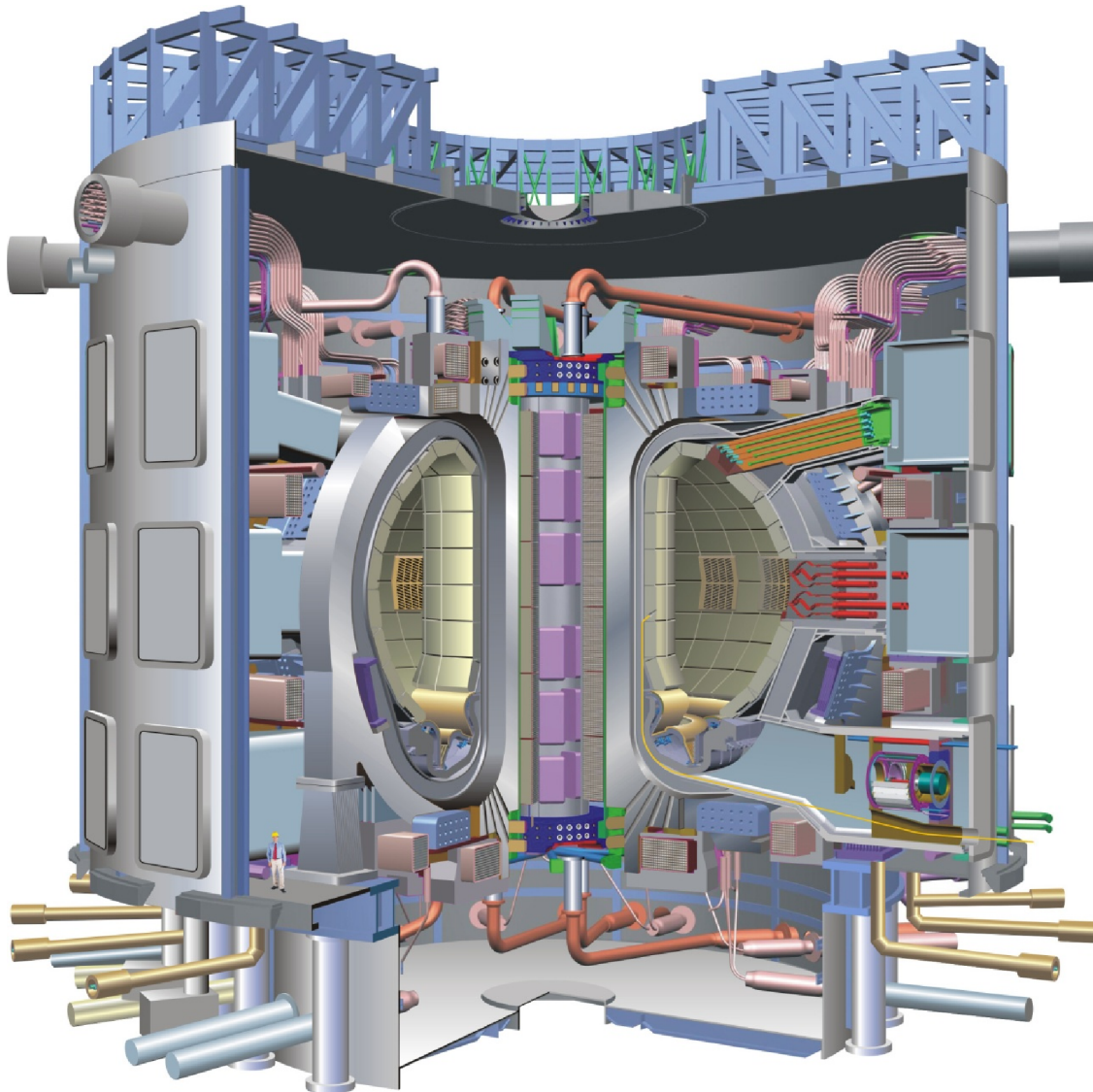


Kjarnasamrunaofnar



Mynd 1 Sýnir teikningu af fyrirhuguðum ITER tokamak [9]

Hægt er að slá því nokkurn veginn sem föstu að öll orka sem maðurinn nýtir eigi rætur sínar að rekja til kjarnasamruna. Sólin geislar orku, sem sprottinn er af samruna, til jarðarinnar til að knýja vatnshringrás sem við nýtum svo sem vatnsafl, plöntur og svif ljóstillífa, stækka, deyja og mynda olíu og kol, sem við brennum til að knýja farartæki og rafala og svo mætti lengi telja. Töluvert meiri orkuþéttleiki, það er orka á massaeiningu, býr þó í kjarnaklofnun heldur en í bruna á kolefnum, en þungu efnin sem koma þar við sögu eru afsprengi samruna léttari frumefna í innviðum stjarna. Byrjað var að nýta kjarnorku í lok síðari heimstyrjaldarinnar, fyrst í sprengjur og loks nokkrum árum síðar sem orkugjafa, í kjarnakljúfum. Af hverju eigum við þó aðeins nýta okkur afurðir þessarar móðurorku, sem kjarnasamruninn er, í stað þess að nýta hana beint sjálfa.

