

# **Fuusioenergian nykytila ja rooli tulevaisuudessa**

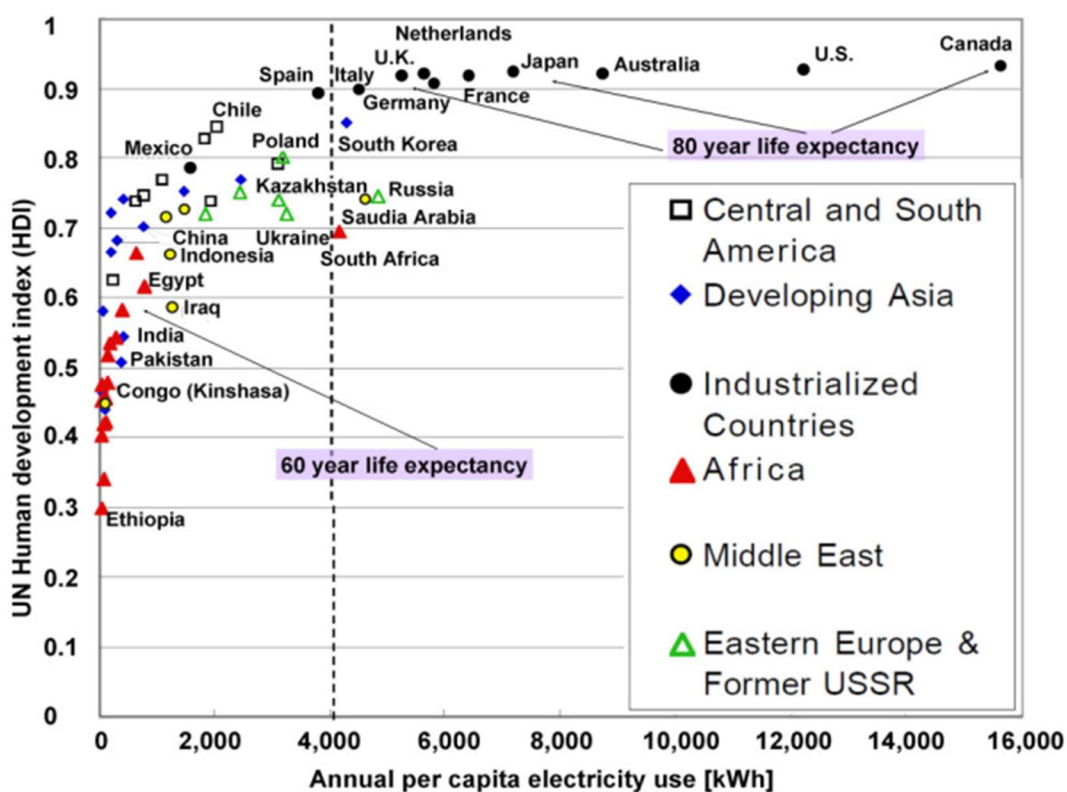
Atte Manninen  
Kandidaatin tutkielma  
Fysiikan tutkinto-ohjelma  
Oulun yliopisto  
Kevät 2023

# Sisällys

1. Johdanto.....	3
2. Teoria .....	6
2.1 Fissio.....	8
2.2 Fuusio .....	9
2.3 Tuottavuus ja Lawsonin kriteeri <i>nete</i> .....	11
3. Tokamak.....	16
3.1 Rakenne.....	16
3.2 Polttoaine .....	17
3.3 Plasmanhallinta.....	18
3.4 Energian kerääminen talteen.....	21
4. Muita ratkaisuja fuusion toteuttamiseen .....	23
4.1 Inertiafuusio .....	23
4.2 Stellaraattori.....	24
5. Pohdinta ja yhteenveto.....	26
5.1 Fuusion hyödyt.....	26
5.2 Fuusion riskit ja haittavaikutukset .....	27
5.3 Asenteet ja mielipiteet.....	28
6. Lähteet .....	30

# 1. Johdanto

Moderni yhteiskunta tarvitsee energiaa toteuttaakseen jokapäiväistä toimintaansa. Tutkimukset ovat osoittaneet elämänlaadun kohoavan, kun energiankulutus suhteessa väkilukuun kohoaa kuvan 1 mukaisesti (Kikuchi ym. 2012: 2). Globaali pohjoinen kuluttaa valtavia määriä energiaa joka päivä. Globaalin etelän valtioiden kehittyessä perässä, energian kysyntä tulee tulevaisuudessa vain kasvamaan (Kikuchi ym. 2012: 1).



Kuva 1. Kuvassa esitetty eri valtioiden vuosittainen energian kulutus asukasta kohden suhteessa YK:n Human Development Indexiin (HDI). (Fusion physics, © IAEA, 2012, 2)

Maailmanlaajuisesti käytetyimpiä polttoaineita ovat fossiiliset polttoaineet. Niiden ongelmia ovat poltettaessa vapautuvat kasvihuonekaasut, jotka ilmakehään vapautuessaan voimistavat kasvihuoneilmiötä ja keskilämpötilan nousua (Kikuchi ym. 2012: 4). Muita ongelmia ovat kaupunkialuilla lisääntyneet happosateet, joita syntyy, kun palamistuotteet reagoivat sadepilvissä veden kanssa muodostaen esimerkiksi rikki- ja hiilihappoja (Singh & Agrawal 2007: 16).

Uusiutuvien luonnonvarojen, kuten aurinko-, vesi- ja tuulivoiman, ongelma on niiden tehon riittämättömyys energian kysyntään vastaamisessa. Uusiutuviin luonnonvaroihin perustuvat voimalat tarvitsevat suuria määriä tilaa, eivätkä ne ole käytännöllisiä ratkaisuja tiheään rakennetuilla kaupunkialueilla. Uusiutuvat energialähteet ovat pääasiallisina tuotantomuotoina osoittautuneet yksinään riittämättömiksi, mutta ne ovat tällä hetkellä ja tulevaisuudessa tärkeässä roolissa osana kokonaisenergiantuotantoa (Kikuchi ym. 2012: 4, 6).

Fissioenergia täydentäisi uusiutuvia energialähteitä tehokkuudellaan ja täyttäisikin monia kestävän ja saatavilla olevan energian kriteerejä. Se on kuitenkin historiamme aikana osoittautunut myös vaaralliseksi, kuten esimerkiksi Chernobylissä 1986 tai Fukushimaa 2011 tapahtuneet onnettomuudet ovat osoittaneet. Onnettomuudet ovat vaikuttaneet negatiivisesti ihmisten kantaan ydinenergiasta (Windsor 2019: 4).

