

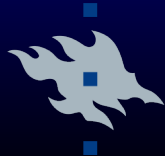
Strålningskador i fusionsreaktormaterial

FM Ville Jansson

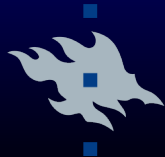
`ville.b.c.jansson@gmail.com`

Helsingfors universitet

23.3.2009

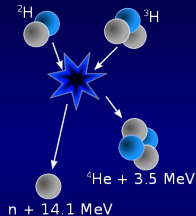


Fusion

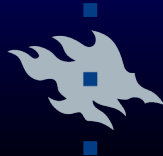


Fusion

- Kärnfysikalisk fusion är när man slår ihop två lätta atomkärnor till en större atom.

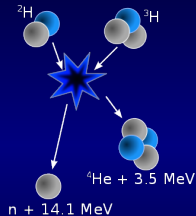


Figur: Deuterium–tritium–fusion.



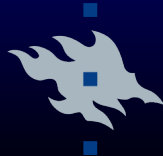
Fusion

- Kärnfysikalisk fusion är när man slår ihop två lätta atomkärnor till en större atom.



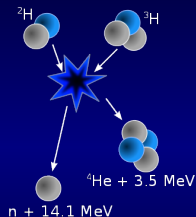
Figur: Deuterium–tritium–fusion.

- En typisk kemisk reaktion som kolförbränning frigör en energimängd på ca 1 eV per atompar.



Fusion

- Kärnfysikalisk fusion är när man slår ihop två lätta atomkärnor till en större atom.



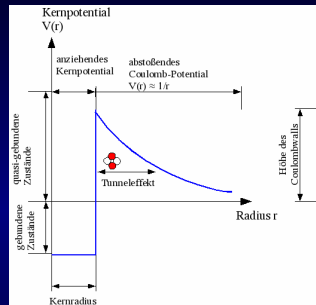
Figur: Deuterium–tritium–fusion.

- En typisk kemisk reaktion som kolförbränning frigör en energimängd på ca 1 eV per atompar.
- En fusionsreaktion frigör ca 10 000 000 eV per atompar.



Metoder för fusion

- ▶ Eftersom Coulomb-barriären måste övervinnas för att fusion mellan två atomkärnor skall kunna ske, måste temperatur och tryck vara tillräckligt höga.
- ▶ Det finns ett flertal sätt att åstadkomma fusion, men alla är inte intressanta för energiproduktion.

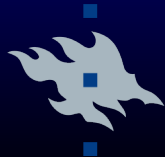


Figur: Coulomb-barriären.



Metoder för fusion

- ▶ Jonacceleratorer och myoninducerad fusion kräver mer energi än de producerar.



Metoder för fusion

- ▶ Jonacceleratorer och myoninducerad fusion kräver mer energi än de producerar.
- ▶ Vätebomben ger förvisso en hel del överskottsenergi, men är aningen svårhanterlig...



Metoder för fusion

- ▶ Jonacceleratorer och myoninducerad fusion kräver mer energi än de producerar.
- ▶ Vätebomben ger förvisso en hel del överskottsenergi, men är aningen svårhanterlig...
- ▶ Laserinducerad fusion och fusion genom magnetisk inslutning är de mest lovande teknikerna..

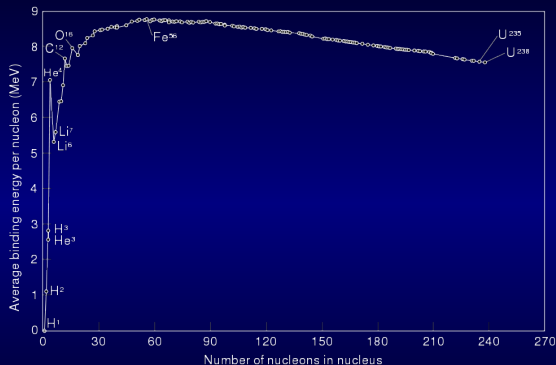


Metoder för fusion

- ▶ Jonacceleratorer och myoninducerad fusion kräver mer energi än de producerar.
- ▶ Vätebomben ger förvisso en hel del överskottsenergi, men är aningen svårhanterlig...
- ▶ Laserinducerad fusion och fusion genom magnetisk inslutning är de mest lovande teknikerna..
- ▶ Magnetisk inslutning möjliggör höga temperaturer vid lågt tryck.