Fljótt á litið getur kjarnasamruni verið gífurlega hagstæður og oft verið nefnd sem hugsanleg lausn mannsins við orkukreppunni sem nú blasir við mannkyninu. Mesti orkuþéttleiki sem þekktist, fyrir utan algera umbreytingu massa í orku í árekstrum efnis og andefnis, er að finna í kjarnasamruna. Hráefni í samrunann eru léttustu frumefnin sem í flestum tilvikum er gnótt af á jörðinni og tiltölulega ódýrt að afla í miklu magni. Ofan á þessa kosti eru svo umhverfisáhrif talin mjög takmörkuð og úrgangurinn á formi sem auðvelt er að halda í skefjum. Sagan er ekki öll sögð á þessu stigi því gífurlegir tæknilegir örðuleikar koma í ljós þegar á að fara að koma samrunanum á nýtanlegt form og þrátt fyrir miklar tækniframfarir, meðal annars í kjarnakljúfum, síðustu 7 áratugina erum við ennþá á algeru tilraunastigi þegar kemur að nýtingu kjarnasamruna sem beinan orkugjafa.

Kjarnasamruni

Eins og vel er þekkt fyrir kjarnklofnun losnar orka þegar einn stór kjarni, eins og ^{235}U , klofnar í tvo minni auk stakra nifteinda og er orkan nýtt í kjarnakljúfum. Sama gildir um minnstu kjarnanna, nema í öfuga átt. Þegar tveir litlir kjarnar koma nægilega nálægt hvor öðrum, svo að kjarnakrafturinn verði sterkari en Coulumb krafturinn, bindast þeir og í leiðinni losnar orka. Orkan sem losnar í þessum hvörfum kemur frá massarýrnun af samanlögðum massa eindanna fyrir og eftir hvarfið. Almennt eru kjarnasamrunahvörf skrifuð, ekki ósvipað efnahvörfum,



þar sem Q er orkulosunin í hvarfinu, þar sem við höfum bara áhuga á útvermum ferlum, og Q_+ er tilgreind sú orka sem losnar sem hlaðnar agnir. Stundum er þó orka hveirrar myndagnar gefinn í sviga fyrir aftan hana. Þessi ferli verða að hlýða ákveðnum varðveislulögmálum til að þau séu bæði möguleg og áhugaverð fyrir kjarnasamruna rannsóknir. Þannig verður fjöldi kjarneinda og hleðsla að vera varðveitt sem leiðir til þess að fjöldi róteinda og nifteinda verður varðveittur hvor fyrir sig. Þá þarf skriðþungi og hverfiþungi að vera varðveittur sem og orka sem leiðir til þess að í útvermum hvörfum verður hreyfiorka myndagnanna, C og D , meiri en upprunalegu hvarfagnanna. Orkan sem losnar í hvarfinu er þá tengd hinni frægu orku-massaígildis jöfnu Einseins

$$E = mc^2.$$

Orku Einsteins er þá hægt að skrifa út frá mössum hvarfefnanna í (1)

$$Q = [(M_A + M_B) - (M_C + M_D)] c^2 = \Delta Mc^2$$

Þannig að hvíldarmassamunur hvarfagna og myndagna er borinn burt úr hvarfinu sem aukin hreyfiorka myndagnanna. Í þeim ferlum sem áhugaverð eru til nýtingar er orkulosunin 1 til 22 MeV á hvert hvarf.

Að auki við varðveislulögmálin hér að ofan þarf kjarnspuni hvarfefnanna að leggjast saman á sérstakan hátt til að hvarfið geti átt sér stað. Þetta á einnig við hverfiþunga kjarnanna sem auk spunans er gert ráð fyrir að séu handahófskenndir. Þetta hefur áhrif á þversnið kjarnasamruna, það er hve líklegir þeir eru.