Suomen tilastokeskuksen tutkimuksen (Tilastokeskus 2021: 42) mukaan ydinenergia oli suurin yksittäinen energiantuotantomuoto, jolla tuotettiin 27,6 % Suomen energiasta vuonna 2020. Ydinenergian tuotanto oli noin 22,4 TWh ja sillä voitaisiin kattaa esimerkiksi suomalaisten kotitalouksien sähkönkulutus kokonaan. Vesivoima tuotti 19,3 %, tuulivoima 9,8 % ja aurinkoenergia vain 0,3 %. Kaikki fossiiliset polttoaineet oli tutkimuksessa yhdistetty samaan kategoriaan ”Muu lämpövoima”, mutta tämä luokka tuotti vuonna 2020 yhdessäkin 24,6 % kokonaistuotannosta, mikä on silti vähemmän kuin ydinvoima.

Fuusioenergiaa ei vielä tuoteta kulutukseen, mutta ympäristöystävällistä ja riittävän tehokasta energian lähdettä etsittäessä, tutkijat ovat päätyneet fuusioenergiaan tulevaisuutemme pääasiallisena energianlähteenä (Kikuchi ym. 2012: 16). Yhteiskuntamme kuitenkin hyötyy jo fuusioenergiasta, sillä Aurinko palaa fuusioreaktion voimalla. Se antaa aurinkokennoihimme energiaa, synnyttää tuulet, jotka pyörittävät tuulivoimaloitamme ja mahdollistavat kasvien yhteyttä happea, jota hengitämme (Windsor 2019: 1–2).

Maapallolla fuusio olisi valjastettava reaktorin sisälle. Sitä varten suunniteltu ja rakenteilla oleva ITER-reaktori on maailmanlaajuisen International Thermonuclear Experimental Reactorin (ITER) hanke. ITER-jäsenmaita ovat Yhdysvallat, Euroopan Unioni, Intia, Japani, Korea, Venäjä, Kiina ja muita, yhteensä 35 valtiota. Ajatus yhteistyöstä fuusioenergian ratkaisemiseksi alkoi vuonna 1985 ja on jatkunut siitä lähtien. Vuonna 2005 Etelä-Ranskassa aloitetun rakennusprojekti ITER:n tavoitteena on todentaa,

onko fuusiolla mahdollista saavuttaa nettotuottoa, eli saada reaktorista enemmän energiaa kuin reaktion ylläpitämiseen kuluu (ITER 2021). Fuusiossa käytettäisiin polttoaineena kahta merivedestä löytyvää vedyn isotooppia, deuteriumia ja tritiumia. Reaktiotuotteena fuusiosta saadaan heliumytimiä ja neutroneja (Kikuchi ym. 2012: 16).

Mikäli fuusioenergian haasteet kyetään ratkaisemaan, sen tarjoamat mahdollisuudet olisivat mullistavia. Energian tuotantoon tarvittavat raaka-aineet vaihtuisivat uusiutumattomista luonnonvaroista vedestä saatavaksi deuteriumiksi ja tritiumiksi, joista jälkimmäistä harvinaisempaa voitaisiin tuottaa reaktion aikana lisää. Koska energiantuotannon edellytykset eivät enää olisi alueellisesti rajoittuneita, kuten esimerkiksi öljyllä, fuusioenergia lisäisi tasa-arvoisuutta valtioiden välillä ja parantaisi niiden energistä omavaraisuutta. Tämä vähentäisi energiavarojen takia syntyviä konflikteja globaalisti (Kikuchi ym. 2012: 1, 16).

Tutkielmani tarkoituksena on tarkastella erilaisia mahdollisia fuusioreaktoreita, niiden toimintaa ja tämänhetkistä näkemystä fuusion roolista osana tulevaisuuden kestäväää energiantuotantoa.

## 2. Teoria

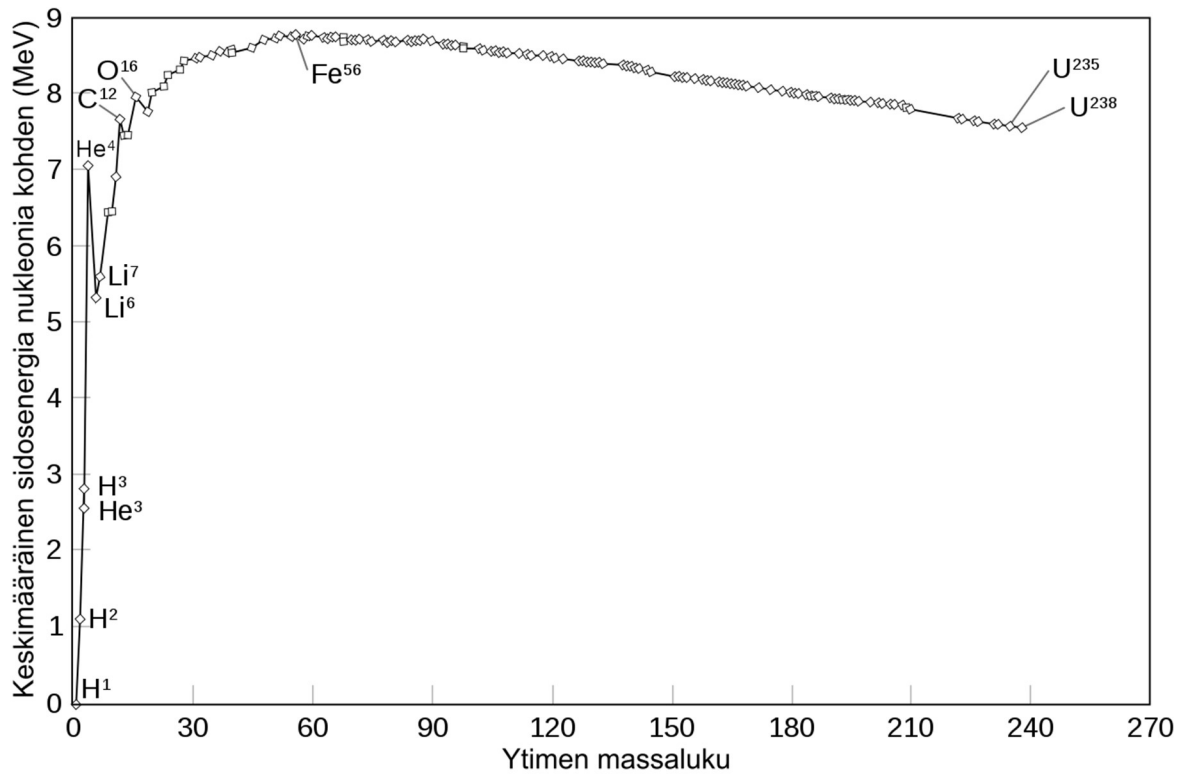
Atomien sisäinen rakenne koostuu tiiviistä ytimeistä ja sitä ympäröivistä elektroniorbitaaleista. Positiiviset protonit ja varauksettomat neutronit sijaitsevat ytimessä. Negatiivisesti varautuneet elektronit ympäröivät ydintä. Vielä 1900-luvun vaihteessa elektronien ajateltiin olevan suuren positiivisesti varautuneen ytimen sisällä. Hans Geigerin ja Ernest Marsden suorittamassa kokeessa havaittiin, että atomien ytimien tulisikin olla paljon oletettua tiiviimpiä. He ampuivat kokeessa kultafoliota heliumytimillä eli alfahiukkasilla. Jos kulta-atomien sähköinen varaus olisi tasaisesti jakautunut atomin sisällä, kuten aikaisemmin oli ajateltu, kaikki alfahiukkaset olisivat läpäisseet kultafolion ongelmitta. Hypoteesin vastaisesti pieni osa alfahiukkasista kuitenkin muutti suuntaansa merkittävästi, joista osa jopa kimposi takaisin lähtösuuntaansa. Tästä havainnosta Geiger ja Marsden päättelivät, että atomin sisäisen rakenteen onkin oltava paljon pienempi ja tiiviimpi kuin oli luultu. (Baiser 2003: 120-121).