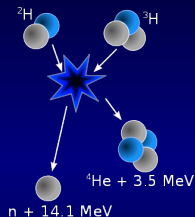
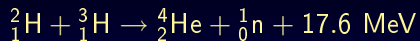
Fusionsreaktioner



Figur: Bindningsenergin för de vanligaste isotoperna.



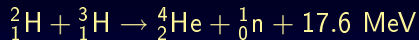
Fusionsreaktionen



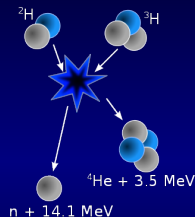
Figur: Deuterium-tritium-fusion.



Fusionsreaktionen



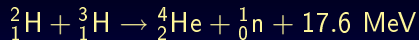
- Största sannolikeheten att reaktionen skall ske är vid en kinetisk energi på 70 keV.



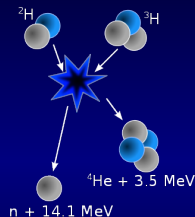
Figur: Deuterium-tritium-fusion.



Fusionsreaktionen



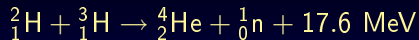
- ▶ Största sannolikheten att reaktionen skall ske är vid en kinetisk energi på 70 keV.
- ▶ En reaktion ger då i bästa fall energi med en faktor 250.



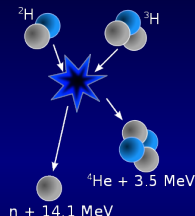
Figur: Deuterium-tritium-fusion.



Fusionsreaktionen



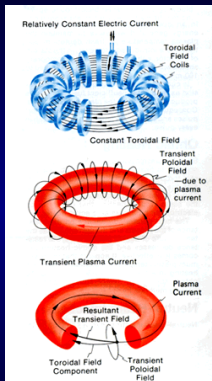
- ▶ Största sannolikheten att reaktionen skall ske är vid en kinetisk energi på 70 keV.
- ▶ En reaktion ger då i bästa fall energi med en faktor 250.
- ▶ 70 keV motsvarar 80 MK.



Figur: Deuterium–tritium–fusion.



Tokamak

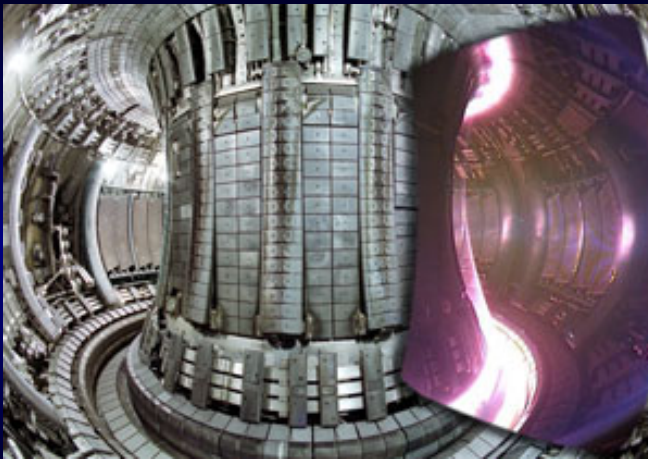


Figur: Magnetfälten och strömmarna i tokamak-kammaren.

- ▶ **Toroidal'naya kamera v magnitnykh katushkakh** — toroidformad kammare med magnetiska spolar.
- ▶ Uppfann på 1950-talet av de sovjetiska fysikerna Igor Yevgenyevich Tamm och Andrei Sakharov.



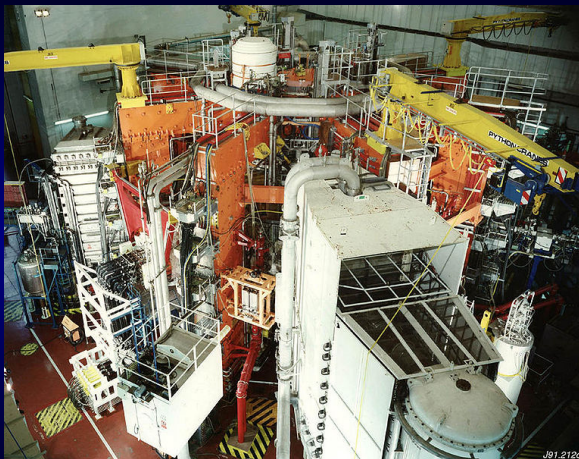
Joint European Torus (JET)



Figur: Tokamak-kammaren i JET.