Þar sem báðir kjarnarnir eru jákvætt hlaðnir vegna róteinda þurfa þeir að yfirstíga Coulomb þröskuld til að kjarnakrafturinn geti yfirtekið og haldið þeim saman. Orka Coulomb mættis er almennt

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Þar sem e er einingarhleðsla, $Z_{1,2}$ er hleðslutala hvors kjarna fyrir sig og r er fjarlægðin á milli þeirra. Kjarnarnir þurfa því að komast í vissa nálægð, svokallað virkt kjarnaþvermál R_0 , þar sem kjarnakrafturinn nær yfirhöndinni. Því fáum við að orkan sem þarf til að þetta geti gerst er

$$E_{max} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R_0}.$$

Þetta kjarnaþvermál er $R_0 \approx 5 \cdot 10^{-15} m$ sem er á stærðarbilinu 10^4 minna en Bohr radíusinn. Með þessa fjarlægð milli kjarnann fæst að Coulomb þröskuldurinn er

$$E_{max} \approx 0,28 Z_1 Z_2 \text{ MeV}.$$

Orkan til að yfirstíga þetta þarf að koma sem hreyfiorka hvarfeindanna og sést þá hér að ofan að hún þarf að vera gott brot af 1 MeV. Einnig sést hér að því minni sem hleðslutala hvarfefnanna er því auðveldar gengur ferlið fyrir sig og því er nánast einungis horft til samsæta af vetni til að knýja samrunaofna.

Hér hefur smug ekki verið nefnt til sögunnar, því augljóslega eru kjarnahvörf skammtafræðilegir atburðir, en það hefur töluverð áhrif á þversnið kjarnasamrunans eins og Gamow sýndi fyrstur fram á fyrir hvarfeindir með orku $w < E_{max}$. Þá er þversniðið

$$\sigma(w) = \frac{C_0}{w} \exp \left[-\frac{\pi M^{\frac{1}{2}} Z_1 Z_2 e^2}{2^{\frac{1}{2}} \epsilon_0 h w^{\frac{1}{2}}} \right],$$

þar sem C_0 er fasti sem ákvarðaður er með tilraunum og M er skerti massi agnanna

$$M = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

Hér hefur verið gert ráð fyrir að engar kjarna hermur komi til á orkubílinu sem við höfum áhuga á en fyrir hvörf tvívætnis(D) og þrívætnis(T), sem er best rannsakaða hvarfið, er hermunnin við 107 keV.

Hvarfhraðastuðullinn

Ef gert er ráð fyrir því að hvarfagnirnar hlíti Maxwell dreifingu orkunnar w er hægt að skrifa hana

$$\frac{dn}{dw} = \frac{C_1 w^{\frac{1}{2}}}{T^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{w}{kT}\right).$$

Þá fæst hvarfhraðastuðullinn fyrir kjarnasamrunann með því að heilda margfeldi þversniðsins við afstæðan Maxwell-dreifðan hraða hvarfagnanna yfir orku, $0 < w < \infty$,

$$\begin{aligned} \langle \sigma v \rangle &= \int_0^{\infty} \sigma(w) w^{\frac{1}{2}} \frac{dn}{dw} dw \\ &= \frac{C_2}{T^{\frac{3}{2}}} \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{\pi M^2 Z_1 Z_2 e^2}{2^{\frac{1}{2}} \epsilon_0 h w^{\frac{1}{2}}} - \frac{w}{kT}\right] dw \end{aligned}$$

Með því að diffra heildisstofnin í þessari jöfnu má finna W_{max} þar sem hvarfhraðinn er mestur. Það fæst með

$$W_{max} = \left[\frac{M^2 \pi Z_1 Z_2 e^2 kT}{2^{\frac{3}{2}} \epsilon_0 h} \right]^{\frac{2}{3}}.$$

Með útskrift á föstum fyrir D-T ferlið fæst að

$$W_{max} = 6,6 [T'(keV)]^{\frac{2}{3}} keV$$

þar sem T' er hreyfihiti hvarfagnanna.

Aðrir hlutir hafa einnig áhrif á þversniðið til dæmis, eins og áður hefur verið sagt, spuni. Ef hægt væri að skauta hvarfeindirnar í visst spunaástand væri þannig hægt að fá 50% aukningu í þversniði í D-T samruna. Þetta er hins vegar erfitt að framkvæma þar sem að þótt að byrjunarástand væri skautað, sem er nógu erfitt til að byrja með, er orkumunur tveggja spunaástanda í segulsviði aðeins um $10^{-6} eV$ og því erfitt að halda þeim nógu lengi í því ástandi.

Myndagnirnar geta einnig farið yfir Coulomb þröskuldinn án þess samruni eigi sér stað. Þegar þetta gerist skiptast agnirnar á skriðþunga og/eða orku með víxlverkunum öðrum en Coulomb kröftum, annað hvort fjaðrandi eða ófjaðrandi.

