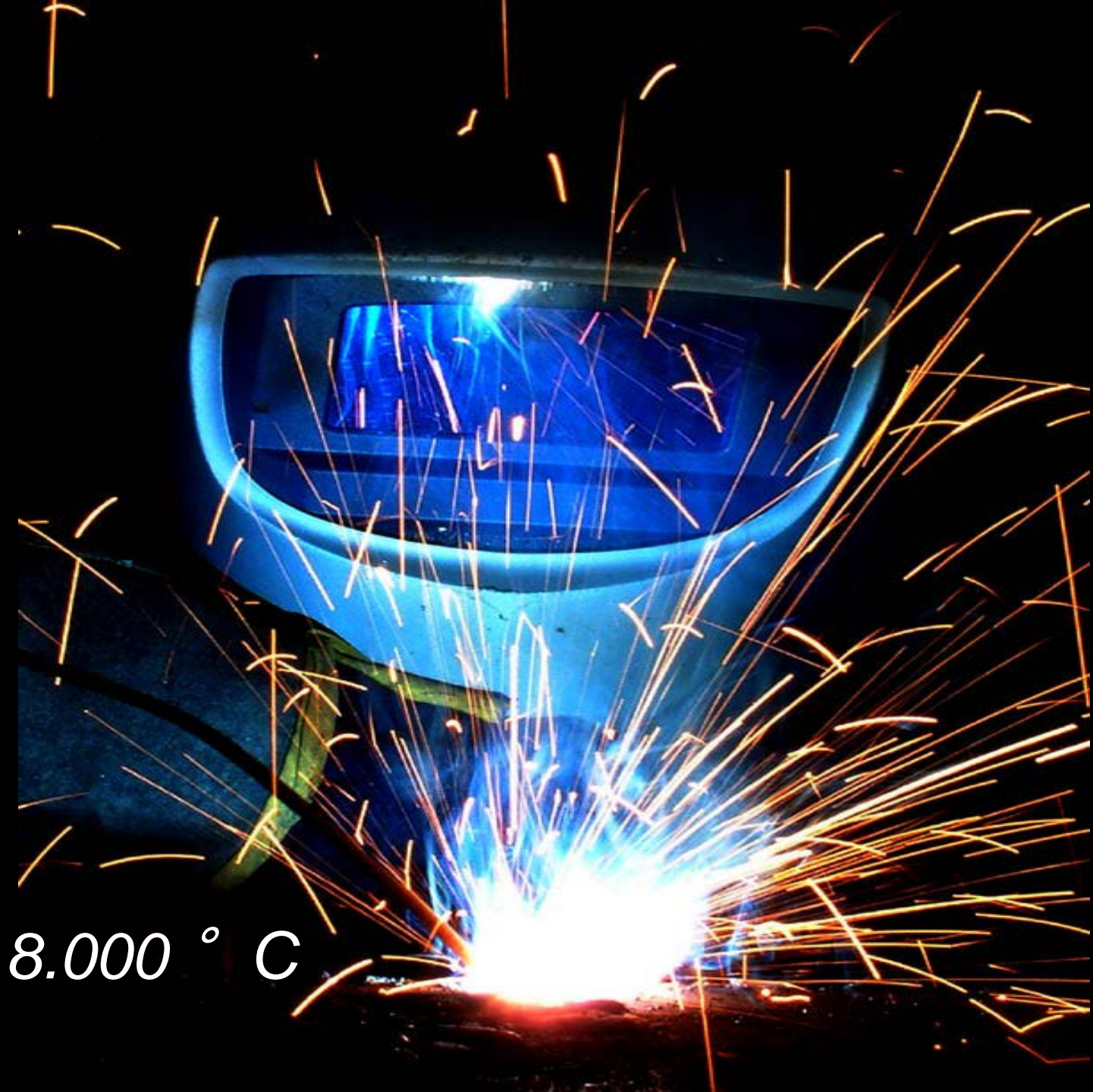
1.000 ° C



10.000 ° C

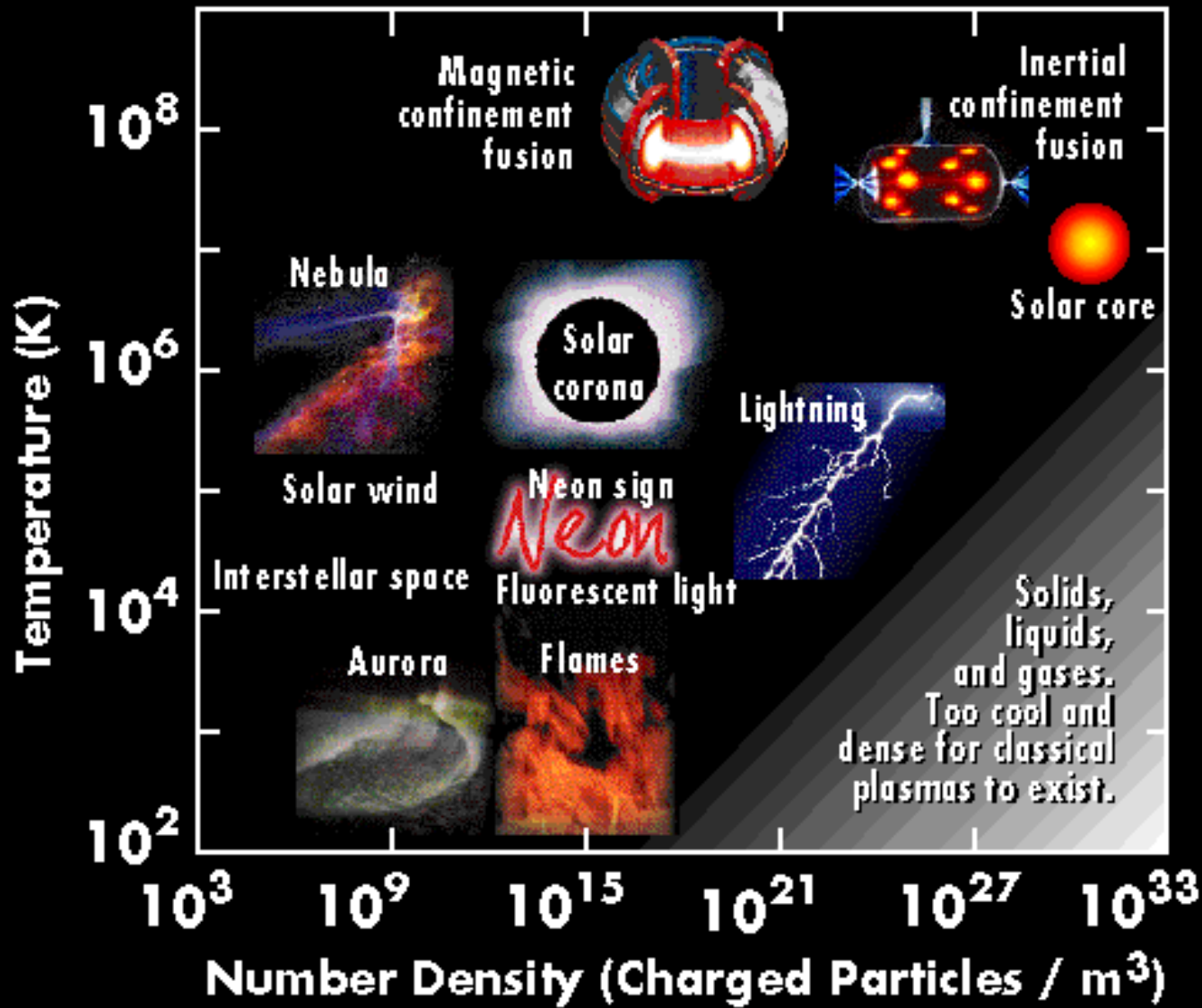
10.000 ° C





8.000 ° C

# 10 gange så varmt som solens kerne!



Copyright 1996 Contemporary Physics Education Project.  
 Images courtesy of DOE fusion labs, NASA, and Steve Albers.

# Plasma historie

1922: Irving Langmuir introducerer begrebet "Plasma" til at betegne en ioniseret gas.

"Plasma" (græsk: πλάσμα) – "støbt" eller "dannet" - var allerede blevet indført i 1850 af den tjekkiske fysiolog J.E. Purkinje i forbindelse med beskrivelsen af blod - blodplasma.

*Og ofte er plasmafysikere nødt til at forklare, at de ikke studerer blod.*

## En milepæl i moderne plasma forskning:

1958: Genève-konferencen – "atoms for peace" - om fredelig udnyttelse af atomenergi, hvor det blev besluttet at af klassificere forskning i kontrolleret fusion

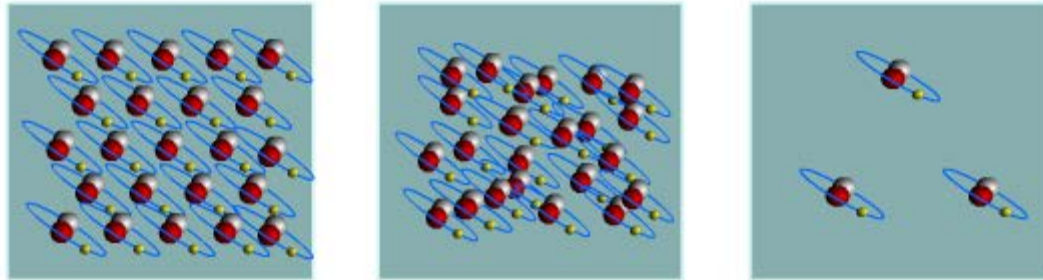
Omfattende internationalt forskningssamarbejde om fusionsenergi.



# Plasma anvendelser

- Den væsentligste drivkraft inden for plasmafysik er at udvikle kontrolleret fusionsenergi.
- Plasmaer bliver anvendt i flere grundlæggende undersøgelser af, fx lineær og ikke-lineær bølge dynamik, ikke-lineær kohærente strukturer, solitoner, turbulens ....
- Plasma i rummet – rumforskning og astrofysik....
- Teknologiske anvendelser af plasmaer er blevet stadig vigtigere inden for en lang række områder: f.eks. overflade behandling/modificering, sterilisation.

