

Kan vi bygge en sol på Jorden?

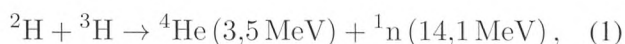
Alexander S. Thrysoe, DTU Fysik

Energiproduktion fra fusion i et kraftværk vil potentielt give en energikilde, som er ren, bæredygtig og sikker. Det er imidlertid endnu ikke lykkedes at producere mere energi fra fusion, end hvad systemet har skullet have tilført for at opretholde fusionsprocessen. En af de essentielle parametre for realisering af fusion som energikilde er en bedre forståelse af transportprocesserne på kanten af fusionsplasmaet, herunder plasmaets interaktion med elektrisk neutrale atomer og molekyler.

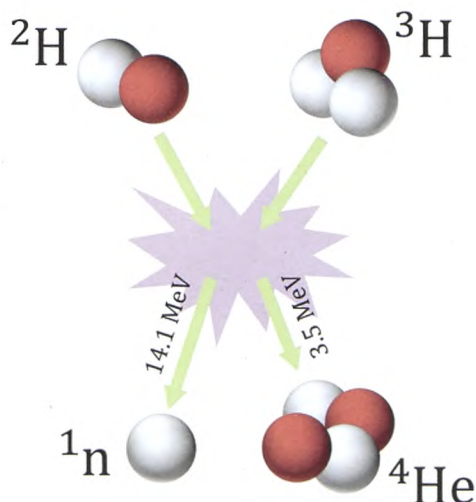
Energi fra fusion

Når lette grundstoffer fusionerer til tungere, frigives store energimængder. Det er denne proces, som driver Solen og de andre stjerner, hvor brintkerner gennem flere trin fusionerer til helium. Det er også muligt at skabe betingelserne for fusion her på Jorden. Verdens største forsøgsreaktor er lokaliseret i England, og er det varmeste sted i solsystemet.

Denne varmere rekord holdes naturligvis kun imens eksperimenterne står på. For at maksimere reaktions-tværsnittet for fusionsprocesserne kræves, at fusionen finder sted mellem brintisotoperne deuterium (^2H) og tritium (^3H), samt at temperaturen er omkring 150 mio. $^{\circ}\text{C}$ – dette er ti gange varmere end Solens centrum. Ved denne energi kan de positivt ladede kerner overkomme deres indbyrdes Coulomb-frastødning og fusionere ofte nok til, at fusion vil kunne give netto energiproduktion. I fusionsprocessen omdannes deuterium og tritium til helium (^4He) og en fri neutron



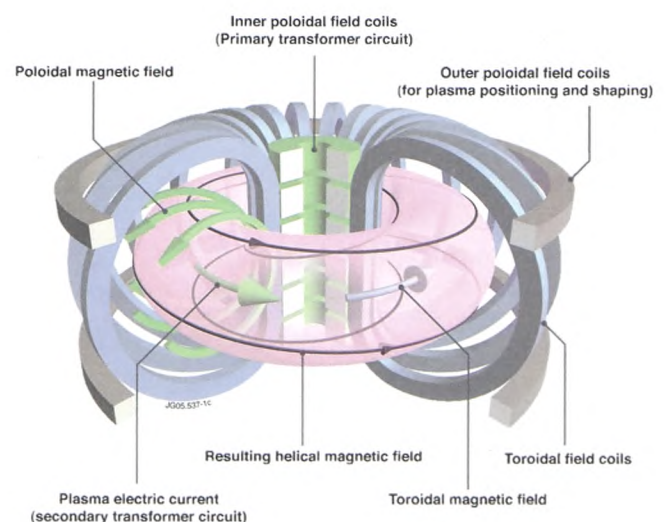
som vist i figur 1. Neutronen bærer 80 % af de 17,6 MeV som frigives ved reaktionen, og vil i et fremtidigt kraftværk efterfølgende afgive sin energi som varme i kølevand, som igen vil blive brugt til at drive en turbine og producere elektricitet.