Vuonna 1905 Albert Einstein osoitti, että massan ja energian välillä vallitsee riippuvuus:

$$E = mc^2 \quad (1)$$

missä E on energia, m on tarkasteltavan kappaleen massa ja c on valonnopeus 299 792 458 m/s.

Tämä tarkoitti, että pelkästä energiasta oli mahdollista syntyä massaa, mutta myös että massan oli mahdollista muuttua energiaksi. Toinen merkittävä havainto tehtiin pian tämän jälkeen vuonna 1920, kun Francis William Aston havaitsi, että eri alkuaineilla on niiden ytimissä eri määrä sidosenergiaa jokaista ytimen hiukasta kohden (Windsor 2019: 2).



Kuva 2. Kuvaajassa esitetty keskimääräinen sidosenergia ytimen hiukkasten välillä (MeV) suhteessa ytimen massalukuun. Pienimmät ytimet ovat vasemmassa reunassa ja raskaimmat ytimet oikeassa reunassa (Wikipedia, [https://fi.wikipedia.org/wiki/Sidosenergia#/media/Tiedosto:Binding\\_energy\\_curve\\_-\\_common\\_isotopes-fi.svg](https://fi.wikipedia.org/wiki/Sidosenergia#/media/Tiedosto:Binding_energy_curve_-_common_isotopes-fi.svg)).

Kuvassa 2 vaaka-askelilla on ytimen massaluku ja pystyakselilla on keskimääräinen sidosenergia atomin ytimen hiukkasten, eli nukleonien, välillä. Sidosenergian voidaan ajatella tarkoittavan energiaa, joka tarvitaan viemään ytimen hiukkaset niin kauas toisistaan, etteivät ne enää vuorovaikuttaisi keskenään ollenkaan.

Kuvasta 2 nähdään, että eniten sidosenergiaa nukleonien välillä on rauta-56:lla (luku 56 raudan perässä viittaa rautaytimessä olevien protonien ja neutronien määrään, eli massalukuun). Kun siirrymme kauemmas raudasta kuvaajan vaaka-akselilla, suhteellisen energian määrä nukleonien sidoksissa vähenee (Beiser 2003: 402). Kun fissio- tai fuusioreaktion tuotteilla on enemmän sidosenergiaa kuin lähtöaineilla, muutos sidosenergian määrässä vapautuu reaktiossa säteilynä ja reaktiotuotteiden liike-energiانا (Baiser 2003: 401).

Uraani-235 voi hajota eri reaktioissa kahdeksi, lähes yhtä suureksi tytärytimeksi, kuten esimerkiksi strontiumiksi ja ksenoniksi. Kuvasta 2 voidaan arvioida, että ytimillä,

joiden massaluku on noin puolet uraanin massaluvusta, sidososuus on noin 0,8 MeV pienempi kuin uraanilla. Koska uraani-235:llä on 235 nukleonia, sen fission vapautuvan energian määrä voidaan laskea kaavalla:

$$0,8 \frac{\text{MeV}}{\text{nukleoni}} * 235 \text{ nukleonia} = 188 \text{ MeV} \quad (2)$$

Suurin osa tästä energiasta vapautuu reaktiotuotteiden liike-energiana. Toisaalta kahdella vety-ytimellä on vähemmän sidosenergiaa kuin yhdellä heliumytimellä, joten kahden vedyn yhdistyminen vedyksi vapauttaa energiaa 17,6 MeV. Kuten raskaan ytimen hajotessa, myös ydinten yhdistyessä valtaosa energiasta vapautuu reaktiotuotteiden liike-energiana (Beiser 2003: 402).

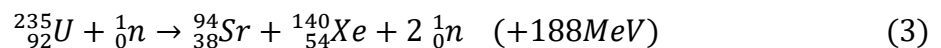
Raudalla on kaikista tunnetuista alkuaineista korkein sidosenergia ytimen hiukkasta kohden. Rautaa kevyempien ydinten yhdistymiset tuottavat siksi energiaa, kunnes reaktiot päätyvät rautaan asti. Vastaavasti rautaa raskaampien ydinten hajoamiset tuottavat energiaa, kunnes reaktiosarja päättyy rautaan (Kikuchi ym. 2012: 21).

Kevyiden ytimien yhdistymistä kutsutaan fuusioksi ja raskaan ytimen halkeamista keveämmiksi ytimiksi kutsutaan fissioksi (Beiser 2003: 401). Vaikka näyttääkin, että uraanin fissioituminen vapauttaa merkittävästi enemmän energiaa kuin vedyn fuusio, on kuitenkin huomioitava ytimien kokoluokkien ero. Vety-ytimet ovat pieniä ja keveitä verrattuna uraaniin. Vetyfuusio tuottaa saman määrän energiaa kuin uraanifissio, jos 10 vetyfuusiota saataisiin tapahtumaan samassa ajassa kuin yksi uraanifissio.

## 2.1 Fissio

Tänä päivänä käytetyt ydinreaktorit saavat energiansa ydinfission. Siinä raskaat atomiytimet halkeavat, jakautuen kevyemmiksi ytimiksi ja vapauttaen samalla energiaa ja neutroneita. (Kikuchi ym. 2012: 14).