# Plasma - Ladede partikler



Gas

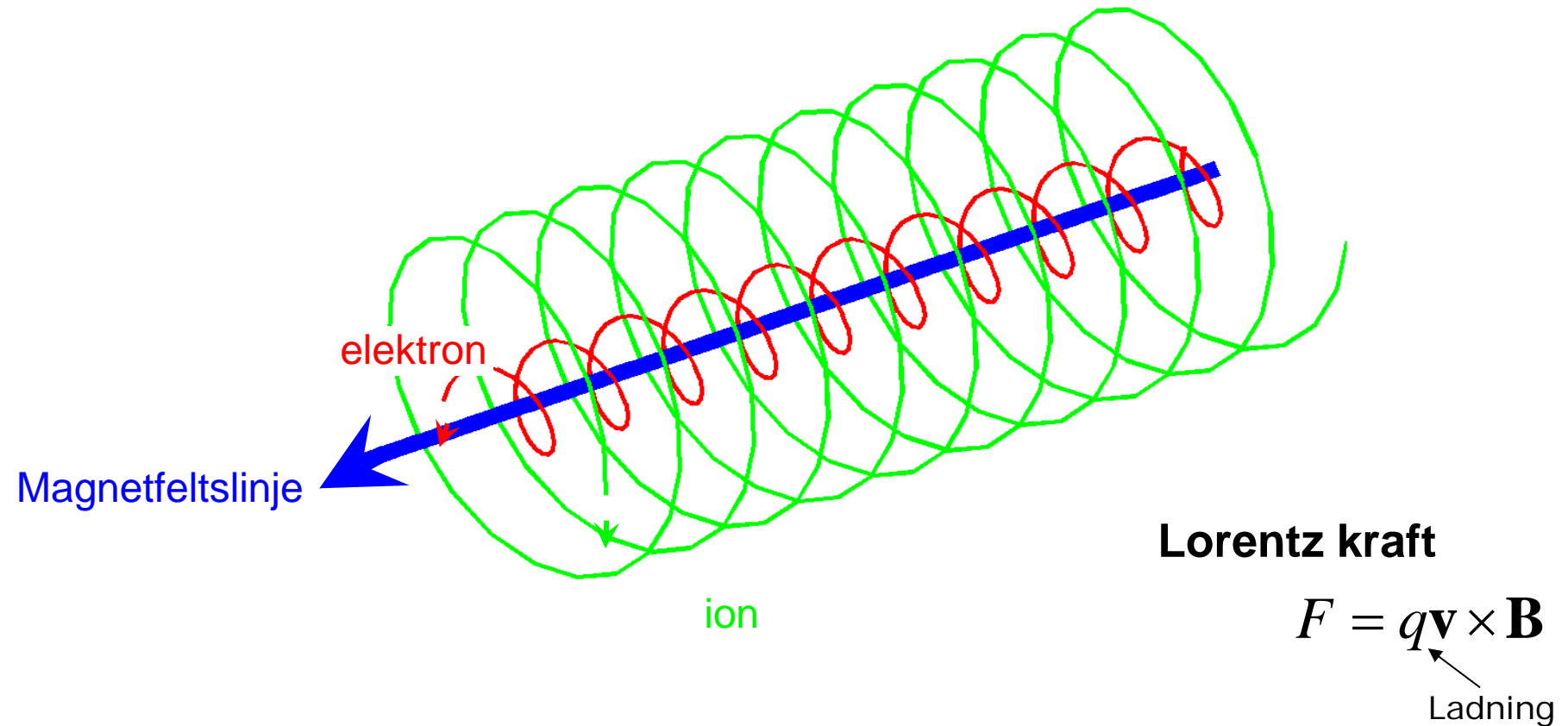
Plasma



**Hvordan indesluttet plasma, som er 200.000.000° C ?**

# Ladede partikler – ioner og elektroner – i et plasma påvirkes af et magnet felt!

## Gyro-bevægelse

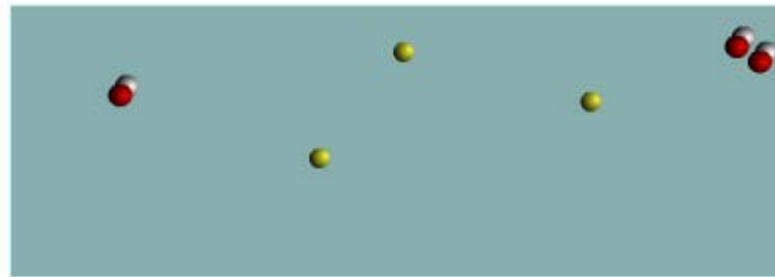


# Ladede partikler i magnetfelt

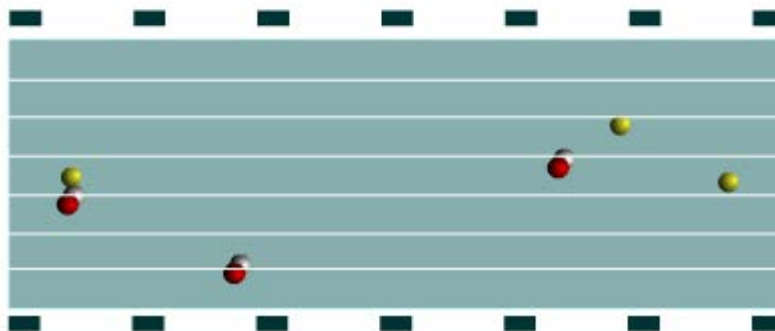
$$F = q(E + v \times B)$$

Lorentz kraft

Uden magnetfelt



Med magnetfelt

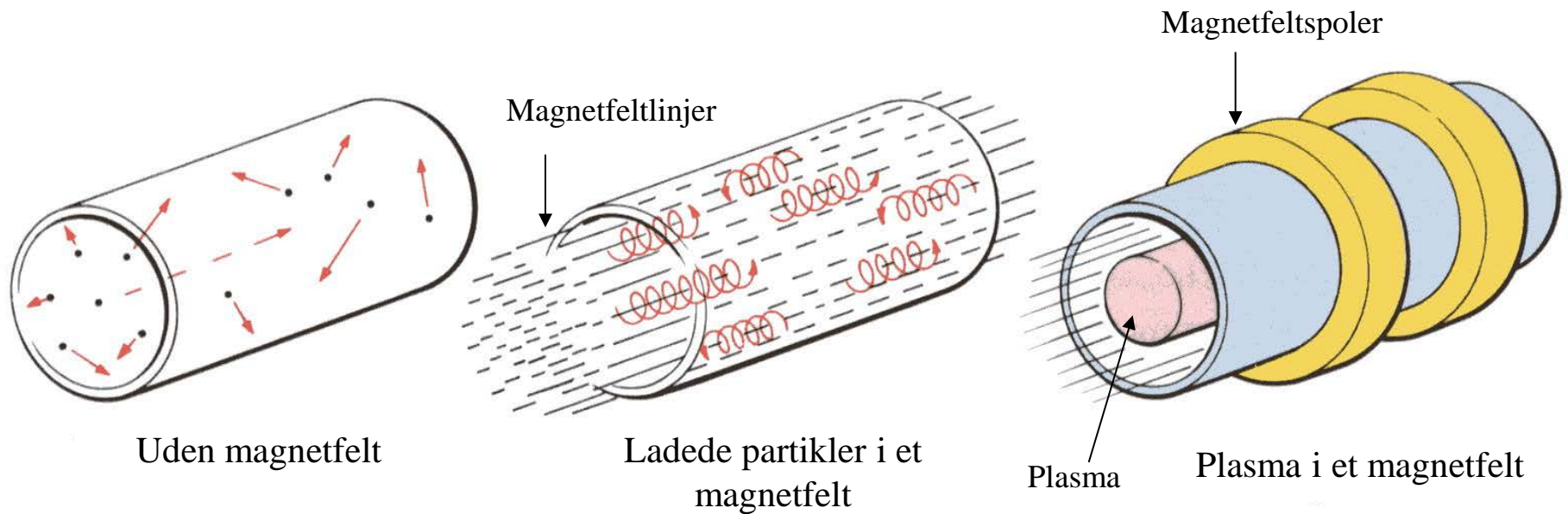


<http://www2.euro-fusion.org/multimedia/animations.htm>

Men hvad gør vi med enderne?

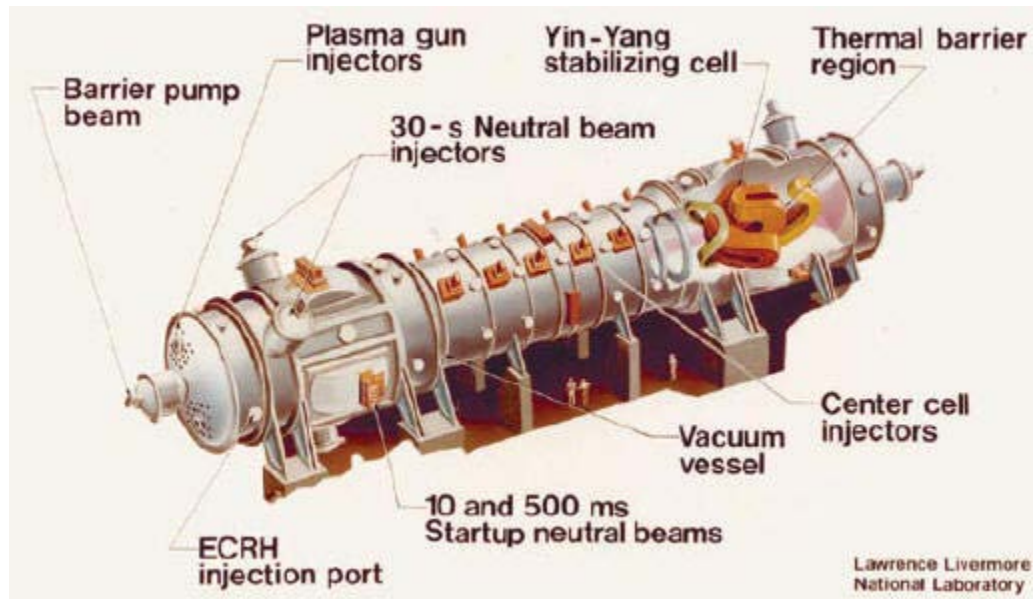
# Plasma og magnetfelter

Plasmaet består af en neutral blanding af ioner og elektroner, og det kan holdes indesluttet i et magnetfelt, da ioner og elektroner påvirkes af magnetfelter.



# Lineare magnetfelter

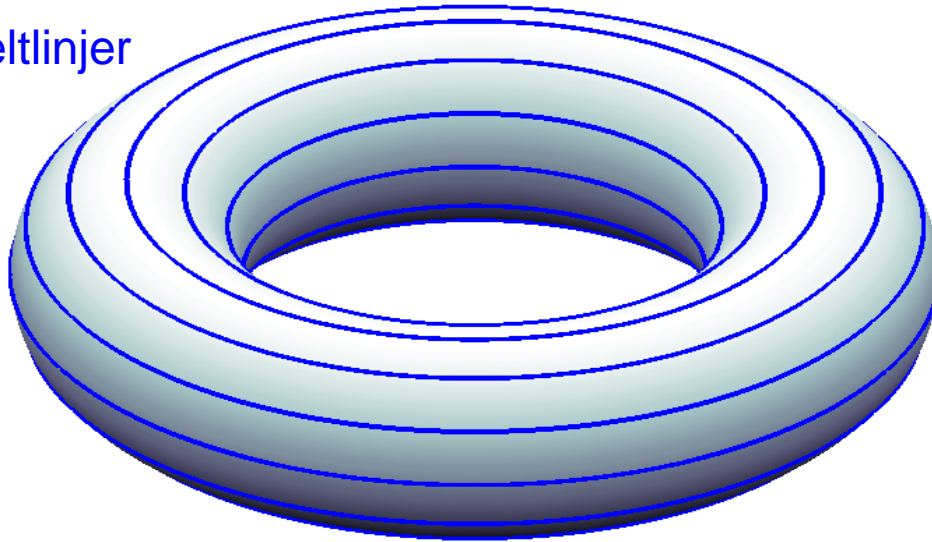
**Problem: ende-tab!**



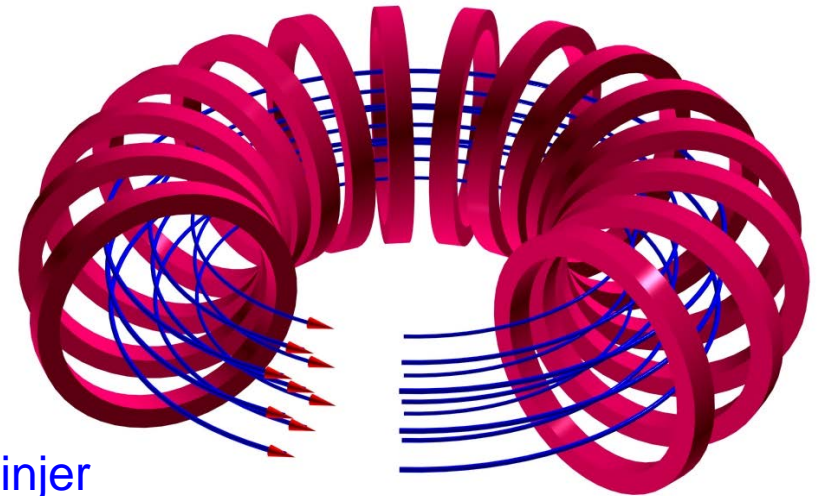
Det er ikke lykkedes at konstruere "tætte" "plugs" ved enderne, og lineare maskiner blev opgivet i 1980'erne.....