Þegar fjaðrandi árekstur á sér stað getur töluverð orka farið af hlöðnum háorku ögnum sem myndast hafa í hvarfinu, eins og helíum úr D-T hvarfi, yfir á lágorku hvarfagnir. Þannig verða fleiri hvarfagnir líklegar til samruna en ella og sýnt hefur verið fram á allt að 20% aukningu á samrunum ef nóg af slíkum hlöðnum myndögnum er haldið við samrunann.

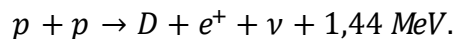
Ófjaðrandi árekstur verður þegar kjarnar víxlverka með kjarnakraftinum en allavega annar kjarninn kemur út í örvuðu ástandi þannig að

$$A + B = A + B^*$$

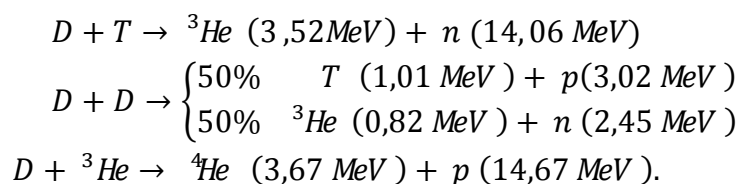
þar sem * þýðir að kjarninn sé örvaður. Eins og við fjaðrandi áreksturinn getur þetta aukið hvarflíkur þar sem örvaðar hvarfagnir geta verið líklegri til að fara í samruna en annars [1].

Eldsneyti

Kjarnasamruni er helsti orkugjafi alheimsins. Stjörnur eins og sólin okkur mynda orku sína með kjarnahvörfum, þar sem fyrsta og augljósasta hvarfið er milli tveggja róteinda, í raun vetniskjarna í rafgasfasa,

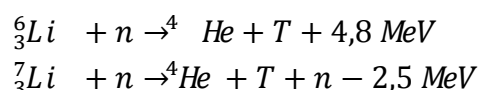


Þetta hvarf hefur hins vegar svo gífurlega lítið þversnið að það er svo til óhugsandi að það verði nýtt til einhvers á jörðinni. Hvörf sem hafa nógu hátt þversnið til þess að þau séu talin áhugaverð eru, með því að nota ritháttinn D fyrir tvívetni, ${}^2_1\text{H}$, og T fyrir þrívetni, ${}^3_1\text{H}$



Hér er hins vegar D-T hvarfið með langtum stærstan hvarfhraðstuðul ($\langle \sigma v \rangle$), D-D samruninn þarf um 6-falt hærra hitastig við sama þéttleika og til að framleiða sömu orku og D-T samruninn [2] og því er næstum víst að fyrstu kjarnasamrunaofnarnir munu nota D-T eldsneyti.

Tvívetni er stöðug samsæta vetnis og finnst sem eitt af hverju 6700 vetnisatómum, 0,015%, á jörðinni og ætti því að duga í ansi mikið af samruna. Þrívetni er hins vegar óstöðugt, með helmingunartíma 12,3 ár, og finnst því ekki í nægu magni í náttúrunni [3]. Helstu hugmyndirnar eru þá þær að í kringum D-T hvörfin í ofninum liggja „teppi“ af litíni og nifteindirnar úr hvarfinu nýttar til að mynda hvörfin



til að búa til þrívætni inni í ofninum. Þrívætnið til að byrja samrunan er hægt að fá úr kjarnakljúfum en svo er hugmyndin að láta ofninn vera sjálfum sér nægur með það. Ekki er þó hægt að búast við að allar nifteindirnar myndi þrívætni en þá væri möguleiki að auka nýtnina með því að láta nifteindirnar rekast fyrst á ${}^7_3\text{Li}$ og út kæmi þrívætni og hægfara nifteind sem síðan myndi rekast á ${}^6_3\text{Li}$ sem gæfi aftur þrívætni. Ef koma þyrfti til væri einnig hægt að nota beryllín og þyngri efni sem nifteindagjafa [4].

Litín er einnig að finna í miklu magni á jörðinni. Búast má við því að um 1 tonn af tvívætni þurfi til að framleiða 1 gígavatt-ár af raforku í kjarnsamrunaofni, en kolaraforkuver þarf um $2 \cdot 10^6$ tonn af kolum fyrir sömu orku. Þetta sýnir gífurlegan mun á kjarnorku og efnaorku og er augljós gróði þegar kemur að því að útvega og flytja eldsneytið auk þess sem úrgangur verður einnig margfalt minni. Miðað við orkunotkun á jörðinni árið 1995 myndi tvívætni á jörðinni duga í slíka árlega orkuframleiðslu í 150 billjón ár, núverandi byrgðir af litíni í 3000 ár og það litín sem finnst í sjó dygði í 60 milljón ár [5]. Menn hafa því látið sig dreyma um að hér sé um nánast óendanlega uppsprettu orku að ræða.