Esimerkki eräästä uraani-235:n hajoamisreaktiosta:



(Baiser 2003: 452)

Tässä reaktiossa uraani-235:een on törmännyt korkeaenerginen neutroni n, joka saa uraanin halkeamaan strontium-94:ksi, ksenon-140:ksi ja kahdeksi neutroniksi. Fissioreaktiossa vapautuu myös suuri määrä energiaa reaktiotuotteiden liike-energiana.



Koska uraanin ytimen hiukkasilla on vähemmän sidosenergiaa kuin syntyvien tytärtyimien hiukkasilla, fissioreaktiossa vapautuu energiaa tämän muutoksen verran (Beiser 2003: 402).

Fissioteknologian jakamista ja reaktoreiden rakentamista ympäri maailmaa on kuitenkin vältelty fissioenergian riskeihin, mahdollisiin asosovellutuksiin ja jätteen ongelmallisuuteen vedoten. Teoriassa voisimme fissioenergialla kattaa ihmiskunnan energiatarpeet seuraavaksi tuhanneksi vuodeksi. Se kuitenkin vaatisi teknologian kehittämistä muidenkin isotooppien kuin uraani-235:n käyttämiseen polttoaineena, kuten plutonium-239 tai uraani-233 (Kikuchi ym. 2012: 6).

## 2.2 Fuusio

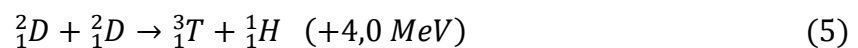
Fuusio on ydinreaktio, jossa kaksi kevyttä atomiydintä yhdistyvät eli fuusioituvat raskaammaksi ytimeksi vapauttaen samalla suuren määrän energiaa. Tästä reaktiosta esimerkiksi Aurinkomme ja kaikki muutkin tähdet saavat energiansa.

Fuusioituvien ytimien yhteinen massa on hieman suurempi kuin raskaamman reaktiotuotteen ytimen massa. Tätä muutosta massassa kutsutaan massavajeeksi ja se on suoraan verrannollinen vapautuneen energian määrään Einsteinin kuuluisan yhtälön (1) mukaan. Fuusion vapauttama energia vapautuu reaktiotuotteiden liike-energiaksi. Esimerkiksi vedyn isotooppien deuteriumin  ${}^2_1\text{H}$  tai  ${}^2_1\text{D}$  ja tritiumin  ${}^3_1\text{H}$  tai  ${}^3_1\text{T}$  fuusiossa vapautuu noin 17,6 MeV energiaa. Reaktiotuotteena saadaan helium  ${}^4_2\text{He}$  ja yksi neutroni  $n$ . Reaktiosta vapautuva energia on lähes kokonaan näiden hiukkasten liike-energiaa (Kikuchi ym. 2012: 14).

Deuterium-tritium fuusion reaktioyhtälö on:



Muita mahdollisia fuusioreaktioita ovat esimerkiksi kahden deuteriumin väliset reaktiot. Deuterium-deuteriumin kahden mahdollisen fuusion reaktioyhtälöt:



Deuterium-tritium fuusiosta (jatkossa viitataan fuusioreaktioihin lähtöaineiden lyhenteiden avulla, kuten D-T tai D-D fuusiona) saataisiin näistä kolmesta reaktiosta eniten energiaa. Mikäli D-D fuusiot saataisiin onnistumaan, niiden polttoainetta olisi merivedessä

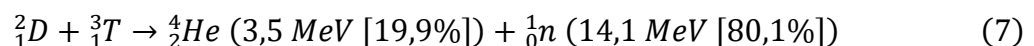
merkittävästi enemmän saatavilla kuin tritiumia. Tritium on radioaktiivista, joten se hajoaa luonnossa ja on siksi harvinaisempaa kuin deuterium (Baiser 2003: 463).

Näistä reaktioista D-T fuusio on todennäköisimmin se, jonka ihmiskunta saa ensimmäisenä toimimaan reaktorissa (Baiser 2003: 464). Syynä tähän on eri fuusioreaktioiden olosuhdevaatimukset, joissa ne voivat tapahtua. D-T fuusio vaatii matalamman lämpötilan tapahtuakseen kuin D-D fuusio (Kikuchi ym. 2012: 19).

Fuusio pääsee tapahtumaan, kun yhdistyvät ytimet tuodaan niin lähelle toisiaan, että niiden välillä vaikuttava attraktiivinen vahva ydinvoima voittaa positiivisesti varautuneita ytimiä hylkivän sähköisen vuorovaikutuksen. Vahvan ydinvoiman vaikutusetäisyys on noin  $10^{-15}$  m, eli atomin ytimen halkaisijan mittaluokkaa. Vety-ytimen halkaisija on  $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ \AA} = 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ . Normaalioloissa vety-ydinten positiivinen sähkövaraus pitää ytimet erillään toisistaan. Riittävässä lämpötiloissa atomien elektronit vapautuvat kokonaan kuoriltaan ja aineesta tulee plasmaa. Kun elektronit vapautuvat ytimen vaikutuspiiristä, tavallisesti ulospäin sähköisesti neutraalin ytimen ja elektronien rakenteesta paljastuukin negatiivisten elektronien keskeltä positiivinen ydin. Jakautuminen sähköisesti varautuneisiin komponentteihin on plasman tärkeä ominaisuus fuusion mahdollistamiseksi reaktoriolosuhteissa (Kikuchi ym. 2012: 14–15).

Korkea lämpötila tarkoittaa myös korkeaa liike-energiaa kuumennetuille hiukkasille. Jotta ytimet pääsevät niin lähelle toisiaan, että vahvan vuorovaikutuksen attraktio voittaa sähköisen vuorovaikutuksen hylkivän- eli repulsiivoiman, ne on kuumennettava todella korkeisiin lämpötiloihin. Kuumat hiukkasen liikkuvat keskimäärin nopeammin ja tällöin niiden kineettinen energia auttaa ytimiä pääsemään sähköisen repulsiivoiman läpi vahvan vuorovaikutuksen vaikutusetäisyydelle. D-T fuusion tapauksessa tarvitaan 10 keV:n keskimääräinen liike-energia hiukkasta kohden, joka on celsiusasteina noin 100 miljoonaa °C (Kikuchi ym. 2012: 14–15).