# Toroidalt magnetfelt: intet "ende-tab"

Magnetfeltlinjer

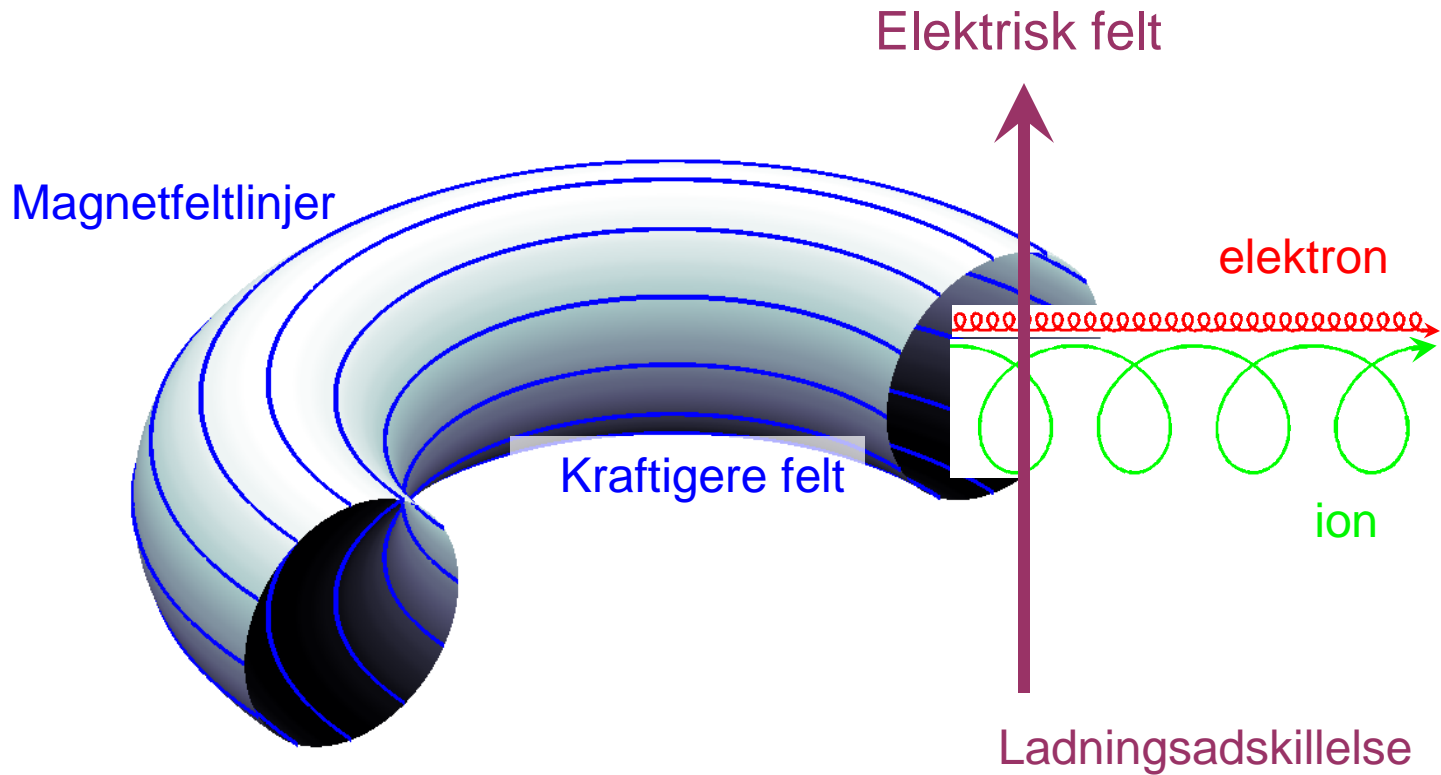


Magnetfeltspoler



Magnetfeltlinjer

# Toroidalt magnetfelt: Plasmaet er ustabil!

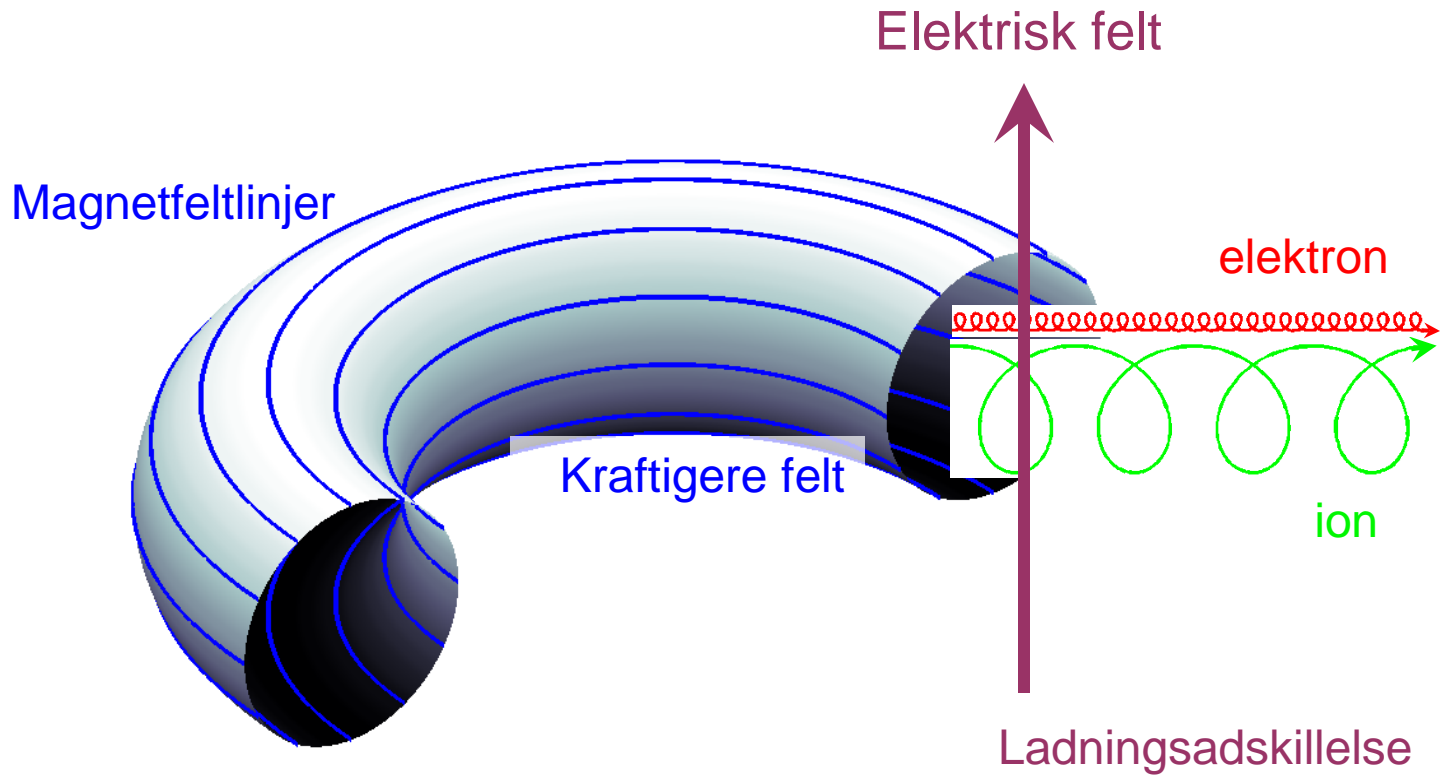


Plasma er ikke indesluttet i et toridialt felt !



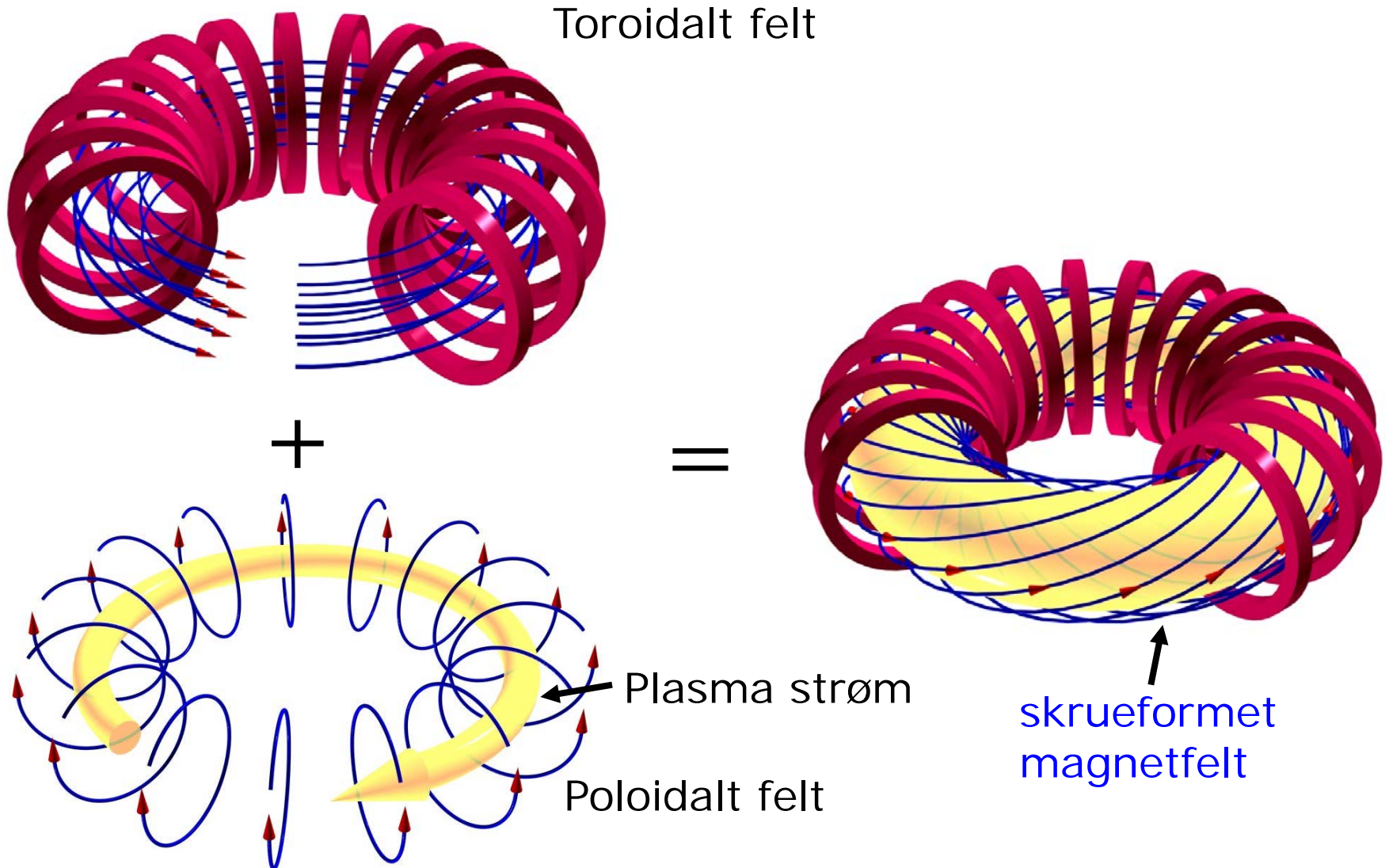
# Roadshow

# Toroidalt magnetfelt: Plasmaet er ustabil!



Plasma er ikke indesluttet i et toridialt felt !

# Indesluttende magnetfelt

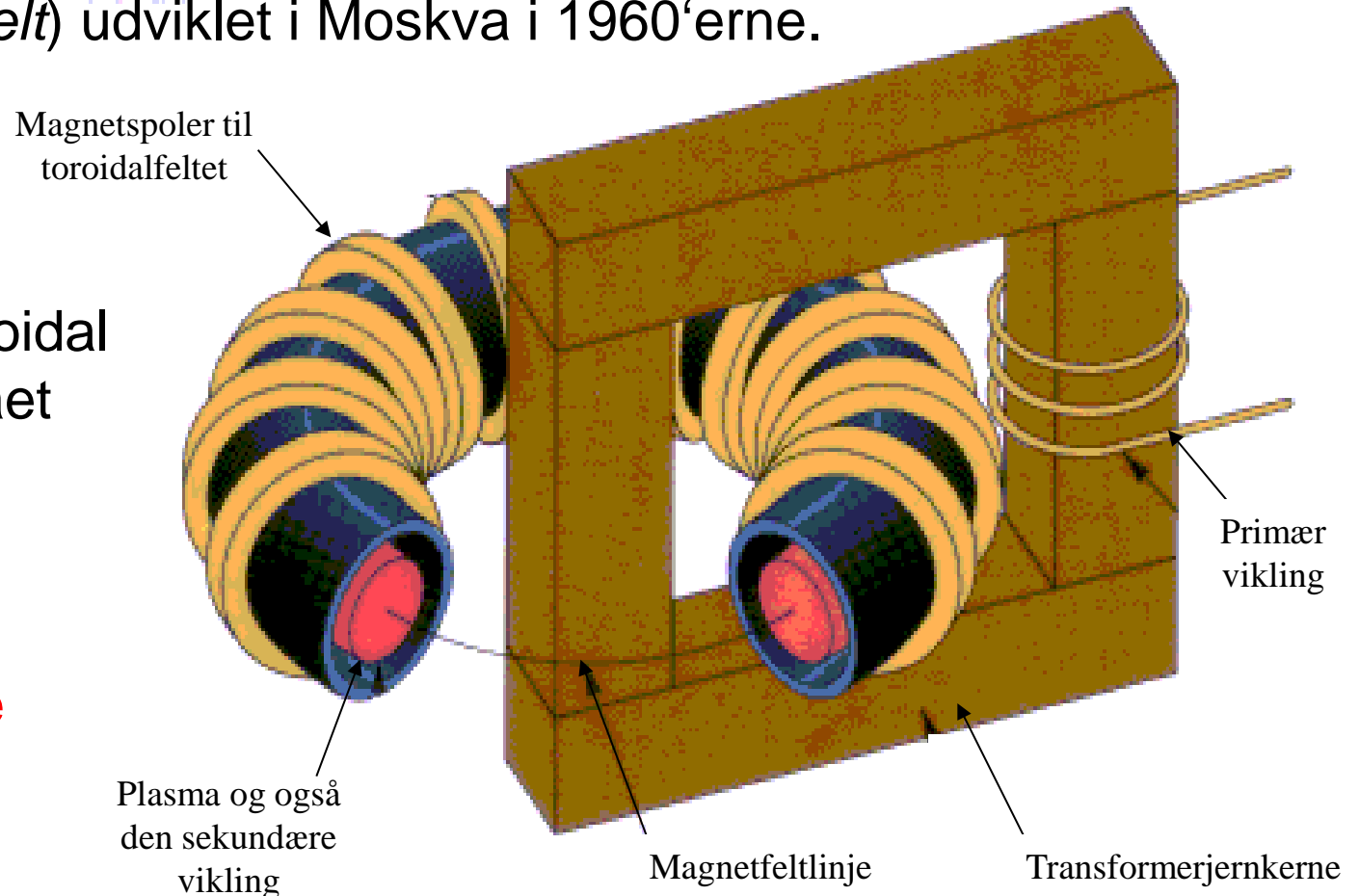


# Tokamakken

Den mest succesfulde magnetfeltskonfiguration er tokamakken (russisk akronym for *Toroidalt Kammer med Magnetisk Felt*) udviklet i Moskva i 1960'erne.