Figur 1. Fusion mellem brintisotoperne deuterium og tritium frigiver 17,6 MeV kinetisk energi. 80 % af energien bærer den resulterende neutron, mens α -partiklen bærer de resterende 20 %.

Den høje temperatur gør det imidlertid svært at fastholde brændstoffet – det er ikke muligt at bygge en beholder, som vil kunne modstå temperaturer i nærheden af disse, og selv hvis dette var muligt, ville de fusionerende partikler miste deres energi ved kollisioner med væggen. Der er dog hjælp at hente fra naturens side. Brændstoffet er så varmt, at det er et plasma – en tilstandsform, hvor elektroner og atomkerner ikke længere er bundet til hinanden som i atomer, men derimod bevæger sig 'frit' imellem hinanden og vekselvirker via elektromagnetiske kræfter. Idet det varme fusionsplasma har frie ladninger kan det bære en elektrisk strøm, og derfor også manipuleres med eksterne elektriske og magnetiske felter.

Der er eksperimenteret med forskellige mulige konfigurationer til magnetisk indeslutning af plasma, og den som der indtil nu er forsket mest i, er den såkaldte tokamak. I en tokamak indesluttet plasmaet i et toroidalt (donut-formet) snoet magnetfelt, se figur 2. De ladede partikler vil bevæge sig i helixer omkring de lukkede magnetfeltlinjer i tokamakken, hvilket betyder at plasmaet i princippet er indesluttet og ikke i kontakt med maskinens væg. Det førnævnte eksperiment i England, Joint European Torus (JET), er en tokamak.



Figur 2. Magneter skaber et toroidalt magnetfelt, og den indre spole driver en toroidal strøm og danner derved et poloidalt magnetfelt. Det resulterende spiralformede magnetfelt er karakteristisk for en tokamak. Fra www.eurofusion.org/2011/09/tokamak-principle-2/.

Tokamakens energiregnskab

Det har vist sig, at indeslutningen af plasma, i en tokamak ikke er perfekt, og der er tab af partikler og energi via forskellige transportmekanismer, dvs. forskellige typer transport (klassisk, neo-klassisk, turbulent), som alle giver tab af partikler og energi. Derfor er det nødvendigt at tilføre mere brændstof og energi til fusionsplasmaet, hvis dette skal opretholdes. Et simpelt energiregnskab giver ændringen i den indesluttede energi E ved

$$\frac{dE}{dt} = P_{\text{opvarmning}} - P_{\text{tab}}, \quad (2)$$

hvor $P_{\text{opvarmning}}$ beskriver tilførelsen af energi til systemet, og P_{tab} beskriver tab af energi grundet transport af energi væk fra det indesluttede område. Energien til opvarmning kan enten komme internt fra de resterende 3,5 MeV per fusionsproces, som bæres af det resulterende helium, eller eksternt via forskellige mulige opvarmningsmetoder.

Energitabsleddet kan skrives

$$P_{\text{tab}} = \frac{E}{\tau_E}, \quad (3)$$

hvor τ_E er den såkaldte energiindeslutningstid – et mål for hvor hurtigt plasmaet mister sin energi til omgivelserne, hvis det ikke opvarmes. Energiindeslutningstiden er en af tre essentielle parametre for energiproduktion fra fusionsenergi. De resterende to parametre er iontætheden, n_i , og iontemperaturen, T_i . Det såkaldte Lawson-kriterium [1] siger, at produktet af disse tre parametre skal have en vis størrelse:

$$n_i k T_i \tau_E \geq 1,5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}, \quad (4)$$