D-T fuusiossa, joka esiteltiin yhtälössä (2), vapautuva energia jakautuu reaktiotuotteille seuraavasti:



Reaktioyhtälöön merkityt reaktiotuotteiden energiat ovat hiukkasten liike-energiaa. Suurin osa reaktiossa vapautuvasta energiasta vapautuu neutronin liike-energiana. Nopeasti syöksyvän hiukkasen liike-energia kerätään talteen jäähdytysveten ja sen avulla tehdään

myös lisää tritiumia polttoaineeksi fuusiota varten niin kutsutussa ”tritium breeding” reaktiossa. Loput energiasta on heliumytimen, eli alfahiukkasen liike-energiaa. Koska alfahiukkanen on positiivisesti varautunut, se menettää nopeasti liike-energiaansa reaktorin sisäisessä magneettikentässä. Voimakkaasti jarruttavat hiukkaset luovuttavat energiaansa säteilyä. Vapautuva säteily auttaa osin riittävän korkean lämpötilan ylläpitämistä reaktorin sisällä, mihin palaan myöhemmin, kun kerron reaktion lämpötilan ylläpitämisestä riittävän korkeana, eli 100 miljoonassa °C:ssa (Windsor 2019: 2).

### 2.3 Tuottavuus ja Lawsonin kriteeri $n_e \tau_e$

Fuusioenergian tuottaminen on taloudellisesti kannattavaa, kun reaktorit tuottavat enemmän energiaa kuin mitä niiden ylläpitäminen vaatii. Tätä tehokkuutta kuvataan kertoimella  $Q$ , joka kuvaa reaktorista saatavan energian suhdetta ylläpitämiseen vaadittuun tehoon. Sitä voidaan kuvata:

$$Q = \frac{P_{anto}}{P_{otto}} = \frac{P_{fuusio}}{P_{yllapito}} \quad (8)$$

Kun  $Q$  saavuttaa arvon 1, puhutaan break-even tilasta, jossa tuotto saavuttaa ylläpitotehon ja reaktori tuottaa saman verran energiaa kuin se kuluttaa. Kun tämä kriittinen  $Q = 1$  pystytään ylittämään,  $Q > 1$ , reaktorista saatavan energian määrä ylittää sen toiminnan kuluttaman energian ja toiminnasta tulee nettopositiivista (Kikuchi ym. 2012: 17).

Palavalla plasmalla tarkoitetaan tilannetta, jossa reaktori ei enää tarvitse ylläpitoon energiaa, vaan plasman sisäiset energiat pitävät lämpötilan fuusion kannalta otollisena:

$$\lim_{P_{yllapito} \rightarrow 0} Q = \lim_{P_{yllapito} \rightarrow 0} \frac{P_{fuusio}}{P_{yllapito}} = \infty \quad (9)$$

Nähdään, että tässä tilanteessa teoreettinen hyötysuhde lähestyy ääretöntä. Tilanne saavutetaan, kun fuusion reaktiotuotteena syntyvistä  $\alpha$ -hiukkasista vapautuva energia pitää plasman riittävässä lämpötilassa ilman ulkoista lämmitystä. Jos oletetaan, että kaikki plasmasta poistuva säteily on jarrutussäteilyä, niin tässä tilanteessa plasmaan siirtyvää lämpöenergiaa voidaan kuvata yhtälöllä

$$P_{lämmitys} = P_{yllapito} + P_{\alpha} - P_{jarru} = P_{hukka} + \frac{d}{dt} W_P \quad (10)$$

$P_\alpha$  ja  $P_{jarru}$  voidaan kuvata seuraavilla tavoilla:

$$P_\alpha = n_D n_T \langle \sigma v \rangle E_\alpha V_p = n_e^2 \langle \sigma v \rangle E_\alpha \frac{V_p}{4} \quad (11)$$

$$P_{jarru} = C_B T^{\frac{1}{2}} n_e^2 V_p \quad (12)$$

missä  $P_{ylläpito} \rightarrow 0$ ,  $P_\alpha$  on alfahiukkasista saatu teho,  $P_{jarru}$  on alfahiukkasten jarrutussäteilynä menetetty teho,  $P_{hukka}$  kuvaa kaikkea toimintaan liittyvää hukkaenergiaa ja  $\frac{d}{dt} W_p$  on plasman kiihdyttämiseen tarvittava teho.  $C_B$  on plasman lämpökapasiteetti, kun magneettivuon tiheys B pysyy vakiona.

Plasman sisäisen energian kasvattamiseksi tehty työ  $W_p = 3n_e k_B T_e V_p$ , missä  $k_B$  on Boltzmannin vakio  $1,380649 * 10^{-23} \frac{m^2 kg}{s^2 K}$ , T on plasman lämpötila,  $E_\alpha$  on alfahiukkasten liike-energia 3,5 MeV (yhtälöstä (7)),  $V_p$  on plasman tilavuus ja  $C_B$  on lämpökapasiteetti. Lisäksi oletetaan plasman olevan tasainen 1:1 seos D ja T isotooppeja, jolloin niiden hiukkastiheydet  $n_D$  ja  $n_T$  ovat samat kuin elektronien hiukkastiheys  $n_e$ ,  $n_D = n_T = n_e \rightarrow n_D n_T = n_e^2$  (Kikuchi ym. 2012: 17-18). Törmäyspinta-alojen keskiarvo  $\langle \sigma v \rangle$  on saatu Kansainvälisen atomienergiajärjestö IAEA:n Evaluated Nuclear Data Filestä ENDF:stä (Kikuchi ym. 2012: 22; IAEA 2022b).

Hukkateho on verrannollinen kokonaisenergiämäärään energian koossapitoajan  $\tau_E$  aikana.  $\tau_E$  voidaan määrittellä:

$$\tau_E = \frac{W_p}{P_{lämmitys} - \frac{d}{dt} W_p} \quad (13)$$

Tämän suhteen kautta yhtälö (10) voidaan kirjoittaa  $\tau_E$ :n, Q:n ja  $P_{fuusio} = 5P_\alpha$  avulla, kun  $P_{ylläpito} \rightarrow 0$ :

$$0 + P_\alpha - P_{jarru} = P_{hukka} + \frac{d}{dt} W_p$$

$$n_e^2 \langle \sigma v \rangle E_\alpha \left( \frac{Q+5}{4Q} \right) - C_B T_e^{\frac{1}{2}} n_e^2 = \frac{3n_e k_B T_e}{\tau_E} + \frac{d}{dt} (3n_e k_B T_e) \quad (14)$$