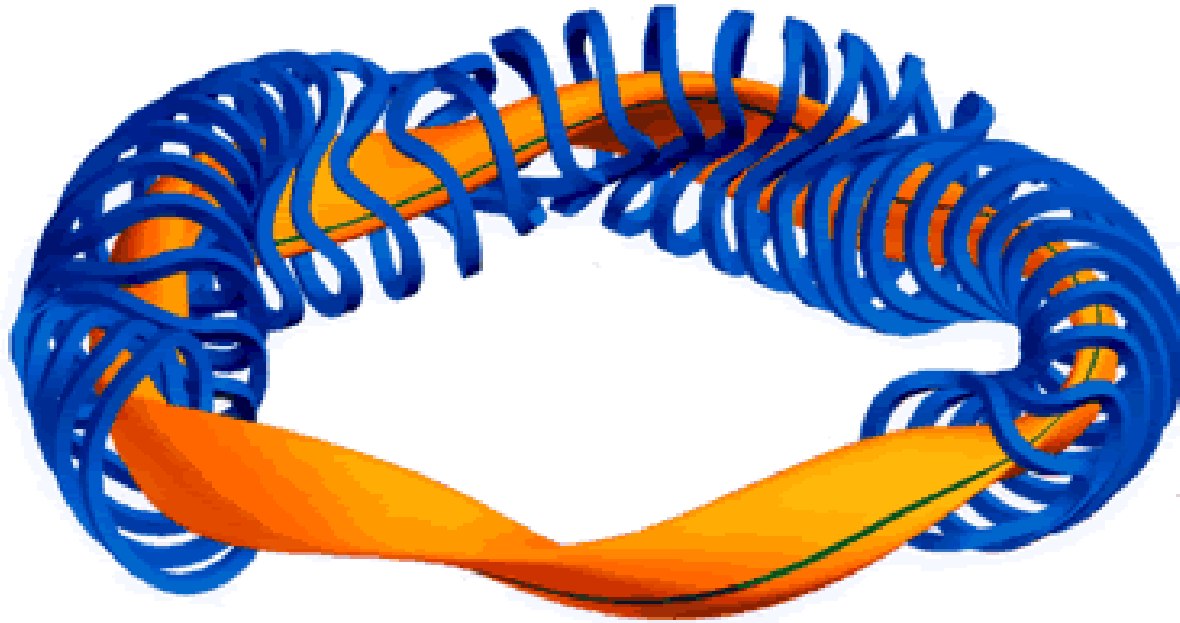
Transformeren generer en toroidal strøm i plasmaet  $\Rightarrow$  poloidalt magnetfelt.

Dermed er det totale toroidale magnetfelt skrueformet



# Stellarator

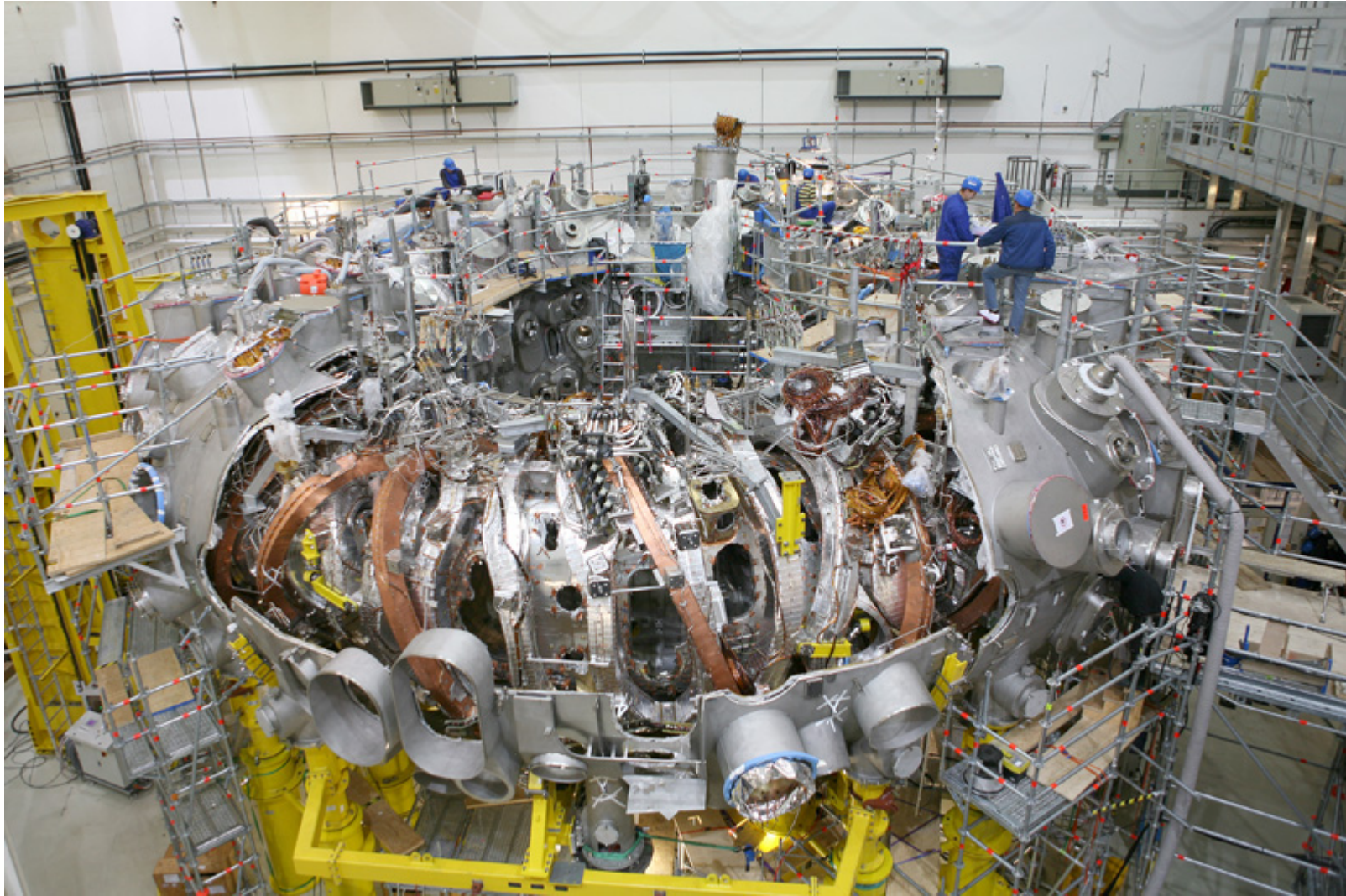
Magnet felt spoler laver et "helical" magnetisk felt



Wendelstein 7-X – IPP Greifswald Tyskland

**Første plasma December 2015**

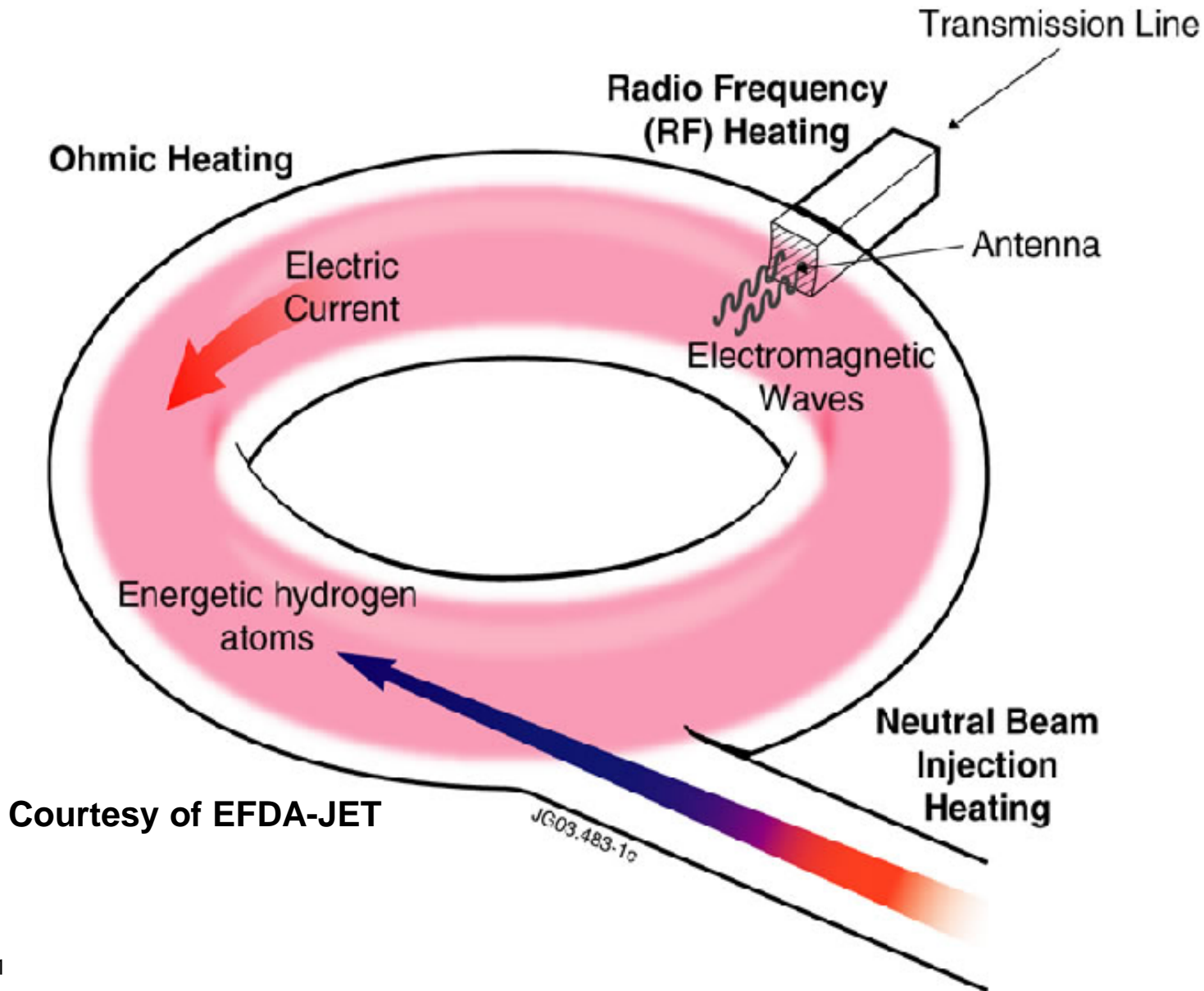
# Wendelstein 7-X



2014

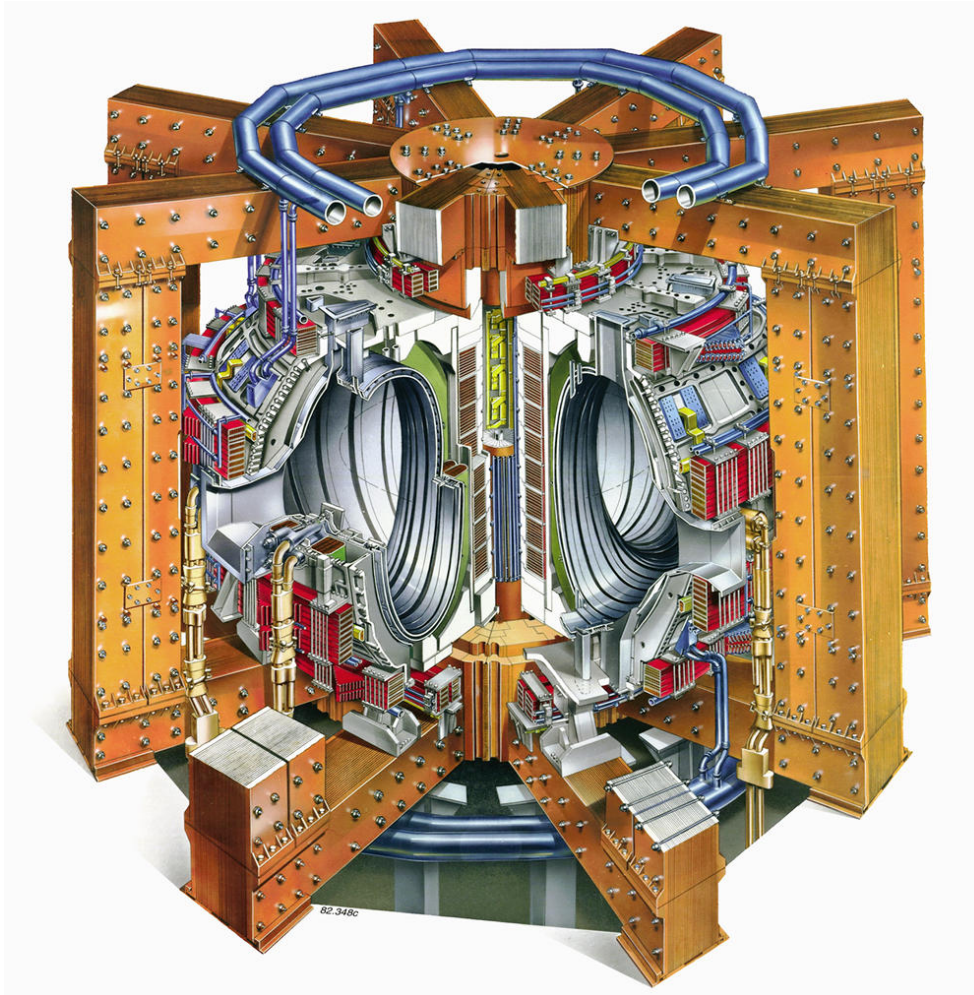
**Opvarmning af et plasma til 200.000.000 ° C?**  
(20 keV)