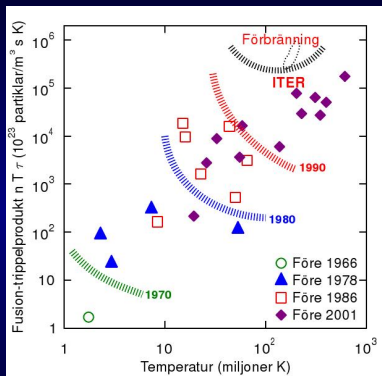
JET



Figur: JETs tokamak-kammare utifrån sett.



Fusion-trippelprodukten



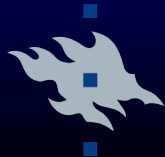
Figur: Fusions-trippelprodukten sedan 1960-talet. Källa: K. Nordlund et al., Fusionsenergi: en framtida energiform?, Reflexer (2008).

- Fusion-trippelprodukten är ett mått på hur lämpligt plasmat i en tokamak är för energiproduktion.
- Trippelprodukten är produkten av plasmats densitet, temperatur och energisammanhållningstid.



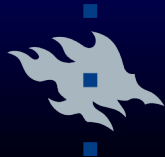
Q-värdet

- ▶ Q -värdet är förhållandet mellan ut- och in-energi.
- ▶ Helst vill man ha $Q = \infty$, "antändning".
- ▶ $Q = 50$ räcker dock.
- ▶ Jet har $Q = 1$.



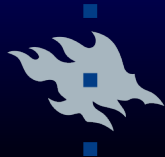
ITER

- ▶ är nästa stora internationella experimentreaktor
- ▶ byggs i Cadarache, Frankrike
- ▶ skall bli klart 2018
- ▶ skall momentärt kunna uppnå $Q = 10$
- ▶ skall kunna producera 500 MW för uppemot 1000 s (JET uppnådde 16 MW för mindre än 1 s)



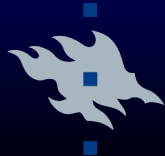
Strålningsskador

- ▶ Reaktörväggarna i en tokamak utsätts för en mycket intensiv bestrålning.



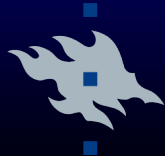
Strålningskador

- ▶ Reaktorväggarna i en tokamak utsätts för en mycket intensiv bestrålning.
- ▶ Elektronerna och jonerna i strålningen har förvisso bara en energi på ca 1 keV, men lyckas ändå sparka loss atomer från väggarna, vilket kallas förstoffning (eng.”sputtering”).



Strålningsskador

- ▶ Reaktorväggarna i en tokamak utsätts för en mycket intensiv bestrålning.
- ▶ Elektronerna och jonerna i strålningen har förvisso bara en energi på ca 1 keV, men lyckas ändå sparka loss atomer från väggarna, vilket kallas förstoffning (eng.”sputtering”).
- ▶ Förstoffningen orsakar för närvarande en erosion av väggarna, som kan vara så hög som $3 \cdot 10^{-6}$ cm/s — eller ca en meter på ett år.



Strålningsskador

- ▶ Reaktorväggarna i en tokamak utsätts för en mycket intensiv bestrålning.
- ▶ Elektronerna och jonerna i strålningen har förvisso bara en energi på ca 1 keV, men lyckas ändå sparka loss atomer från väggarna, vilket kallas förstoffning (eng.”sputtering”).
- ▶ Förstoffningen orsakar för närvarande en erosion av väggarna, som kan vara så hög som $3 \cdot 10^{-6}$ cm/s — eller ca en meter på ett år.
- ▶ De utsparkade atomerna kyler även ner plasmat med en effekt som skalas som Z^4 .



Strålningsskador

- ▶ Reaktörväggarna i en tokamak utsätts för en mycket intensiv bestrålning.
- ▶ Elektronerna och jonerna i strålningen har förvisso bara en energi på ca 1 keV, men lyckas ändå sparka loss atomer från väggarna, vilket kallas förstoffning (eng.”sputtering”).
- ▶ Förstoffningen orsakar för närvarande en erosion av väggarna, som kan vara så hög som $3 \cdot 10^{-6}$ cm/s — eller ca en meter på ett år.
- ▶ De utsparkade atomerna kyler även ner plasmat med en effekt som skalas som Z^4 .
- ▶ Om tritium (T) binds in i väggen blir väggen radioaktiv. T har en halveringstid på 12,5 år.