Kun tilannetta tarkastellaan vakaata tilaa vastaavissa olosuhteissa, eli kun ajan muutos  $\frac{d}{dt} \rightarrow 0$ , niin lausekkeesta (13) saadaan hiukkastiheyden ja energian säilytysajan tulo  $n_e \tau_E$ :

$$\begin{aligned}
n_e^2 \langle \sigma v \rangle E_\alpha \left( \frac{Q+5}{4Q} \right) - C_B T_e^{\frac{1}{2}} n_e^2 &= \frac{3n_e k_B T_e}{\tau_E} + \frac{d}{dt} (3n_e k_B T_e) \\
n_e^2 \langle \sigma v \rangle E_\alpha \left( \frac{Q+5}{4Q} \right) - C_B T_e^{\frac{1}{2}} n_e^2 &= \frac{3n_e k_B T_e}{\tau_E} \\
n_e^2 \left( \langle \sigma v \rangle E_\alpha \left( \frac{Q+5}{4Q} \right) - C_B T_e^{\frac{1}{2}} \right) &= \frac{3n_e k_B T_e}{\tau_E} \\
n_e^2 \tau_E &= \frac{3n_e k_B T_e}{\left( \frac{\langle \sigma v \rangle E_\alpha (Q+5)}{4Q} - C_B T_e^{\frac{1}{2}} \right)} \\
n_e \tau_E &= \frac{3k_B T_e}{\left( \frac{\langle \sigma v \rangle E_\alpha (Q+5)}{4Q} - C_B T_e^{\frac{1}{2}} \right)} \tag{15}
\end{aligned}$$

Sijoittamalla yhtälöön (15)  $Q = 1$ , saadaan kannattavassa fuusiossa minimiarvo plasman hiukkastiheyden ja energian säilytysajan tulolle  $n_e \tau_E$ , jota kutsutaan Lawsonin kriteeriksi. Kun kriteerin määrittämä minimiarvo ylitetään, fuusiolla voidaan tuottaa enemmän energiaa kuin ylläpito vaatii. Kun kaavassa (14) huomioidaan reaktorin laitteiston anto- ja ottotehojen hyötysuhteet  $\eta_a$  ja  $\eta_o$ , voidaan se kirjoittaa:

$$n_e \tau_E = \frac{3k_B T_e * (1 - \eta_a \eta_o)}{\left( \frac{\langle \sigma v \rangle E_\alpha (Q+5)}{4Q} * \eta_a \eta_o - C_B T_e^{\frac{1}{2}} * (1 - \eta_a \eta_o) \right)} \tag{16}$$

Olettamalla, että  $\eta_a \eta_o \sim \frac{1}{3}$  ja huomioimalla, D-T fuusio tapahtuu tehokkaimmin, kun  $T_e \sim 15 \text{ keV}$  ( $1,7 * 10^8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) ja kun  $Q = 1$ , voidaan Lawsonin kriteeri laskea:

$$n_e \tau_E = 10^{20} \frac{\text{s}}{\text{m}^3} \tag{17}$$

Plasmaan syötetyn energian tulisi pysyä plasmassa siis ainakin  $10^{20}$  sekuntia jokaista kuutiometriä plasmaa kohden, jotta fuusio tuottaisi nettoenergiaa.

Kun plasma palaa, eli fuusion lämmittää itseään riittävästi fuusioon tarvittavan lämpötilan ylläpitämiseksi, hyötysuhde  $Q$ :n arvo lähestyy ääretöntä, jolloin Lawsonin kriteeriksi yhtälöstä (14) saadaan:

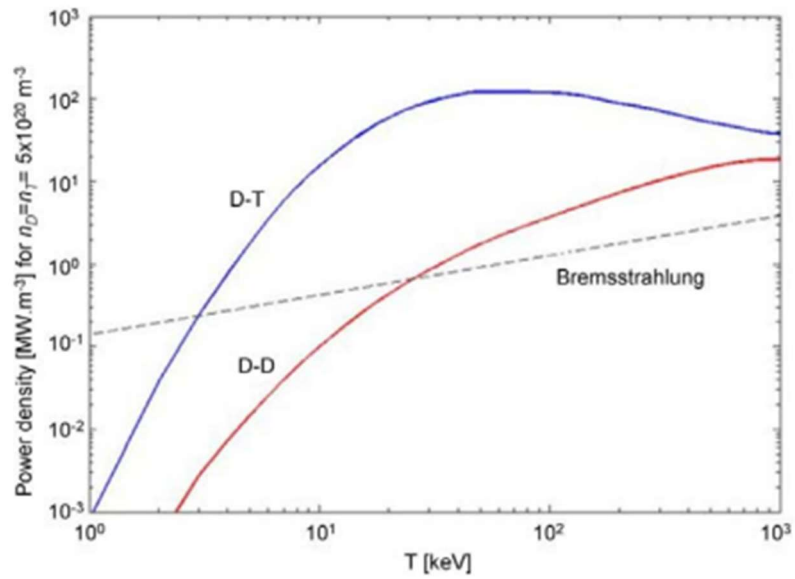
$$\lim_{Q \rightarrow \infty} n_e \tau_E = \lim_{Q \rightarrow \infty} \frac{3k_B T_e}{\left( \frac{\langle \sigma v \rangle E_\alpha (Q + 5)}{4Q} - C_B T_e^{\frac{1}{2}} \right)} = \frac{3k_B T_e}{\frac{\langle \sigma v \rangle E_\alpha}{4} - C_B T_e^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

Palava plasma käyttää kaiken saatavilla olevan polttoaineen loppuun ilman ulkoisen energian lisäämistä, kunhan olosuhteet pidetään fuusion kannalta otollisina. D-T fuusion palaminen on tehokkainta, kun  $T_e = 30 \text{ keV} = 2.5 * 10^{18} \text{ }^\circ\text{C}$ , jolloin Lawsonin kriteerin arvoksi saadaan:

$$n_e T_e \tau_E = 8.1 * 10^{21} \frac{\text{keVs}}{\text{m}^3} \quad (19)$$

$$n_e \tau_E = 2.7 * 10^{20} \frac{\text{s}}{\text{m}^3} \quad (20)$$

Lawsonin kriteerin avulla on myös mahdollista selvittää alin teoreettinen lämpötila, jossa fuusio voi olla kannattavaa. Tässä minimilämpötilassa fuusion teho saavuttaa jarrutussäteilynä menetetyin tehon (ks. Kuva 3). Kuvassa sinisellä on esitetty D-T fuusio ja punaisella D-D fuusio. Kuvaajasta voidaan nähdä, että D-D fuusio ylittää jarrutussäteilyn hukatehon vasta paljon korkeammassa lämpötiloissa: D-T ylittää jarrutussäteilyn tehon jo 3 keV lämpötilassa ja D-D vasta 20 keV lämmössä. Koska näin paljon korkeamman lämpötilan ylläpitäminen vaatii paljon enemmän ylläpitotehoa, D-T fuusio on todennäköisemmin reaktio, jota tuotantoreaktoreissa tullaan käyttämään. D-D fuusion etuna D-T fuusioon verrattuna olisi, ettei reaktio tarvitsisi ollenkaan tritiumia, jota ei esiinny luonnossa sen 12,6 vuoden puoliintumisajan takia (Kikuchi ym. 2012: 16, 19).