Kjarnasamrunaofnar

Fljótlega eftir að fyrsta vetnissprengjan var sprengd árið 1952 fóru eðlisfræðingarnir sem unnið höfðu að sprengjunni í að hanna samrunaofna til nýtingar í rafmagnsframleiðslu. Þeir komust að því að þótt að auðvelt sé að sýna fram á samruna í tilraunastofu með því að láta geisla af ögnum lenda á skotmarki er annað mál að ná að draga orkuna útúr því á skilvirkan hátt. Því fóru menn fljótlega að íhuga það að halda efninu saman í vissum þéttleika á einn eða annan hátt og þar erum við enn í dag [4].

Þó nokkuð margar hugmyndir hafa verið uppi um gerðið ofna sem geta skapað skilyrði fyrir nýtanlegan kjarnasamruna. Þar ber helst að nefna:

Z-Pinch rafgas kerfi sem notast við lögmál Lorentz. Þar er samrunaeldsneytinu haldið í rafgasformi og það látið bera straum. Það er þá eins og margir vírar að bera straum í sömu átt og rafgasið dregst því saman. Þetta er þá notað til að þjappa rafgasinu saman í nægilegan þéttleika fyrir ákjósanleg skilyrði samruna .

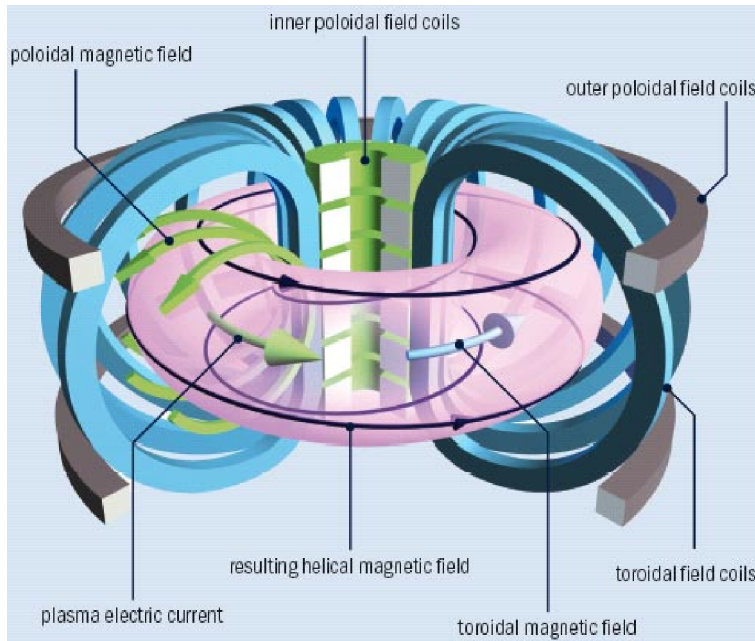
Laser inertial kerfi notast við orku leysigeisla til að „kveikja“ í örhylli fylltu með mjög þéttu samrunaeldsneyti. Ráðgert er að byggja tilraunaofn, HiPER, byggðan á þessari tækni sem á að geta framleitt nettó orku. Framkvæmdir eiga að hefjast 2010. [6]

Vetnissprengjuofn virkar þannig að litlum vetnissprengjum er varpað ofan í risa stóra hvelfingu neðanjarðar. Í hvelfingunni er einhverskonar vökvi sem þá hitnar, stígur upp og knýr túrbínur. [7]

Segulinnilokunarsamrunaofnar(SISO) er það sem vonar manna hafa bundist hvað mest við og mestu púðri hefur verið eytt í rannsóknir á síðustu áratugi. Tvær helstu gerðir SISO eru Tokamak og Stellerator. Helsti munurinn á þessum tegundum er að Stelleratorinn heldur rafgasinu saman með straum í ytri vafningum á meðan tokamakinn notast við, eins og Z-Pinch, straum í gegnum rafgasið sjálft [1]. Stærsta verkefnið í kjarnasamrunarannsóknum í heiminum í dag er alþjóðlega 5 milljarða Evra ITER(International Thermonuclear