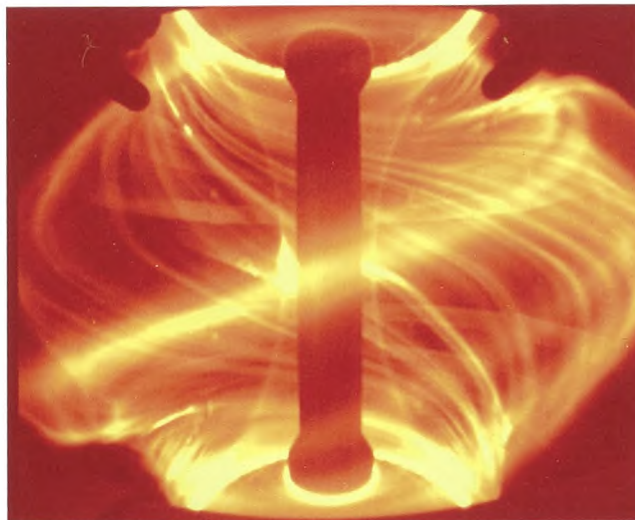
for tilstrækkeligt høje temperaturer, for at producere lige så meget energi fra fusion, som der forlader systemet gennem P_{tab} . Ovenstående produkt kaldes tripelproduktet, og er uligheden opfyldt, når det såkaldte break-even. Det er endnu ikke lykkedes at opnå break-even i de nuværende testreaktorer, men JET er den maskine, som er kommet tættest på. I 1997 lykkedes det forskere på JET at producere en effekt fra fusion svarende til 65 % af den tilførte effekt. Dette er stadig rekorden.

Transport af energi og partikler

Grunden til at vi ikke har fusionsenergi i et kraftværk endnu er, at det endnu ikke er lykkedes at få et tripelprodukt, som er stort nok til at opfylde ligning (4) (i realiteten skal tripelproduktet faktisk være ca. 5 gange større end for break-even, for at fusionsplasmaet kan opretholde den nødvendige temperatur). Der er fysiske begrænsninger for hvor store n_i og T_i kan være i en tokamak, hvorfor der forskes meget i, hvilke transportmekanismer som modvirker en stor værdi af energiindeslutningstiden τ_E og dermed et stort tripelprodukt.

Det har vist sig, at transport af partikler og energi væk fra det indesluttede plasma primært sker via filamenter af plasma (blobs) [2], som strækker sig langs magnetfeltlinjerne, og udbreder sig radiale vinkelret på magnetfeltet ud gennem det såkaldte scrape-off lag

(SOL) mod kammerets væg. SOL betegner området mellem det indesluttede plasma og kammerets væg, hvor magnetfeltlinjerne ikke slutter på sig selv, men i stedet på materialeoverflader og derfor ikke kan indeslutte plasmaet. Det er muligt at observere filamenterne i en tokamak med et højhastighedskamera, da det varme plasma exciterer omkringliggende koldere atomer, som derefter udsender lys i det synlige område. Dette er illustreret i figur 3 i et helt nyt billede fra april 2017.



Figur 3. Plasma i tokamakken MAST, hvor filamenter som følger magnetfeltlinjerne tydeligt ses ved kanten af det indesluttede plasma. Billedet er ikke i naturlige farver. (Culham Centre for Fusion Energy, www.ccfef.ac.uk/taming_elms.aspx).

At forstå mekanismerne der styrer kanten af plasmaet, og specielt hvordan blobs dannes og udbreder sig, er en essentiel gren af fusionsforskningen. Det er gennem blobs at plasmaet vekselvirker med det omkringliggende miljø, og f.eks. måleudstyr kan blive beskadiget ved kontakt med meget store og varme filamenter. Derudover virker plasmaet på randen som en grænsebetingelse til det indesluttede plasma, og har stor indflydelse på de overordnede indeslutningsparametre. Forskningsgruppen for plasmafysik og fusionsenergi (PPFE) ved DTU Fysik har udviklet en plasmamodel, "hot edge-sol-electrostatic" (HESEL)-modellen, som beskriver transport af plasma ved randen af et fusionsplasma. Det er med denne model muligt at simulere blobs, og derved få en bedre forståelse for transport af partikler og energi i et fusionsplasma.