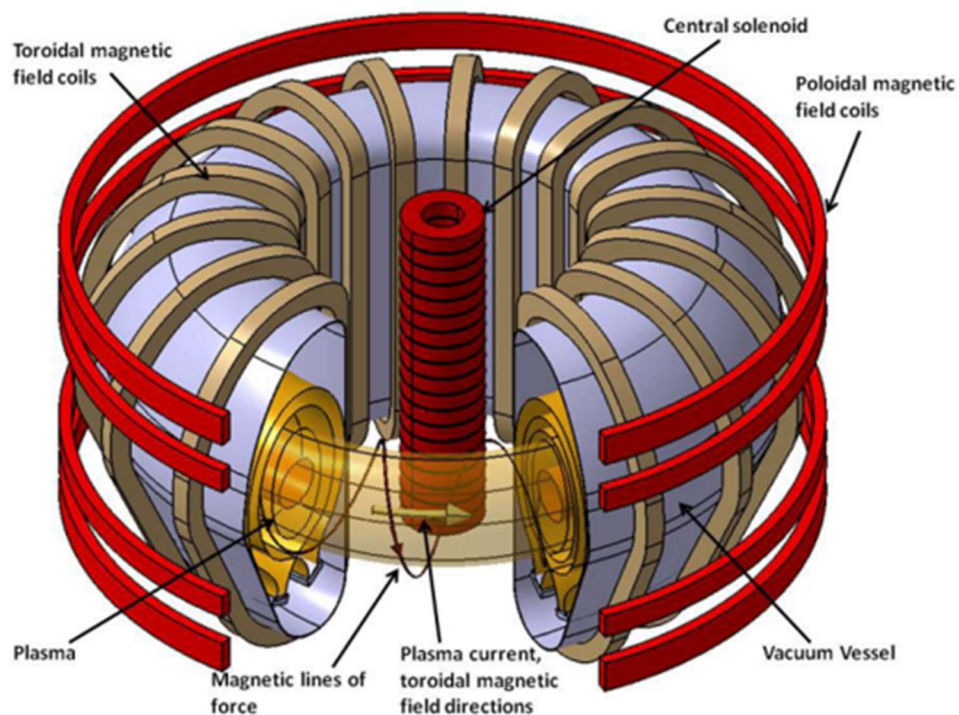
Kuva 3. Kuvaajan vaaka-akselilla plasman lämpötila (keV) ja pystyakselilla tehotiheys. Kuvaajaan merkitty energiatiheydet eri lämpötiloilla D-T ja D-D reaktiolle sekä jarrutussäteilynä menetetty energia, bremsstrahlung. (Fusion physics, © IAEA, 2012, 19)

### 3. Tokamak

Sana tokamak tulee venäjän kielestä ja sillä tarkoitetaan fuusioreaktoreita, jotka käyttävät reaktorin suuntaisia sekä sitä ympäröiviä magneettikenttiä fuusioituvan polttoaineen koossapitämiseen (Baiser 2003: 464). Tässä kappaleessa käsittelem tokamakin teoriaa ja sen toimintaperiaatteita. ITER on tokamak reaktori ja Beiser (2003: 464) piti sitä todennäköisimmin tulevaisuuden reaktoreiden teoreettisena mallina.

#### 3.1 Rakenne

Tokamak reaktorit ovat toruksen muotoisia. Torus on pyörähdykappale, joka muodostuu, kun ympyrä pyörähtää oman kehänsä ulkopuolisen akselin ympäri, muodostaen kansankielisesti donitsia muistuttavan avaruuskappaleen (ks. Kuva 4) (Kikuchi ym. 2012: 27)



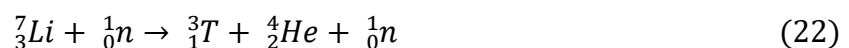
Kuva 4. Kaaviokuva tokamak-reaktorin rakenteista (*Fusion physics*, © IAEA, 2012, 28)



Fuusioreaktorit tulevat olemaan suuria. ITER tulee olemaan suurempi kuin nykyinen testifuusioreaktori JET, jonka halkaisija on 6 m. Valmistuessaan ITER:n reaktorin halkaisija tulee olemaan noin 12,4 m. Taloudellisesti kannattavien fuusiovoimaloiden uskotaan kuitenkin olevan vielä suurempia. Reaktorin koon ja hyötysuhteen välisestä yhteydestä tutkijat ovat arvioineet tulevaisuuden reaktorien kokoa ja ne tulevat olemaan halkaisijaltaan noin 16–18 m (Zomh 2019: 2, 6).

### 3.2 Polttoaine

Fuusioreaktorien polttoaine olisi deuteriumia ja tritiumia samassa suhteessa. Deuteriumia olisi runsaasti saatavilla merivedessä, noin  $1 D_2O : 6000 H_2O$  (Kikuchi ym. 2012: 15), josta se voitaisiin erotella käyttöä varten. Näin ollen deuteriumia riittäisi kaikille energiantuottajille, mikä vähentäisi valtioiden välistä energiataloudellista eriarvoisuutta, jota esimerkiksi öljyn harvinaiset esiintymät aiheuttavat (Kikuchi ym. 2012: 16). Tarkastelen fuusioenergia poliittisia ja taloudellisia vaikutuksia tarkemmin pohdinnassani. Litrassa merivettä olevalla deuteriumilla saataisiin fuusiossa yhtä paljon energiaa kuin 600 litralla bensiiniä. Tritium on harvinaisempaa, mutta sitä varten on jo suunnitelmia. Fuusioreaktiossa syntyviä neutroneja voitaisiin törmäyttää reaktorin sisäseinille asetettuihin litiumlevyihin, jolloin saataisiin aikaan seuraavia reaktioita



joista saadaan reaktiotuotteena lisää tritiumia ja heliumia. Tätä tritiumin valmistustapaa kutsutaan tritium breedingiksi. Litiumia löytyy luonnosta ja se mahdollistaisi harvinaisemman tritiumin riittävän saatavuuden (Beiser 2003: 464).

Toisin kuin fissioreaktorissa, jossa reaktorissa kerrallaan olevan polttoaineen määrä riittää vaarallisen räjähdysen aiheuttamiseen, fuusioreaktorissa olisi kerrallaan polttoainetta vain muutamaa seuraavaa sekuntia varten (Kikuchi ym. 2012: 16). Tällöin reaktorilla ei ole mahdollisuutta karata hallitsemattomaan ketjureaktioon.

Polttoainetta kuumennetaan johtamalla plasman sisälle sähkövirta. Plasman sisäinen vastus aiheuttaa sen lämpenemisen sähkövirran vaikutuksesta. Tarkoitus on kuitenkin lämmittää plasma 10 keV:n lämpötilaan. Vastuksesta syntyvä lämmitys riittää 1 keV:iin asti, sillä plasman sisäinen vastus pienenee lämpötilan noustessa. Muita tapoja lisätä plasman lämpötilaa ovat hiukkassäteiden ja radioaaltojen kohdistaminen plasmaan.