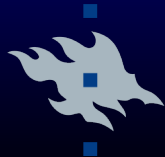


Strålningsskador

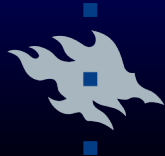
- ▶ Reaktörväggarna i en tokamak utsätts för en mycket intensiv bestrålning.
- ▶ Elektronerna och jonerna i strålningen har förvisso bara en energi på ca 1 keV, men lyckas ändå sparka loss atomer från väggarna, vilket kallas förstoffning (eng.”sputtering”).
- ▶ Förstoffningen orsakar för närvarande en erosion av väggarna, som kan vara så hög som $3 \cdot 10^{-6}$ cm/s — eller ca en meter på ett år.
- ▶ De utsparkade atomerna kyler även ner plasmat med en effekt som skalas som Z^4 .
- ▶ Om tritium (T) binds in i väggen blir väggen radioaktiv. T har en halveringstid på 12,5 år.
- ▶ T värmer även upp väggen med en effekter > 10 MW/m² — mer än 1000 gånger värmeeffekten i en vanlig kokplatta.



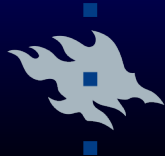
- ▶ Reaktormaterialet måste ha en hög smältpunkt och en god värmeledningsförmåga.



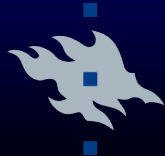
- ▶ Reaktormaterialet måste ha en hög smältpunkt och en god värmeledningsförmåga.
- ▶ En god kandidat med dessa egenskaper har varit kol i grafitform.



- ▶ Reaktormaterialet måste ha en hög smältpunkt och en god värmeledningsförmåga.
- ▶ En god kandidat med dessa egenskaper har varit kol i grafitform.
- ▶ Grafit användes länge för divertorerna.



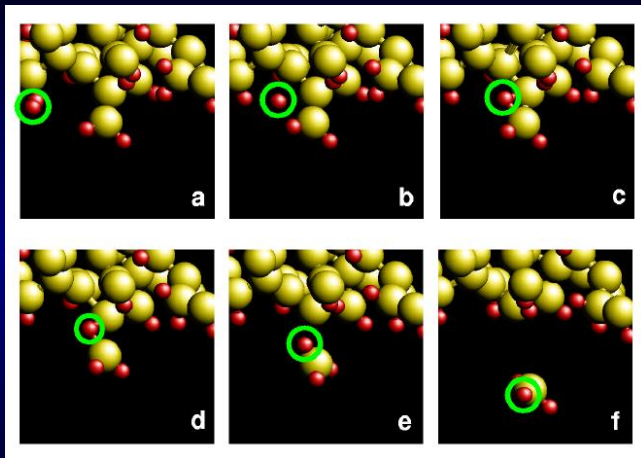
- ▶ Reaktormaterialet måste ha en hög smältpunkt och en god värmeledningsförmåga.
- ▶ En god kandidat med dessa egenskaper har varit kol i grafitform.
- ▶ Grafit användes länge för divertorerna.
- ▶ Grafit skulle enligt beräkningarna ha liten förstöfningsgrad, men det visade sig vara fel.



- ▶ Reaktormaterialet måste ha en hög smältpunkt och en god värmeledningsförmåga.
- ▶ En god kandidat med dessa egenskaper har varit kol i grafitform.
- ▶ Grafit användes länge för divertorerna.
- ▶ Grafit skulle enligt beräkningarna ha liten förstöfningsgrad, men det visade sig vara fel.
- ▶ Kol föstoffsas mycket snabbt och bildar även kolfilmer med tritium och blir ett aktiveringsproblem.



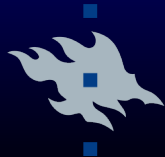
Kolförstörning



Figur: En förstöringsmekanism för kol. Från Emppu Salonen's doktorsavhandling, Helsingfors universitet (2002).



Neutronstrålning



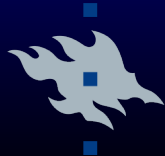
Neutronstrålning

- ▶ Neutronerna som bildas i $D + T$ –fusionsreaktionen har en energi på 14 MeV.



Neutronstrålning

- ▶ Neutronerna som bildas i $D + T$ –fusionsreaktionen har en energi på 14 MeV.
- ▶ De kan penetrera reaktorväggarna flera meter.