# Opvarmningsmetoder





# Verdens største tokamak: JET (Joint European Torus)



Courtesy of EFDA-JET

Torus radius  $R = 3$  m

Fælles Europæisk eksperiment  
Culham, England

Konstruktion 1978 - 1983

Første plasma: 25. juni 1983

D-T plasma i 1997:

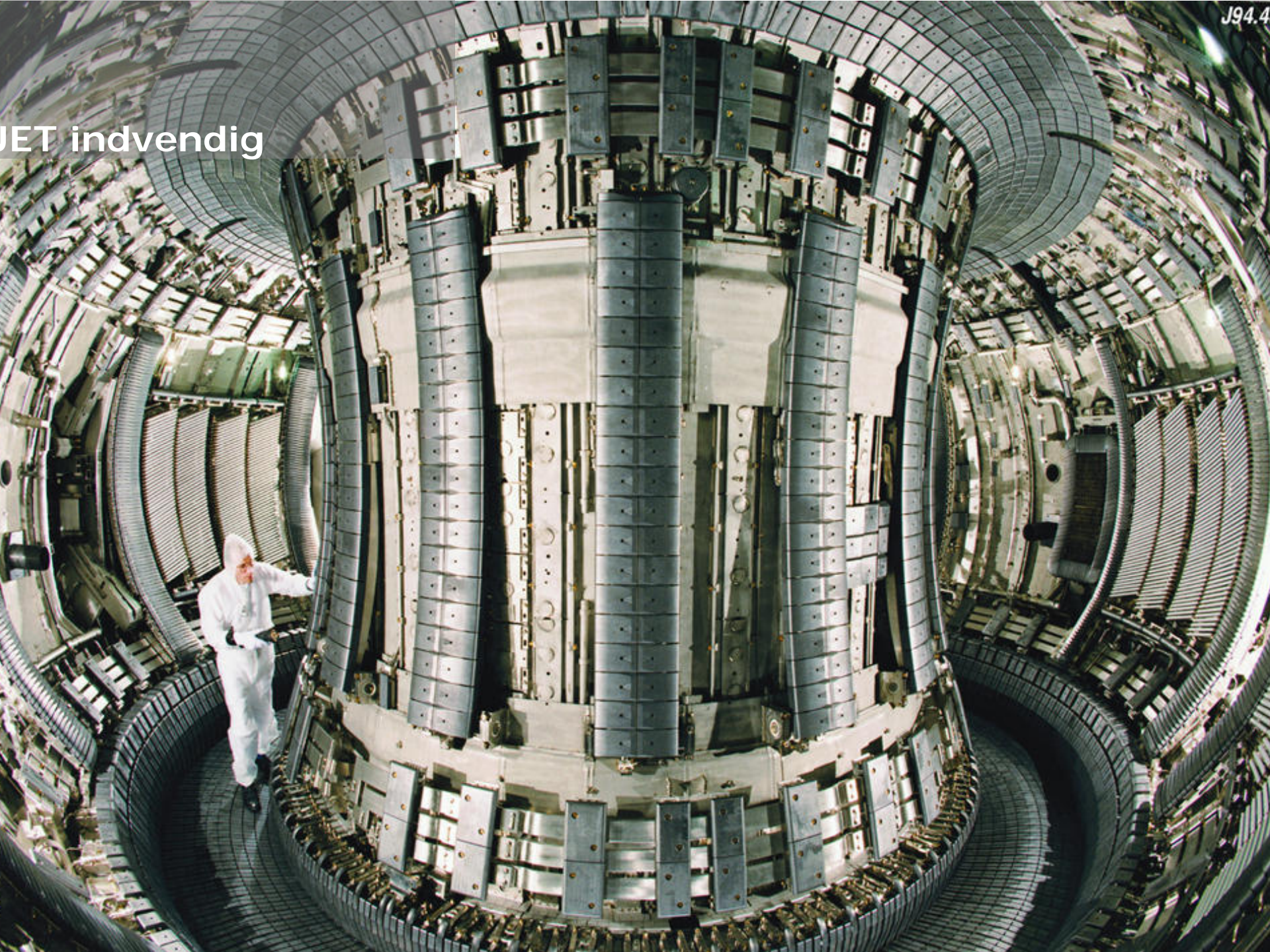
**16 MW fusionseffekt**  
*World rekord!*

**Q~0.64**

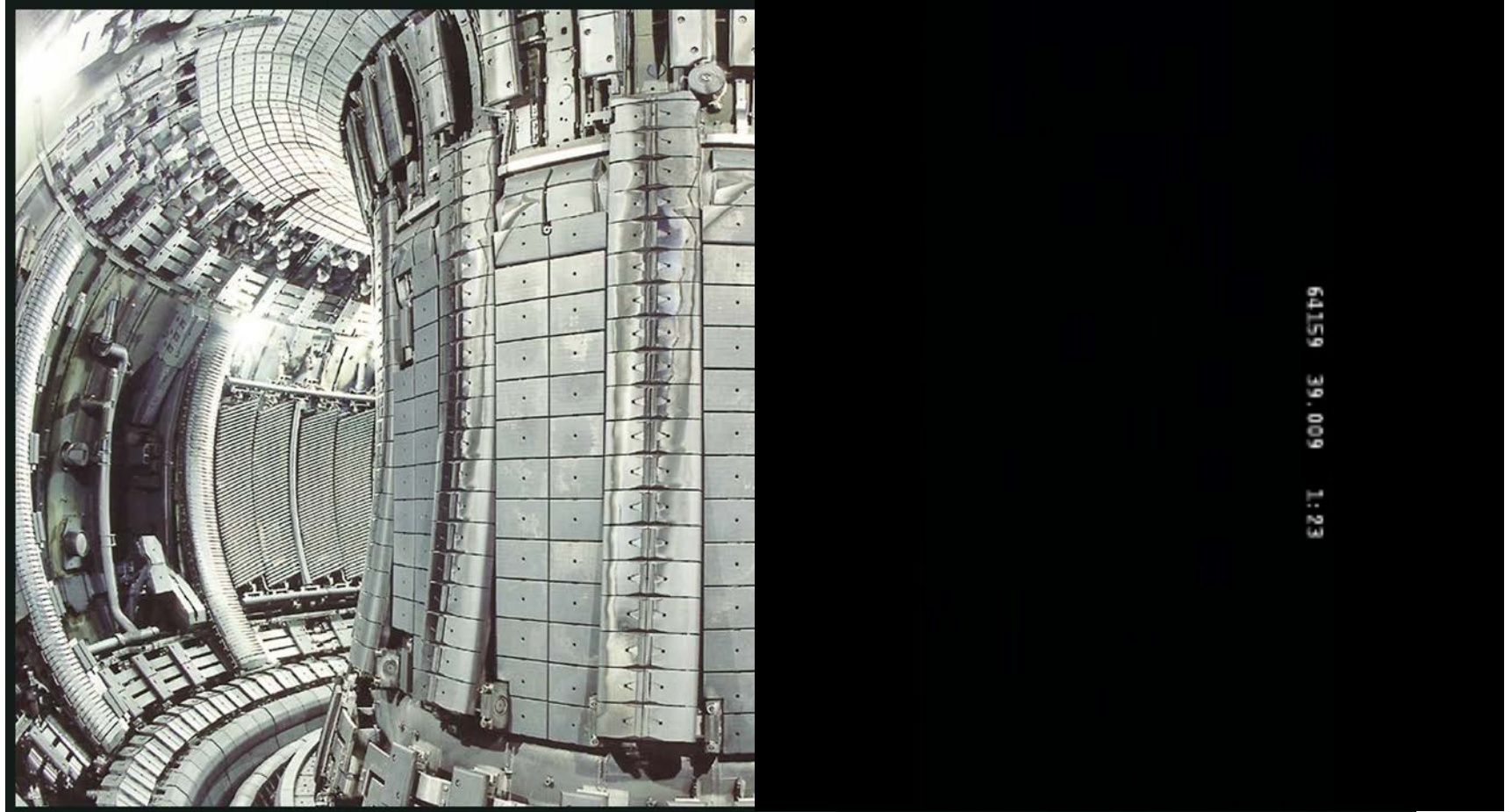
$$Q = \frac{\text{Fusionseffekt}}{\text{Ekstern opvarmningseffekt}}$$

<https://www.euro-fusion.org/jet/>

JET indvendig



# Fusionsplasma i JET



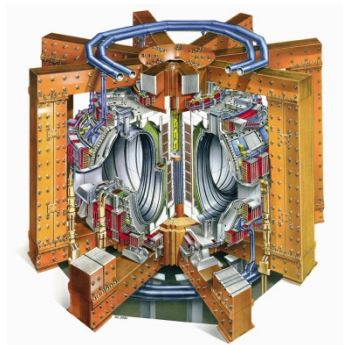
# Energi-indeslutningstid

$$\tau = \frac{\text{Plasmaenergi}}{\text{Opvarmningseffekt}}$$

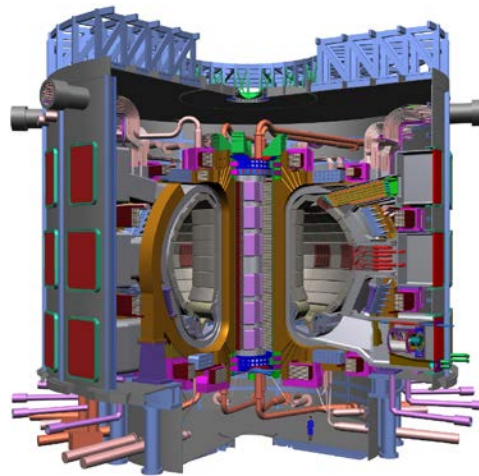
= Karakteristisk afkølingstid



$\tau \approx 12$  minutter



JET:  $\tau \approx 1$  s



ITER:  $\tau \approx 6$  s

$\tau \approx 12$  timer



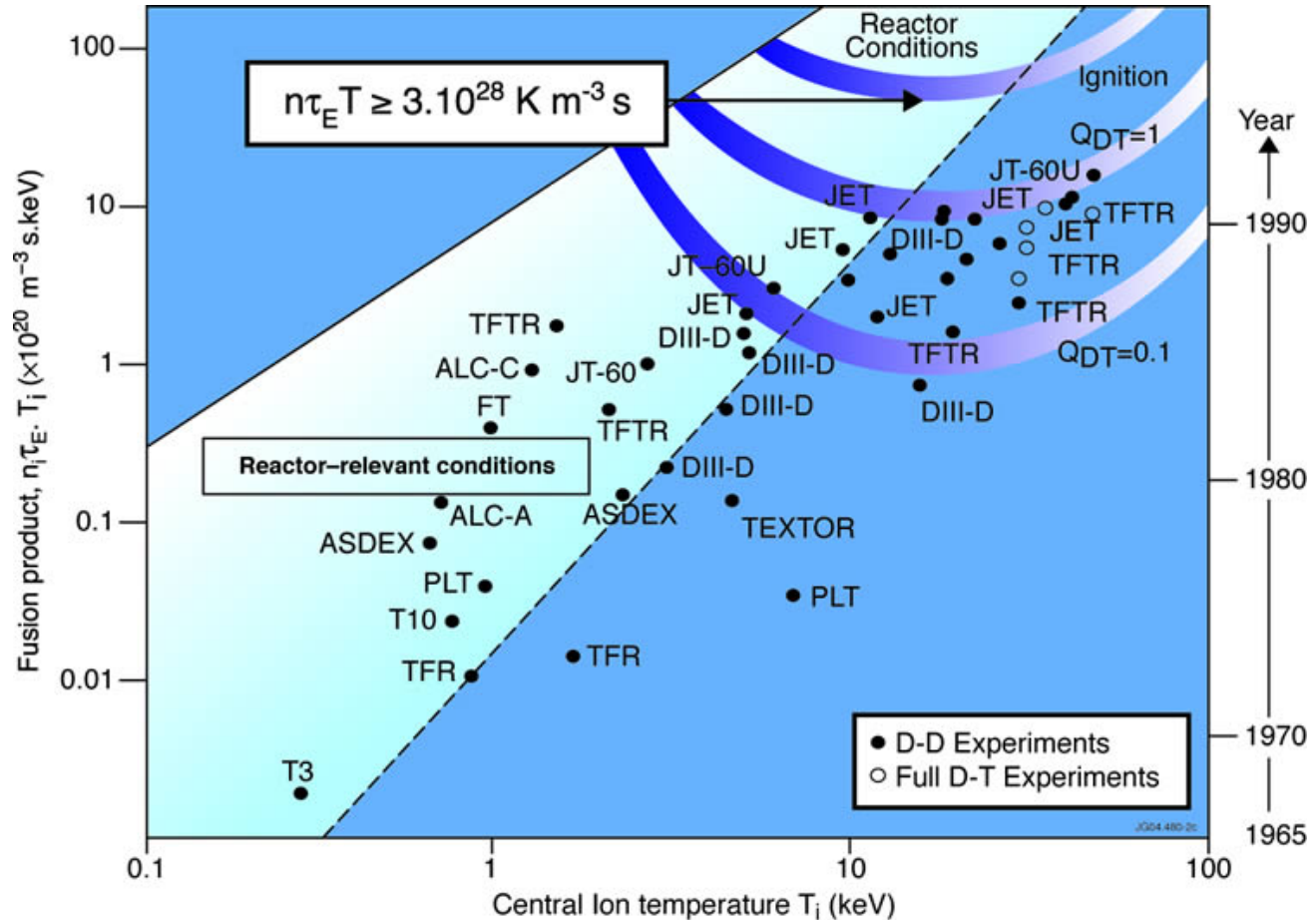
# Lawson-kriteriet – krav til $n$ , $T$ , $\tau_E$