I plasmafysik anvendes typisk modeller af forskellig detaljegråd afhængig af, hvilke fysiske fænomener modellen forventes at beskrive. Nær den ene ende af spektret findes de kinetiske modeller, som giver udviklingen i elektronernes og ionernes fordelingsfunktioner, og i den modsatte ende er magnetohydrodynamik (MHD)-modellerne, hvor plasmaet antages at være et elektrisk ledende fluid. Sidstnævnte findes ved at tage hastighedsmomenter af det kinetiske ligningssystem, hvilket reducerer antallet af variable og derfor tillader at simulere et større domæne, men i mindre detalje, med samme regnekraft. Midt imellem de to nævnte modeller findes "plasma fluid"-modellerne, som ligeledes er udledt fra den kinetiske ligning, men som

beskriver elektronerne og ionerne som adskilte fluider, med hver deres termodynamiske variable såsom tæthed og temperatur.

HESEL er en fluidmodel, der beskriver hvordan tæthed, vorticitet, og ion- og elektrontemperatur udvikler sig. Den kan beskrive formationen og udviklingen af blobs i et todimensionelt domæne, som dækker kanten af det indesluttede plasma og SOL området udenfor, som illustreret for elektrontætheden i øverste plot i figur 4. Det er til mange formål tilstrækkeligt kun at simulere det todimensionelle plan vinkelret på magnetfeltlinjerne, idet der er en høj grad af symmetri i magnetfeltets retning. Dette tillader at parameterisere felterne parallelt med magnetfeltet frem for at køre en fuld tredimensionel simulering.

Når varmt møder koldt

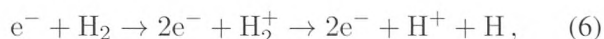
I det fysiske område beskrevet i HESEL-modellen, som omfatter randen af det indesluttede plasma og SOL området udenfor, er plasmaet imidlertid også koldt nok til, at der også eksisterer en anseelig population af elektrisk neutrale atomer og molekyler. I en tokamak opstår neutrale partikler enten ved at plasma fra blobs bliver afkølet ved kontakt med væggen og rekombinerer til atomer, eller de kan være tilført udefra med det formål at øge tætheden i plasmaet. Effekten af de neutrales interaktion med plasmaet er imidlertid ikke en del af den oprindelige HESEL-model, men er i de seneste år

blevet undersøgt, og formuleret i en kombineret plasma-neutral fluidmodel [3].

I den kombinerede model beskrives de vigtigste vekselvirkninger mellem neutrale atomer og molekyler, og ladede ioner og elektroner. Modellen indeholder dissociering af molekyler til atomer



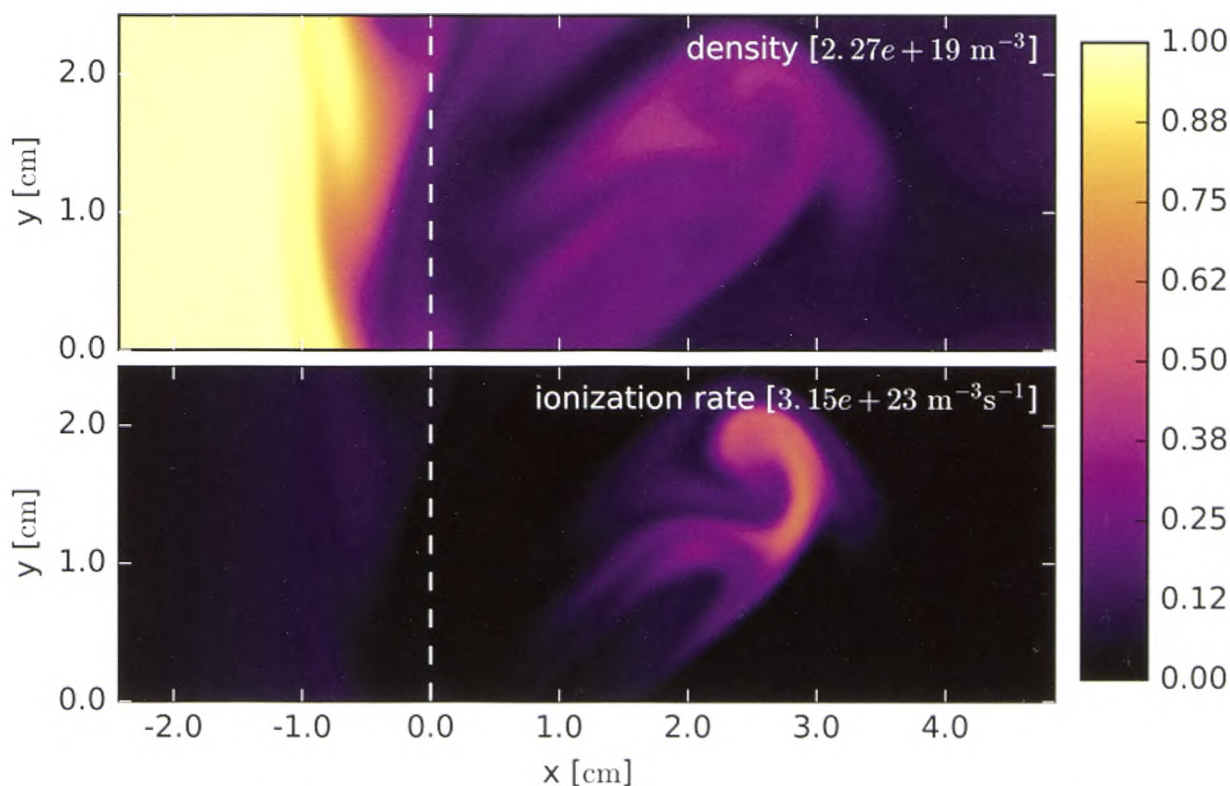
ionisering (evt. efterfulgt af dissociering) af molekyler og atomer