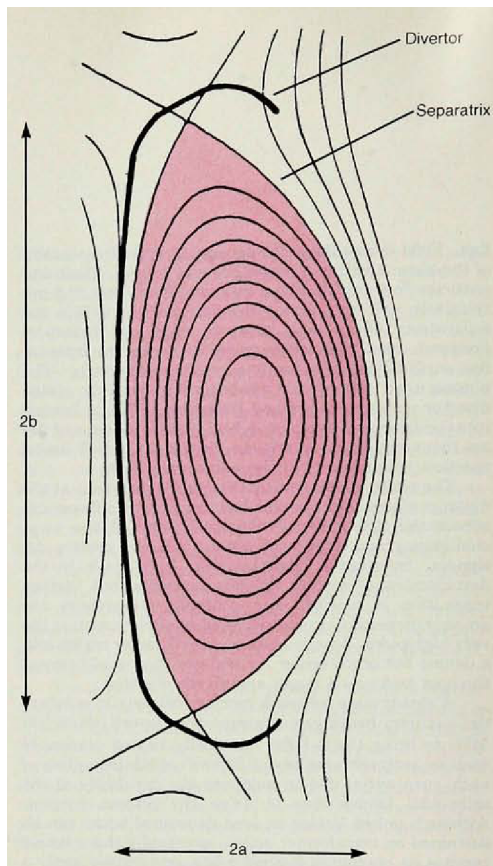
Experimental Reactor) verkefnið, sem verður langtum stærsti tokamak ofninn til þessa (sjá mynd á forsíðu), og tilraunir þar eiga að vera komnar á fullt skrið árið 2018.

Tokamak



Mynd 2 sýnir helstu segulsviðs og straum stefnur sem tokamakinn byggir á [8]

Tokamak ofnar eru þeir sem hafa verið hvað best rannsakaðir í kjarnsamrunarannsóknum og eiginleikum þeirra fleytt hratt fram síðustu áratugi. Þeir eru venjulega kleinhringlaga holrúm sem um eru vafnar stórar ofurleiðandi hringspólu eins og sjá má á mynd 2. Hringspólur þessar mynda gífurlega sterkt segulsvið, venjulega 5-10 T, í stefnu langsælis í gegnum kleinhringinn (toroidal magnetic field). Utan um hringinn liggja spólur sem stjórna straum, venjulega 15-25 MA, í gegnum



Mynd 3 sýnir segulsviðslínur í rafgasi tokamaksins [3]

jaðar rafgassins og myndar segulsvið sem vefst um hringinn (poloidal magnetic field). Langspólan (inner poloidal field coils) í miðju kleinhingsins virkar eins og spennir sem spanar strauminn sem liggur í gegnum rafgasið (plasma electric current). Straumurinn skiptir sköpum fyrir högun segulsviðsins og hitar auk þess rafgasið með ómskum hætti upp í rafeinda hitastig T_e um það bil 2 – 3 keV, en ekki mikið heitara, því við þennan hita verður eðlisviðnám rafgassins svo lítið að ómsk hitun hefur ekki lengur teljandi áhrif. Þessi samblanda af umhrings (poloidal) og langsum (toroidal) segulsviði veitir þá skúfuðu og gormlaga stefnu sem hentugast er fyrir stöðugleika og innlokunar eiginleika tokamaksins. [3]

Aðal radíus rafgassins, sem er þá inni í holrúmi kleinhingsins, R er í flestum hönnunum á tokamökum 6-7m og láréttur þversniðs radíus a á bilinu 1,5-2m. Þversniðið er D-laga, eins og sjá má á mynd 3, með álgnd $\kappa \approx 2$ sem er um það bil 2.

Þessi lögun er mikið afrek, eitt það helsta síðustu áratugi, í að ná kjör aðstæðum í ofninum og hefur mikið að segja fyrir innilokun orku og rafgasþrýsting.

Jaðar rafgassins er ákvarðað af segul-ferilskilunum (separatrix). Þetta þýðir að hver segulsviðs lína sem er rafgas megin við ferilskilin helst innan við þau. Varmi og eindir ferðast hratt um segulsviðlínurnar en eru tiltölulega vel innilokaðar innan við ferilskilin. Flutningsferli milli sviða valda því þó að lokum að rafgasið sveimar yfir ferilskilin. Það fylgir þá sviðslínunum að kældum beini(divertor) plötum sem gleypir orku þess og hlutleysir það. Gasið sem myndast við þetta, til dæmis He úrgangur úr D-T samrunanum, er þá dælt í burtu í gegnum næstu lagnir. Helsta víxlverkun rafgassins við vegg ofnsins er við beininn og vegna þess hve gífurlegur hiti er og eindaflæði mikið er hönnun, efnisval og fleira á beininum ein helsta áskorun sem menn standa frami fyrir við hönnun tokamakanna.

Í byrjun á hverju brunaferli mun stöðugur tokamak ofn þurfa töluverða byrjunarkveikju og straumsdrifs afl, um 100 MW, til að hita 2-3 keV ómskt hitaða rafgasið upp í samrunahitastig, sem er um 30 keV eða 350 milljón K. Þetta þarf einnig til að auka líkur á að spennirinn í miðju tokamaksins nái að halda straum gangandi í gegnum rafgasið. Á endanum nær spólan hámarks flæði, sem þýðir í raun að ákjósanlegt sístætt ástand samrunaofnsins verður að myndast þá, en mun alltaf þurfa stöðugan utanað komandi straum.