**J.D. Lawson**  
(1955)

$n_i \tau_E \geq 10^{20} \text{ s/m}^3$   
ved  $T_i = 10 \text{ keV}$

## Triple-produktet: $n_i \tau_E T_i$





# ITER- det næste skridt!

## Beslutning 28. juni 2005:

- 7 parter: EU, Indien, Japan, Kina, Korea, Rusland og USA
- EU vært, placering i Frankrig, Cadarache
- EU leverer ~ 45% af ITER

## Byggeri

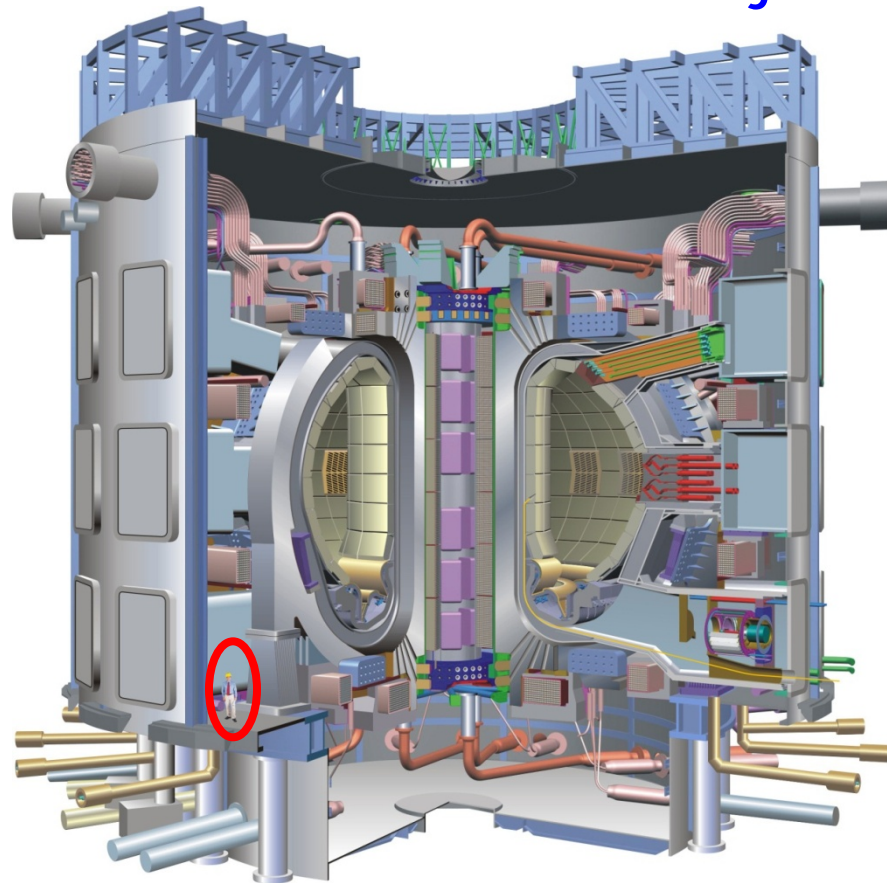
- ~ 15 mia €
- 10 år
- Første kontrakter i 2008
- Klar i ~ 2020

### **Formål:**

Demonstrere at fusion kan bruges som energikilde

Verdens største energiforskningsprojekt

## Internationalt samarbejde



$$R = 6,2 \text{ m}, a = 2,0 \text{ m}, I_p = 15 \text{ MA}, \\ B_T = 5,3 \text{ T}, 23.000 \text{ Ton}$$

**Internationalt langsigtet kontinuitet inden for fusionsforskningen.**

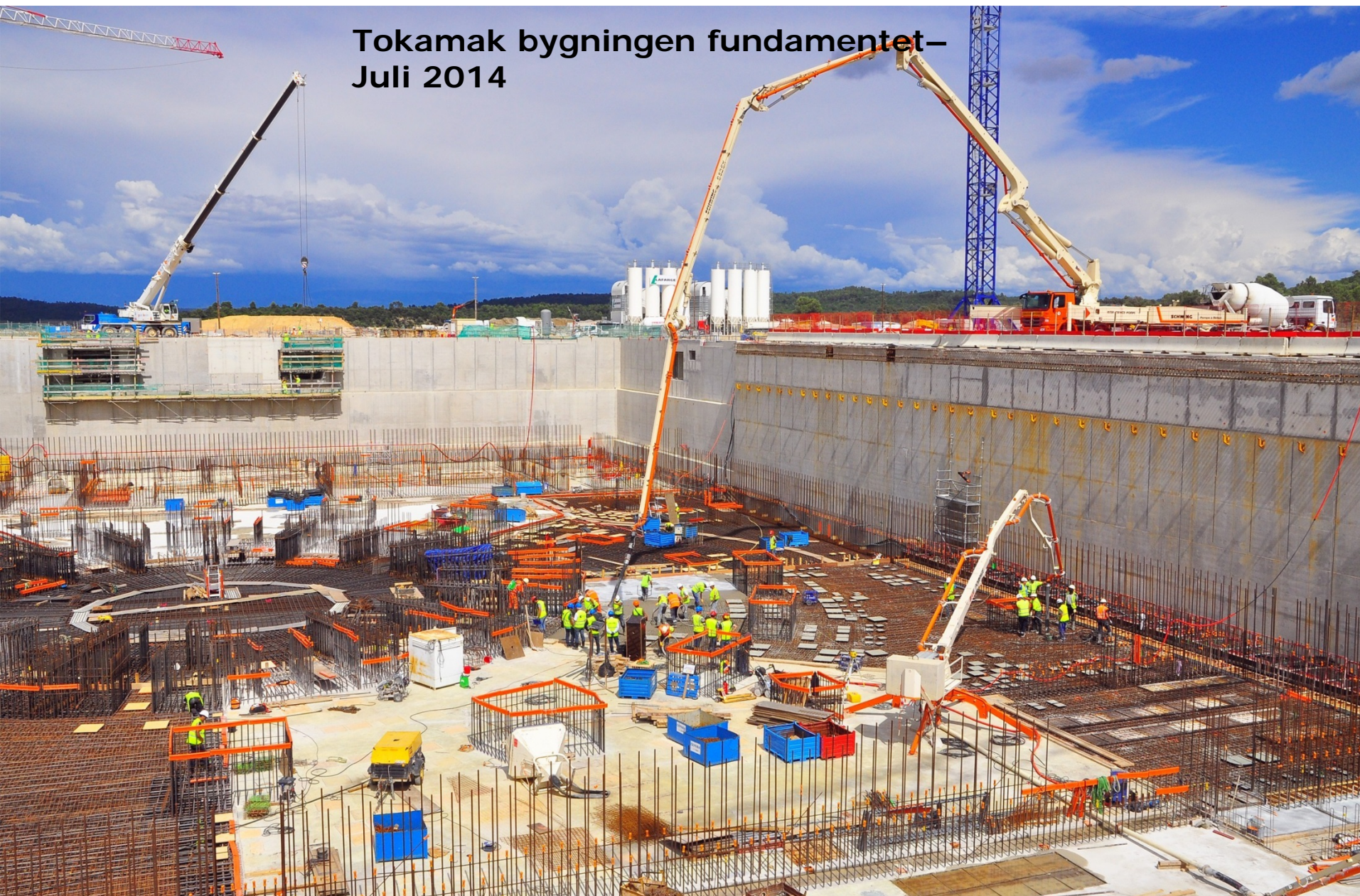
<http://www.iter.org/>

# ITER i Cadarache, Sydfrankrig





# Tokamak bygningen fundamentet- Juli 2014



<http://www.iter.org/>

# ITER mål

## *Formål:*

- Demonstrere at fusion kan bruges som energikilde

## *Tekniske og videnskabelige mål:*

- Indeslutte et D-T plasma hvor alfa-partikel opvarmning dominerer
- Etablere plasmaer med levetid længere end alle tidskonstanter i systemet
- Demonstrere fusionsteknologier i et integreret system
- Afprøve materialer

# Sammenligning mellem JET og ITER

ITER R=6.2m

JET opnåede parametre:

Temperatur: 200 million°C

Tryk: 3 atm.

Fusionseffekt: 16 MW

Effektforstærkning: 0.7

Pulse længde: 1-10 s

ITER mål:

Temperatur: 200 million°C

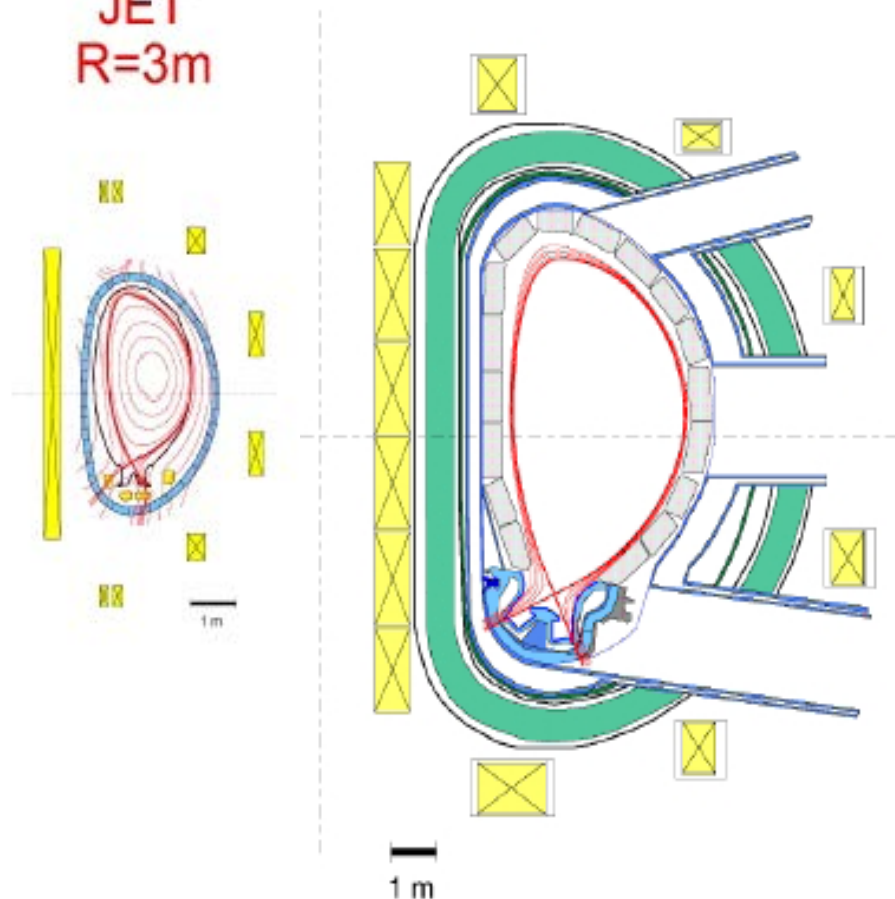
Tryk: 6 atm.