Neutronstrålning

- ▶ Neutronerna som bildas i $D + T$ –fusionsreaktionen har en energi på 14 MeV.
- ▶ De kan penetrera reaktorväggarna flera meter.
- ▶ Neutronerna kan ge andra atomer energier på 100 keV vid kollisioner och dessa i sin tur orsakar strålningsskador inne i materialet.



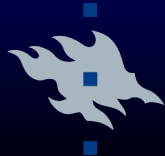
Neutronstrålning

- ▶ Neutronerna som bildas i $D + T$ –fusionsreaktionen har en energi på 14 MeV.
- ▶ De kan penetrera reaktorväggarna flera meter.
- ▶ Neutronerna kan ge andra atomer energier på 100 keV vid kollisioner och dessa i sin tur orsakar strålningsskador inne i materialet.
- ▶ Skadorna har formen av små dislokationer, som är rörliga och kan växelverka med varandra.

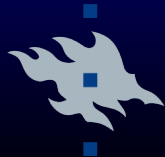


Neutronstrålning

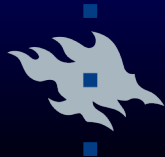
- ▶ Neutronerna som bildas i $D + T$ –fusionsreaktionen har en energi på 14 MeV.
- ▶ De kan penetrera reaktorväggarna flera meter.
- ▶ Neutronerna kan ge andra atomer energier på 100 keV vid kollisioner och dessa i sin tur orsakar strålningsskador inne i materialet.
- ▶ Skadorna har formen av små dislokationer, som är rörliga och kan växelverka med varandra.
- ▶ Skadorna gör väggen hårdare, men också skörare, och kan orsaka sprickor så att väggen går sönder.



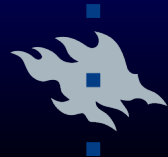
- ▶ Även i fissonsreaktorer förekommer samma problem med neutronsador.



- ▶ Även i fissonsreaktorer förekommer samma problem med neutronsador.
- ▶ Där kan sprickor repareras genom att väggarna hettas upp.



- ▶ Även i fissonsreaktorer förekommer samma problem med neutronsador.
- ▶ Där kan sprickor repareras genom att väggarna hettas upp.
- ▶ Detsamma kan göras i fusionsreaktorer, men där är skadorna större och kan inte alltid fås bort.



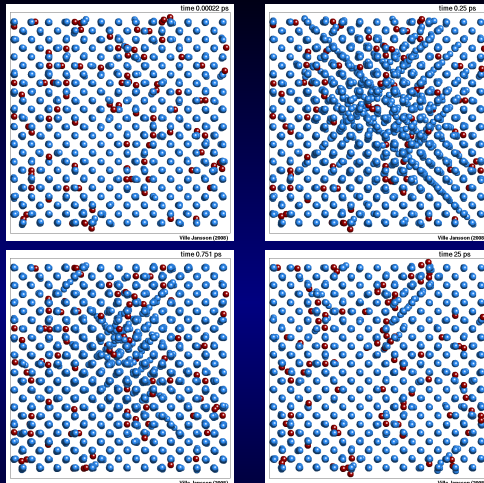
- ▶ Även i fissonsreaktorer förekommer samma problem med neutronsador.
- ▶ Där kan sprickor repareras genom att väggarna hettas upp.
- ▶ Detsamma kan göras i fusionsreaktorer, men där är skadorna större och kan inte alltid fås bort.
- ▶ Som lösning på problemet försöker man forska fram nya stålvarianter som skall tåla strålningen bättre.



Volfram

- ▶ W kommer att vara den viktigaste komponenten i divertorerna i ITER.
- ▶ Förstoffning av W är mycket mindre än för grafit.
- ▶ Tritium har svårare att binda sig i en vägg av W.
- ▶ Å andra sidan kylv utsparkade W-atomer ner plasmat fortare än C-atomer.
- ▶ Neutroner kommer att skapa He-atomer inne i W-materialet genom kärnprocesser, vilket också kommer att förändra W-materialets egenskaper.





Figur: En simulation av en kollisionskaskad mot ett gitter med volfram-atomer (blå) och 1 % interstitiella helium-atomer (röda)



Interstitiella W-atomer i W-He-gitter efter kaskader

Potential	Rent W	W och He
Finnis–Sinclair	3.3+-0.3	4.11+-0.14
Dudarev–Björkas		6.06+-0.16
Juslin		3.82+-0.11

Figur: Interstitiella W-atomer efter kaskader med energin 2 keV mot ett W-gitter med 1% He.



Summering