Rafgasið hjálpar þó til að þessu leiti með sjálfþýðum(bootstrap) straum sem gæti meira að segja drifið megnið af rafgasstraumnum. Sá straumur sem vantaði uppá til að halda kerfinu gangandi kæmi þá sem útvarpsbylgjur í mitt rafgasið.

Afkastakröfur tokamaksins

Til þess að D-T samrunaofn sé fjárhagslega aðlaðandi til rafmagnsframleiðslu þarf hann að uppfylla ákveðinn grundvallar skilyrði. Augljóslega verður hann að hafa nettó afl út meira en það afl inn sem þarf til þess að halda rafgasinu í kjör ástandi og samrunanum gangandi. Hann verður einnig að hafa nægjanlegan aflþéttleika við segulsviðstyrk á raunverulegum skala. Í sístæðum ofni er hlutfallslegur ávinningur afls gefinn með

$$Q \equiv P_f / P_i,$$

þar sem P_f er aflið úr samrunanum og P_i er það afl sem ofninn þarf til að halda ástandi sínu. Aflið úr D-T samrunanum er þá gefið með

$$P_f = 17,58 \text{ MeV} \times \int n_D n_T \langle \sigma v \rangle dV$$

þar sem n_D og n_T eru þéttleikar tví- og þrívetnis og heildið er yfir rúmmál rafgassins V . Það afl sem verður að koma utan frá verður þá að koma upp á móti muninum á annars vegar því afli sem tapast með geislun og ögnum sem sveima yfir ferilskilin og hins vegar því afli sem ávinnst af ${}^4\text{He}$ ögnum sem myndast í D-T ferlinu og haldast inni í rafgasinu, það er:

$$P_i = \frac{3}{2\tau_E} \int (n_i T_i + n_e T_e) dV - 3,52 \text{ MeV} \times \eta_\alpha \int n_D n_T \langle \sigma v \rangle dV.$$

Hér er τ_E innilokunartími orkunnar, sem segir til um hversu hratt orka losnar úr rafgasinu með sveimi og geislun. Nýtnin η_α segir til um hversu vel orka α , ^4He , agnanna færast yfir á meginhluta rafgassins og er venjulega sagður vera nálægt 1. T_i og T_e eru jóna og rafeinda hitastig, með boltzmann fasta innifalinn til að hafa einingar orku, og n_i og n_e eru þéttleikar jóna og rafeinda. Utanað komandi straumur þarf einnig til þess að halda rafgas straumnum gangandi en þegar spanaður straumur er til staðar, eins og lýst er hér að ofan, er þessi liður mjög lítill.

Með því að deila í gegnum hvern lið hér að ofan með $\frac{nT}{\tau_E}$ sést að Q er aðallega háð „þrífeldinu“ $nT\tau_E$. Nákvæmir útreikningar hafa verið gerðir á þessu og sýna að $n_{i0}T_{i0}\tau_E$, þar sem lágvísirinn 0 vísar til gildisins í miðju rafgasinu, verður að vera meira en $7 \cdot 10^{21} \text{ keV sec} / \text{m}^3$ með jóna hitastig í miðju nálægt 30 keV , til þess að liðirnir í nefnarannum verði jafn stórir og þar af leiðandi verður $Q = \infty$. Þegar þetta gerist verður „kviknun“ (ignition) í ofninum sem er skilyrði þess að hann sé hagstæður. Til samanburðar þarf kviknun í D-D eða D- ^3He ofni hitastig í miðju um $50 - 100 \text{ keV}$ og þrífeldis aukningu um rúmt stærðarþrep.

Annar lykil stiki fyrir afköst tokamaka er

$$\beta \equiv \frac{2\mu_0 \bar{p}}{B^2}$$

sem er hlutfallið á milli rúm meðaltals rafgasþrýstings: $\bar{p} \equiv n_i T_i + n_e T_e$ og segulþrýstings: $B^2/2\mu_0$. Hámarks aflþéttleiki sem hægt er að ná í D-T rafgasi, við hitastig sem skipta máli, gengur eins og $n^2 T^2$, sem er þá aftur í réttu hlutfalli við $\beta^2 B^4$. Styrkur segulsviðsins er takmarkaður með tilliti til raunverulegra stærða, þar verður að hafa í huga hluti eins og álag á burðarvirk og hámarks sviðs- og straumþéttleika ofurleiðarans. Í sístæðan ofn þyrfti þá β gildi um 5% sem gæfi nifteindaflæði $3 \text{ MW} / \text{m}^2$ á veggjum ofnsins. Hönnun með hærra hlutfall milli stærri og minni rás rafgassins þarf nokkuð minni β gildi en hönnun með lægra hlutfall. Þannig þarf ofn með $R/a \sim 5$ dálítið minna β gildi en ofn með $R/a \sim 3$ vegna þess að í fyrrnefnda ofninum er hámarkssvið segulsins hærra hlutfall af sviðsstyrknum í rafgasinu [3].