Fusionseffekt: 500 MW

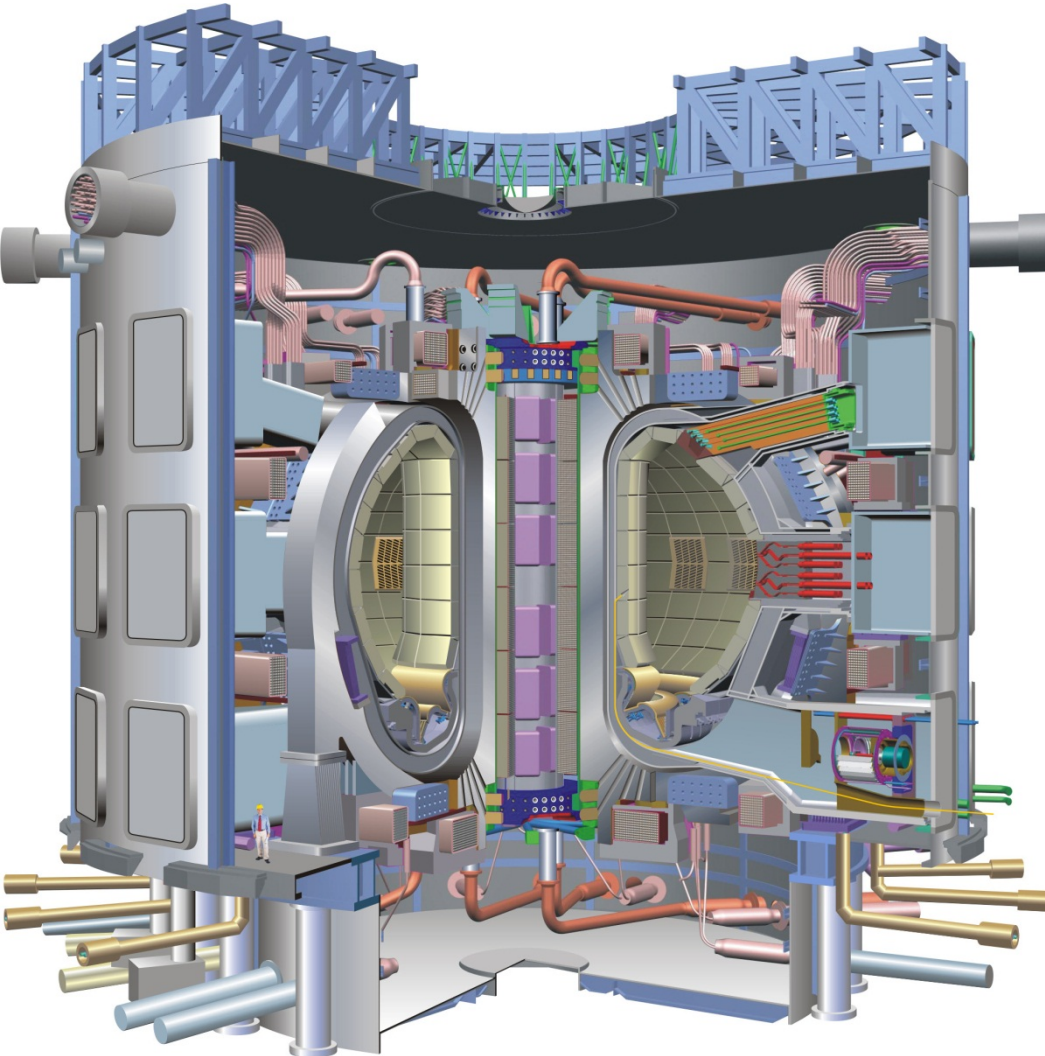
Effektforstærkning: 10

Pulse længde: 400 s

JET  
R=3m



# Hvad skal der til at bygge ITER?



- Superledere
- Vakuumenteknologier
- Pumpe-, køle- og kryoteknologier
- Robotteknologi
- Målesystemer
- IT, dataopsamling og styring
- Krafftelektronik og strømforsyninger
- Mekaniske konstruktioner
- Metaller, legeringer og kompositmaterialer
- Acceleratorer
- Radio- og mikrobølger

<http://www.iter.org/>

# Krav til et kraftværk

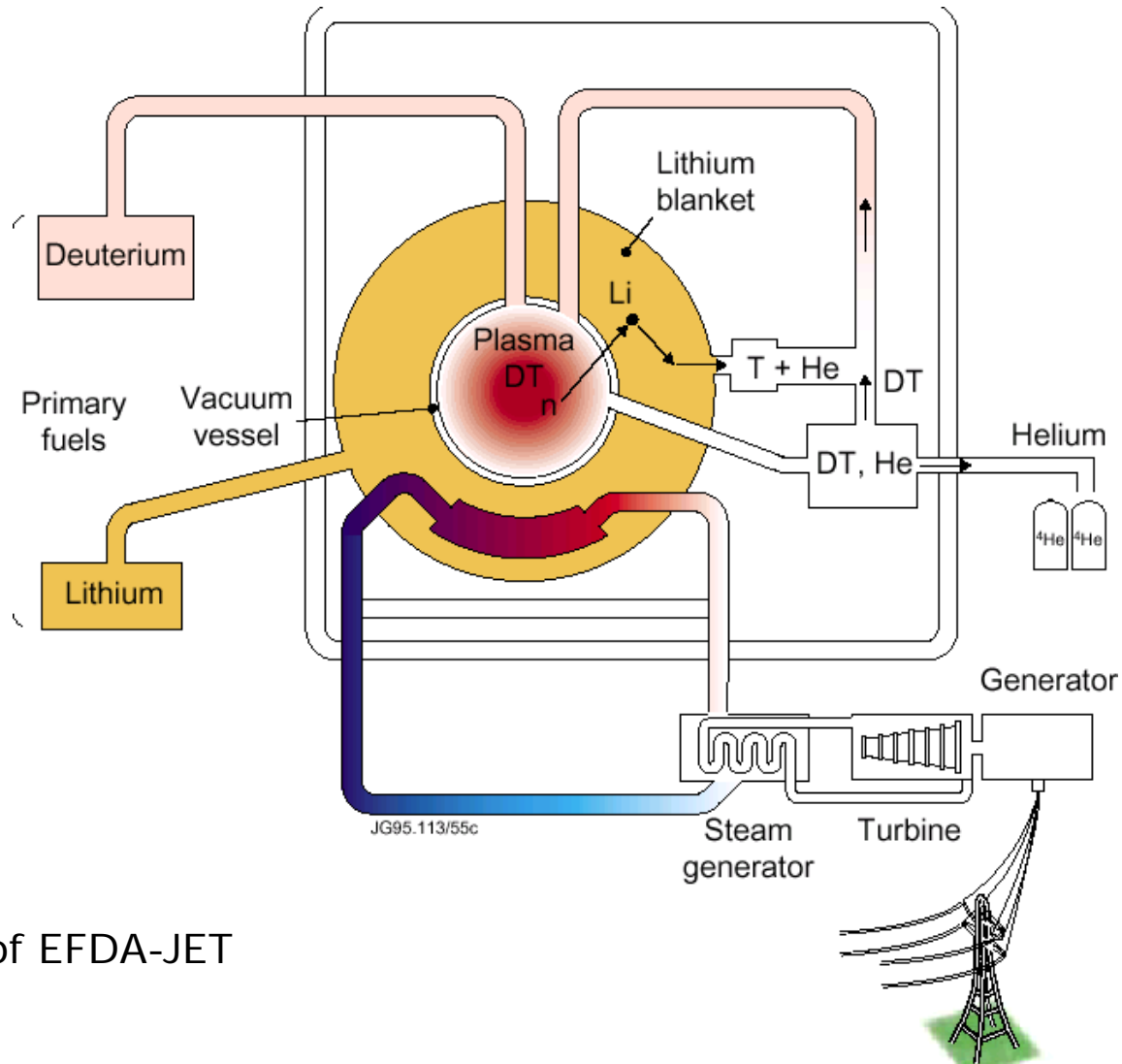
Fusions kraftværk:

- i brug 24/7
- tilrådighed som kul/olie/gas kraftværker
- de fleste kraftværker kul/olie/gas/atomkraft køre med 70% - 90% effektivitet.
- dette tillader 15 ugers nedlukning pr år (JET's "first wall" blev udskiftet på 18 måneder)
- electricitet fra fusions kraftværker som ved eksisterende værker

dvs. **500 MW to 1 GW elektrisk**

svarende til **1 GW to 2 GW termisk** (50% effektivitet)  
demonstreres i DEMO!

# Princip for et fusionskraftværk

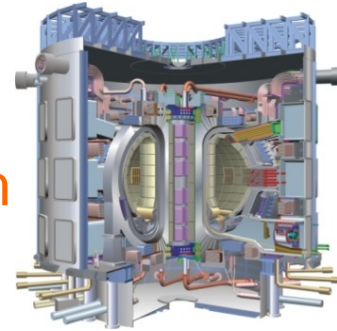


Courtesy of EFDA-JET

# Europæisk Road Map til Fusionsenergi

2020 ITER starter op

- Demonstrere fusion som energikilde
- Afprøve fusionsteknologier i et integreret system



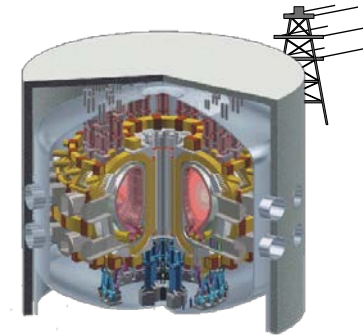
2028 ITER deuterium-tritium eksperimenter

2032 DEMO konstruktion starter

- Prototype på et fusionskraftværk

2041 DEMO starter op

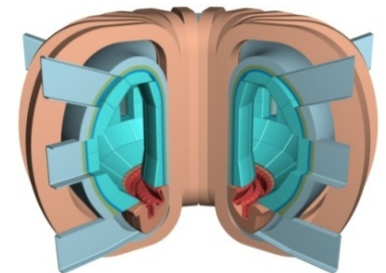
2044 DEMO eksperimenter



**2049 Electricitet produceret ved fusion**

>2050 Første kommercielle fusionskraftværk

- Enheder på omkring 1,5 GWe
- Konkurrencedygtige energipriser: 30-60 ører/kWh

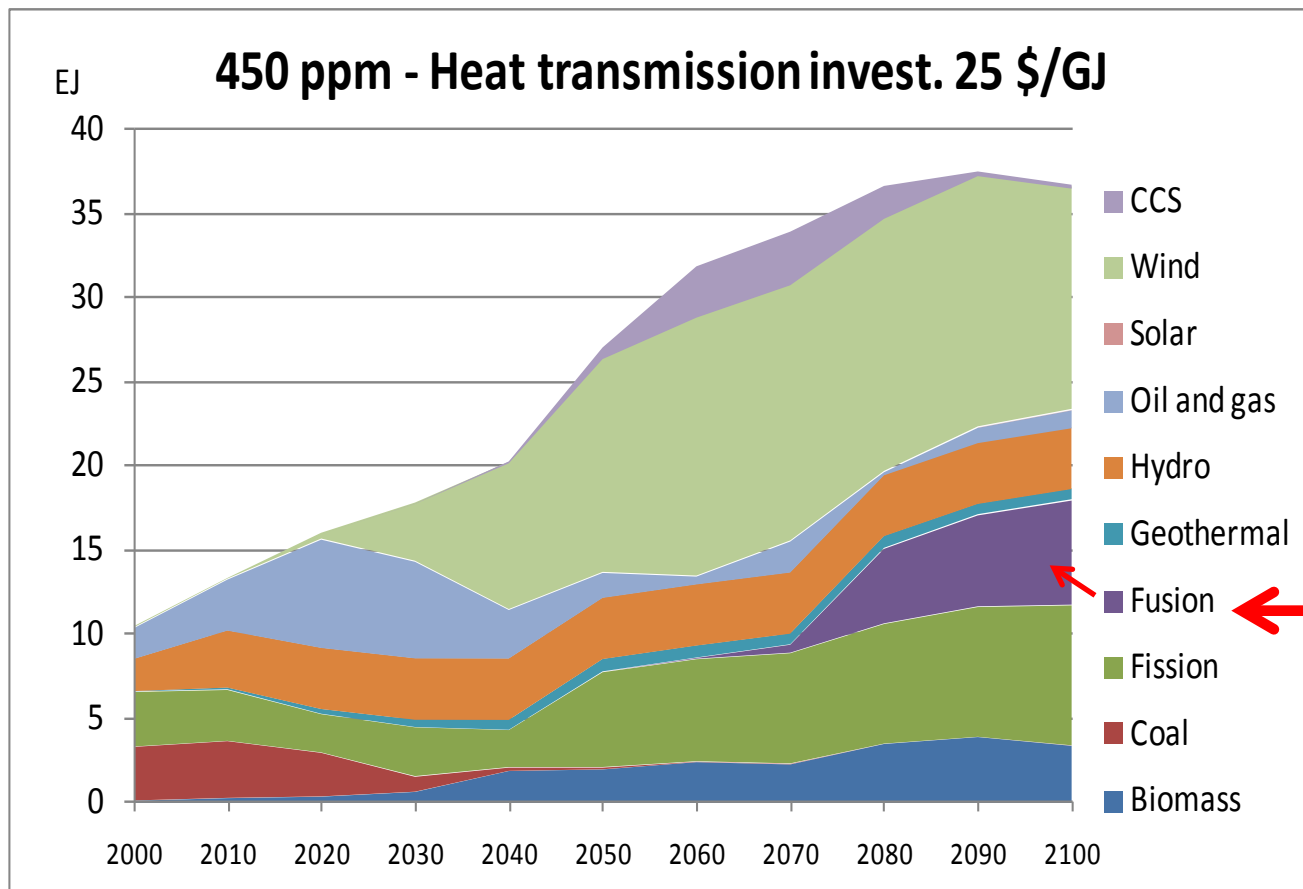


# Anvendelighed

- Fornuftig økonomi (vurderet fra mange sider)  
Produktionspris: 4-8 Eurocent/kWh -- 30 – 60 ører/kWh
- Enheder på 1,5 GW elektrisk
- Kraftværker til primær energiproduktion
- Elektricitet og brint
- Kan levere energi til alle sektorer, inkl. transport
- Danmarks samlede energiforbrug kunne dækkes af 20 fusionskraftværker



# Modellering energiforsyningen 2000-2100



EFDA-times modelberegninger: Electricitet genereres af optimal sæt af teknologier, balancerede med brændsels-, teknologiomkostninger og ressource begrænsninger (P.E. Grohnheit, Annual Progress Report 2011; Association EURATOM-DTU)