og de såkaldte ladnings-bytte-kollisioner, hvor en varm ion modtager en elektron fra et koldt atom, hvilket resulterer i en kold ion og et varmt atom



I reaktionsligningerne ovenfor henviser e^- til elektroner, og H til brintisotoper, fx deuterium eller tritium. Der er naturligvis et væld af andre reaktioner som kan finde sted, heriblandt excitationer af atomer og molekyler, men ovenstående vekselvirkninger er tilstrækkelige til at beskrive en række centrale effekter.



Figur 4. Simulering af plasmataetheden (øverst) og ioniseringsraten (nederst), i et domæne vinkelret på magnetfeltlinjerne, som strækker sig fra plasma-kanten (til venstre for den stiplede linje) og dækker SOL-området udenfor det indesluttede plasma (til højre for den stiplede linje). Det ses hvordan en blob omkring 2-3 cm udenfor det indesluttede plasma ioniserer de neutrale partikler, inden de når det indesluttede område med lukkede magnetfeltlinjer.

En af disse er en vurdering af, hvor i maskinen neutrale partikler bliver ioniseret. Dette er et vigtigt estimat, idet ioniseringer i SOL-området ikke bidrager til at opretholde plasmataetheden og dermed et højt tripelprodukt. Ionisering udenfor det indesluttede område kan finde sted når varme blobs propagerer igennem gassen af neutrale partikler, hvilket i første omgang tyder på, at blobs er med til at sænke effektiviteten af brændseltilførslen til det indesluttede plasma. Figur 4 viser et plot fra en simulering af den kombinerede plasma-neutral-model; her ses det, hvordan en blob lokalt ioniserer langt mere end plasmaet i det øvrige domæne, og således fjerner partikler fra den neutrale population udenfor det indesluttede område. Det viser sig imidlertid også, at blobs gennem ladningsbytte-effekten beskrevet i ligning (8) producerer en population af meget varme neutrale atomer. De varme atomer har en lang fri middelvejlængde, hvilket tillader dem lettere at nå gennem SOL området og ind i det indesluttede plasma, og derved øge effektiviteten af brændseltilførslen.

De to beskrevne effekter på brændseltilførslen vil mere eller mindre udligne hinanden, men vekselvirkningerne har også en effekt på plasma filamenterne. Disse bliver større, koldere og langsommere gennem vekselvirkninger med neutrale partikler. Dette kan igen få betydning for, hvordan plasmaet i blobs vil rekombinere på væggen og danne nye neutrale partikler.