Síðasti lykil stikinn til mælingar afkasta er nýtni straumdriðsins (current-drive),

$$\eta_{CD} \equiv n_{e0} R I_p / P_{CD},$$

þar sem n_{e0} er rafeindaþéttleiki í miðju rafgasinu, I_p er utanaðkomandi rafgas straumur og P_{CD} er afl straumdriðsins. Fyrir ofn þar sem enginn spanaður straumur er drifinn í gegnum rafgasið setur aflíð sem þarf í að keyra strauminn neðri mörk á það afl sem þarf utan frá, P_i , og setur í leiðinni efri mörk á Q . Fyrir spanaðan straum þarf straumdriðs nýtni, η_{CD} , uppá $3 \cdot 10^{19} \text{ A} / \text{m}^2 \text{ W}$ og einnig að sjálfþýðisstraumur sé um 70% af heildar straumnum í rafgasinu til að fá $Q > 20$, sem er æskilegt fyrir fjárhagslega aðlaðandi, síðstæða, kjarnasamrunaofna.

Kjarnasamrunarannsóknir hafa aðallega snúist um að bæta þá stuðla sem eru nefndir hér fyrir ofan. Aðrir þættir sem rannsóknir hafa beinst að eru meðal annars hitun rafgassins.

Lokaorð

Hér hefur verið farið frekar hratt yfir helstu eiginleika og skilyrði kjarnasamrunaofna til hagnýtrar orkuframléiðslu. Miklar framfarir hafa verið á rannsóknum frá því þær byrjuðu og virðast vonir manna vera að aukast við þessa orkulind með gangsetningu ITER verkefnisins. Það er þó ljóst að minnsta kosti eina tilraunastöð þarf eftir ITER til að þekking manna verði komin á það stig að samruninn verði hugsanlega hagnýtur. Ekki er þó hægt að segja að mikið hafi verið lagt í rannsóknir kjarnasamruna, miðað við aðra orkugjafa, en það fer vonandi batnandi með því sem ITER hefur fram að færa. Þar sem hér er um að ræða örugga og tiltölulega umhverfisvæna orkulind með gífurlega mikið eldsneyti í boði á jörðinni tel ég að það sé mjög mikilvægt fyrir afkomu mannkynsins, vegna gríðarlegrar aukningar í eftirspurn eftir orku, að koma þessu í gagnið sem fyrst. Það hefur sýnt sig í gegnum tíðina, með til dæmis Manhattan verkefninu og tunglendingum, að þegar mannskepnan vill virkilega gera eitthvað tekst henni það venjulega. Ég býst þá við að hér sé um enga undartekningu að ræða þar sem tæknilegir örðugleikar virðast vel yfirstíganlegir. Til þess að það gerist þarf þó hugsanlega eitthvað róttækt að gerast, því konan lærir venjulega ekki að spinna fyrr en neyðin er yfirþyrmandi og hún orðin algerlega nakin.

Heimildaskrá

1. Roth, J. Reece (1986). *Introduction to Fusion Energy*. Charlottesville: Ibis Publishing.
2. Williams, W.S.C. (1991). *Nuclear and Particle Physics* (2. Útgáfa, bls. 128-9). New York: Oxford university press.
3. Cordey, J. Geoffrey, Goldston, Robert J. og Parker, Ronald R. (1992, janúar). Progress toward tokamak fusion reactor. *Physics today*.
4. Braams, C. M. og Stott, P. E. (2002). *Nuclear fusion, half a century of magnetic confinement fusion research*. Bristol: Institute of Physics Publishing.
5. Ongena, J. og Oost, G. Van (2006). *Energy for future centuries*. Koninklijke Militaire School - Ecole Royale Militaire Association. Sótt 22. nóvember 2008 af www.fusie-energie.nl/artikelen/ongena.pdf.
6. Wikipedia, Yfirlit yfir gerðir kjarnasamrunaofna
http://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_reactors .
7. Viðtal við Jón Tómas Guðmundsson 21. nóvember 2008.
8. Physicsworld sótt 22. nóvember 2008
http://physicsworld.com/cws/article/print/24295/1/PWfus3_03-06 .
9. Heimasíða ITER: <http://www.iter.org/>. Sótt 24. Nóvember 2008.