**Fusionsenergi kommer ind efter 2050**

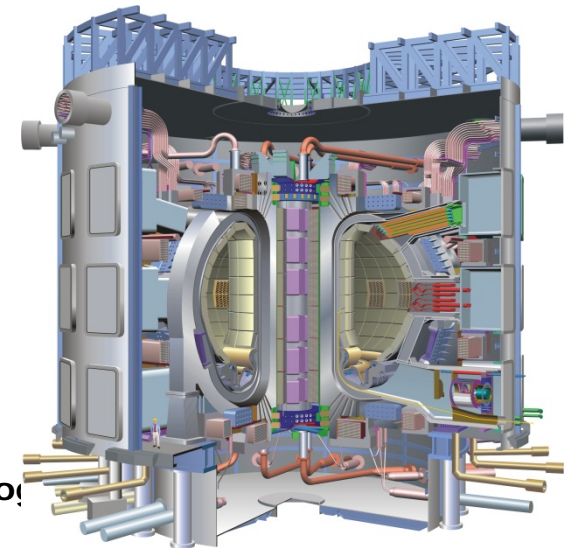
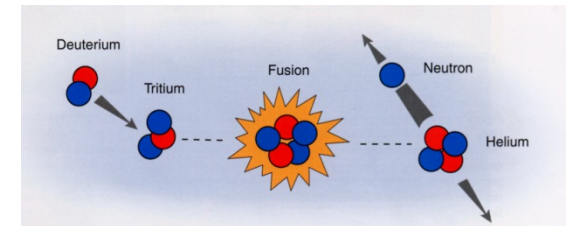
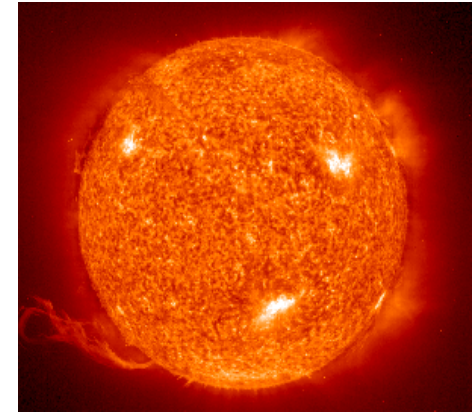
# Opsummering om fusionsenergi

**Fusion af brint til helium er solens energikilde**

## **Fusion på jorden:**

- En uudtømmelig og sikker energikilde
- Acceptabel miljøbelastning
- Nogle få fusionskraftværker vil kunne dække Danmarks energiforbrug
- Det primære brændsel vil være deuterium og litium
- Brændselsmængden der kan dække Danmarks energiforbrug i et år kan transporteres på en lastbil.

**Planen er at udnytte fusionsenergi om 40 år**



# Dansk fusionsenergiforskning

Integreret del af det Europæiske fusionsprogram koordineret under EUROfusion (Konsordie aftale under Horizon 2020)

Dansk indsats koordineret i DTU Fysik

- Omfattende internationalt samarbejde, stærk international position
- Europæiske fusionsforskningsfaciliteter åben for dansk deltagelse

## Aktiviteter:

Hovedsageligt inden for Plasmafysik og –dynamik : DTU Fysik

Mindre aktiviteter (DTU):

Fusionsmaterialer, høj temperatur superledere

Fusionsenergi indpasning i energiforsyningen

Neutron transport, nuklearfysik

# DTU Fysik – Fusionsplasmafysik

- (i) plasmaturbulens og den associerede transport af partikler og energi
- (ii) undersøgelser af hurtige ioners dynamik i fusionsplasmaer; diagnostik og modellering

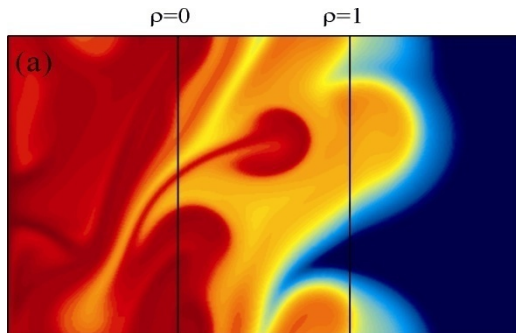
**Højt prioriteret indenfor det internationale fusionssamarbejde**

**Tak for opmærksomheden!**

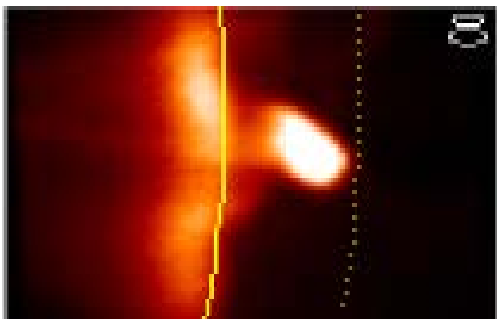
# Extra

# Turbulens og transport i magnetiserede plasma

“Blob” udbrud



Numerisk simulation  
ESEL- Model



Experiment: NSTX

Partikel og energi transport i et varmt magnetiseret plasma er domineret af turbulent transport

Teoretiske og numeriske studier af turbulens og transport, specielt i randområdet

Intermittent transport: Karakteriseret af "udbrud" af koncentrerede "blobs" af plasma

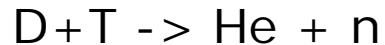
**Formål:**

Forstå og forudsige den turbulente transport. Indflydelsen på plasma indeslutningen og på materialer i kontakt med plasmaet.

# Ion dynamik

## Diagnostik og modellering af energirige ioner:

I en fusionsreaktor kommer opvarmningen fra fusionsalfapartikler (He)



Nødvendigt at måle og forstå ionernes dynamik for at optimere fusionsprocesserne.

## Sammensætning af fusionsbrændstoffet:

Endvidere måles ion sammensætningen v.h.a. tilsvarende diagnostik.

**Kollektive fluktuationer**

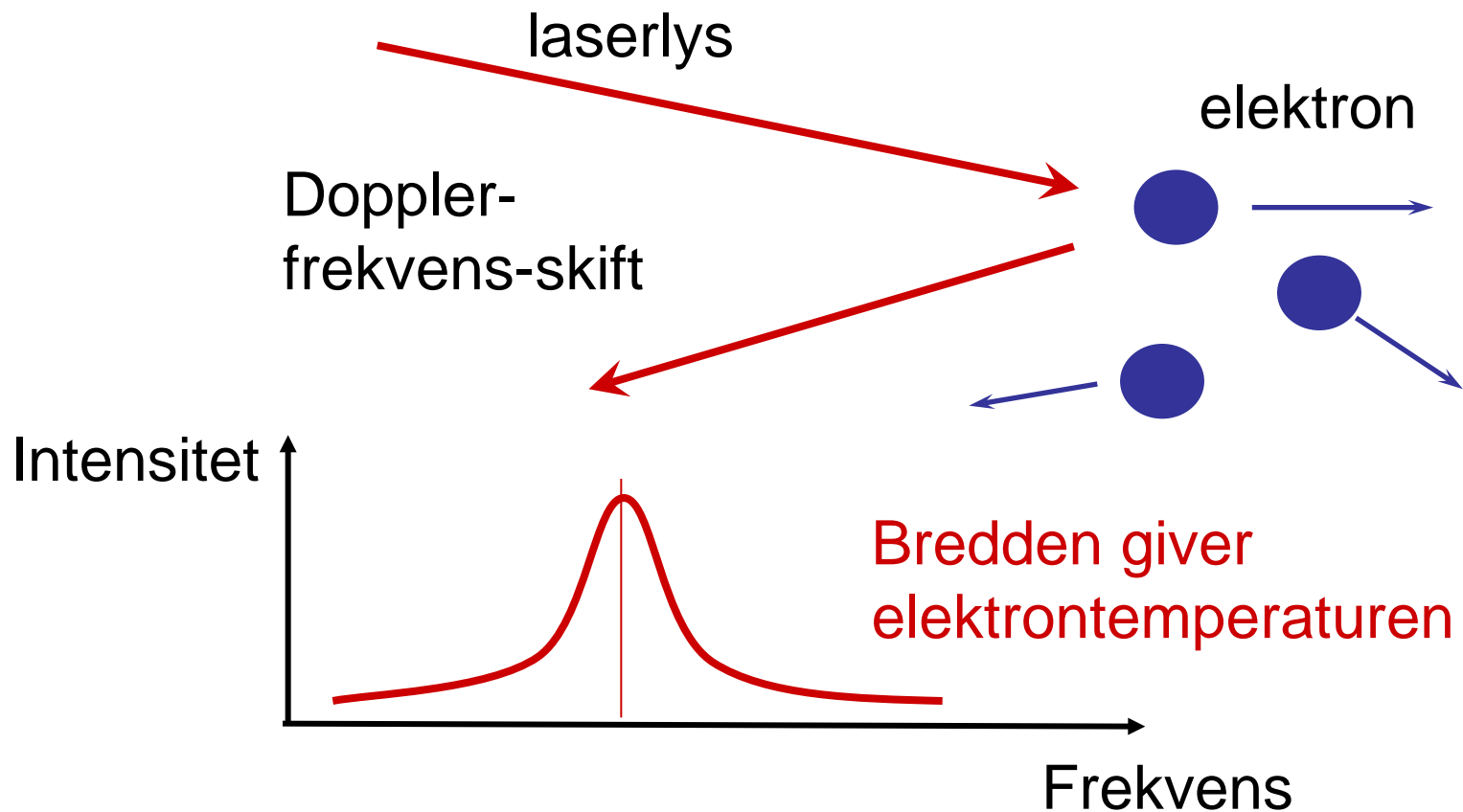
**'Hurtig ion'**





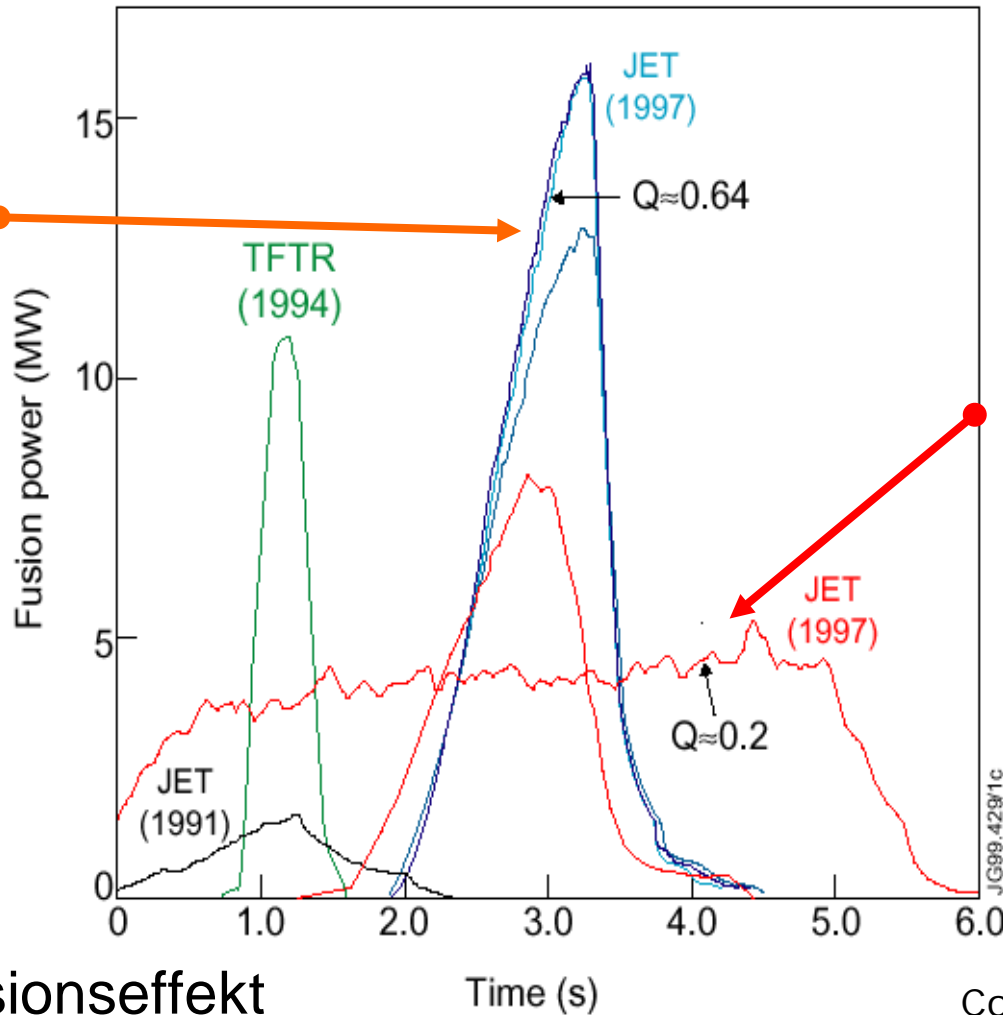
**Hvordan måler man en temperatur på  
200.000.000 ° C?**

# Måling af temperaturer på 200 millioner grader



# Opnåede fusionseffekter i D-T plasmaer

16 MW  
fusionseffekt  
(*rekord*)  
 $Q \sim 0.64$



4 MW fusions-  
effekt.  
Reference-  
regime for ITER

$$Q = \frac{\text{Fusionseffekt}}{\text{Ekstern opvarmningseffekt}}$$

Courtesy of EFDA-JET

<https://www.euro-fusion.org/jet/>