Vejen til fusionenergi

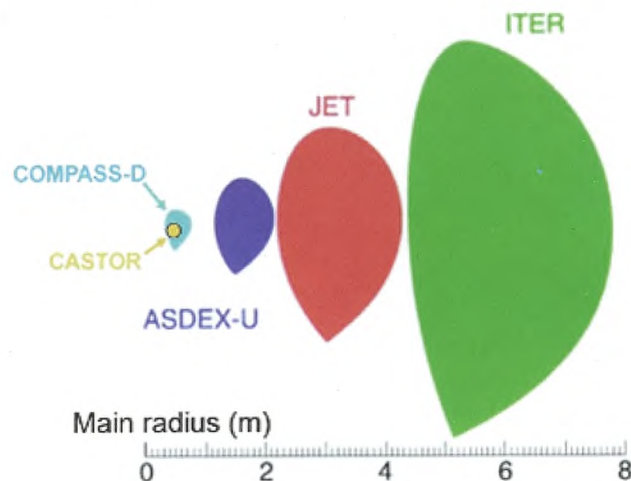
En bedre forståelse af dynamikken på kanten af plasmaet, og de neutrale partiklers indvirkning herpå, er blot en enkel brik i et stort puslespil. Målet om at skabe et fusionsplasma, hvori der produceres mere energi end der tilføres, er ikke nået endnu, men vi er godt på vej.

I det sydlige Frankrig samarbejder 35 nationer om at opføre en tokamak, der er langt større end de testreaktorer, som har været brugt til eksperimenter hidtil. Projektet går under navnet ITER [4] ('sti' på latin), og er måske det mest ambitiøse energiprojekt i Verden. Maskinen kommer til at være 30 m høj og veje over 23.000 tons, og får et plasma volumen på 840 m^3 – langt større end JET's 100 m^3 . Til sammenligning er et tværsnit af plasmavoluminet og dets afstand fra centrum af maskinen vist for udvalgte eksisterende tokamakker og ITER i figur 5.

Budgettet for ITER er 15 milliarder euro, og det forventes at det første plasmaeksperiment udføres i 2025. Det vil i første omgang være eksperimenter udelukkende med hydrogen-plasma, hvori antallet af fusionsprocesser vil være begrænset. 10 år senere, i 2035, vil eksperimenter med både deuterium og tritium påbegyndes, og det er her ITER skal vise, at det er muligt at skabe et overskud af energi fra fusion.

ITER er designet til at producere 500 MW fusions-effekt, og dermed levere en effekt 10 gange høje-

re, end hvad der bruges til opvarmning af plasmaet. Dette vil give et tripelprodukt på $n_i k T_i \tau_E \approx 5,4 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$. Lever ITER op til forventningerne, er det planen at det første fusionskraftværk skal levere strøm til elnettet i 2050.



Figur 5. Tværsnit af plasmavoluminet og dets afstand fra centrum for udvalgte tokamakker og ITER. Tværsnittet af plasmaet er typisk ikke cirkulært, men snarere D-formet. Fra [5].

Litteratur

- [1] M. Kikuchi, K. Lackner, M.Q. Tran (red.). *Fusion Physics*. IAEA, Vienna, 2012.
http://www-pub.iaea.org/MTCDB/Publications/PDF/Pub1562_web.pdf
- [2] S.J. Zweben et al. (2007), *Plasma Phys. Control. Fusion* bind **49**.
<http://dx.doi.org/10.1088/0741-3335/49/7/S01>.
- [3] A.S. Thrysoe et al. (2016), *Plasma Phys. Control. Fusion* bind **58**
<http://dx.doi.org/10.1088/0741-3335/58/4/044010>.
- [4] ITER's website, <https://www.iter.org>.
- [5] COMPASS Tokamak, Institute of Plasma Physics of the Czech Academy of Sciences,
http://www.ipp.cas.cz/vedeck_a_struktura_uhf/tokamak/tokamak_compass/



Alexander Simon Thrysoe er ph.d.-studerende i gruppen for plasmafysik og fusionsenergi ved DTU Fysik. Han arbejder med modellering af vekselvirkninger mellem plasma og neutrale partikler ved randen af magnetisk indesluttede fusionsplasmaer.