Näillä ulkoisilla lämmitysmenetelmillä on haittavaikutuksena plasmaan syntyvä turbulenssi. Suuremmissa reaktoreissa plasman turbulenssin merkitys pienenee, sillä plasman koossapitoaika riippuu myös reaktorin koosta. Turbulenssin vaikutuksen vähentämiseksi ITER tulee olemaan lähes kaksi kertaa suurempi kuin edelliset tokamakit (Kikuchi ym. 2012: 30).

### 3.3 Plasmanhallinta

Fuusioteknologian 50-vuotisen historian aikana on ehditty kokeilla useita erilaisia menetelmiä fuusioituvan polttoaineen koossapitämiseen. Niistä tähän asti menestyksekkäin on kuitenkin ollut tokamak ja sen toruksen muotoista reaktoria ympäröivät magneettikentät (Kikuchi ym. 2012: 225).

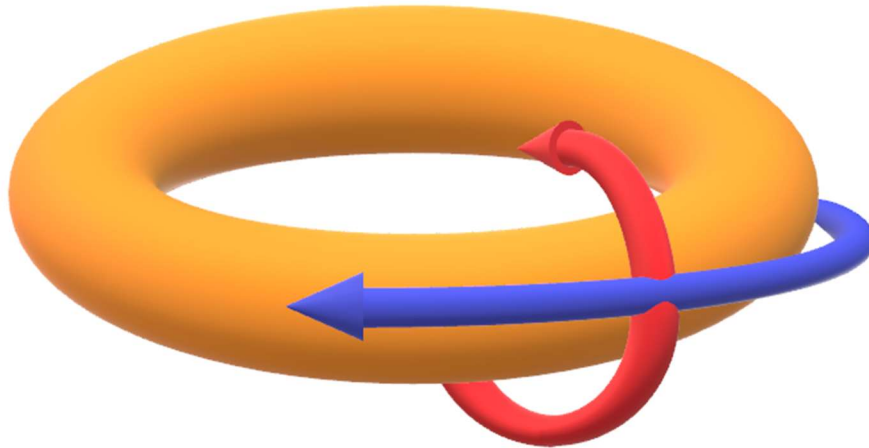
Magneettikenttien tarkoituksena on pitää kuumennettu plasma riittävän tiiviinä tehokkaan fuusion ylläpitämiseksi sekä estää plasmaa pääsemästä liian lähelle reaktorin seiniä. Sähköisesti varautunut plasma pysyy magneettikentän vaikutuksesta tiiviisti keskellä reaktorin sisärakennetta. Reaktorin seinät on valmistettu kestävämpään plasmasta lähtevää lämpösäteilyä, mutta ne eivät kestä suoraa kosketusta noin 100 miljoonaa °C plasman kanssa (Kikuchi ym. 2012: 225).

Toinen ongelma reaktoria suunniteltaessa oli palamattoman polttoaineen hallinta. Jos plasmaa kuumennettaisiin pitkässä, sylinterimäisessä reaktorissa, ongelmaksi tulisi reaktorin loppuun päätyvä, fuusioitumaton polttoaine. Mikäli polttoaine saadaan käännettyä ympyräradalle, pyöreässä reaktorissa polttoaineen rata ei pääty vaan jatkaisi kiertoa reaktorissa (Kikuchi ym. 2012: 232).

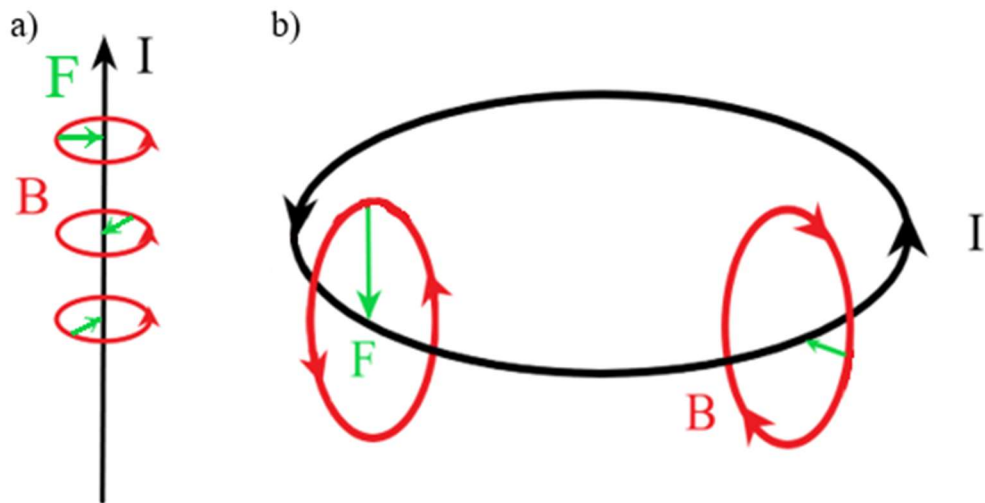
Plasmaa hallittaisiin reaktorin suuntaisella, toruksen muotoisella pyöreällä magneettikentällä. Sähköisesti varautunut plasma on magnetoituvaa ja pysyy vangittuna magneettikentässä. Varatut hiukkaset saavat liikkua vapaasti reaktorin suuntaisten magneettikentän kenttäviivojen suuntaisesti (suunta merkitty kuvaan 5 sinisellä nuolella), mutta kenttä vastustaisi plasman kenttäviivoilta poikkeavaa liikettä, kuten kohti reaktorin seinämiä (Kikuchi ym. 2012: 27).

Reaktorin suuntainen magneettikenttä ei onnistu kuitenkaan hallitsemaan plasmaa täysin johtuen magneettikentässä esiintyvistä pienistä epätasaisuuksista. Nämä vajeet ja epätasaisuudet voidaan paikata synnyttämällä koko reaktorin matkalle poloidiaalinen, eli plasman kulkusuuntaan nähden kohtisuora, reaktorin ympäröivä magneettikenttä (kuvassa 5 suunta merkitty punaisella nuolella). Plasmaan indusoitu sähkövirta kohdistaisi

ympäriin virtajohtimen tavoin magneettikentän, joka auttaisi pitämään plasman tiiviinä. Plasman sisään induoitu sähkövirta myös samanaikaisesti aiheuttaisi resistanssia plasmassa ja siitä johtuvaa kuumenemista, mikä reaktorin käynnistymisen jälkeen lähes yksinään voisi ylläpitää riittävää lämpötilaa (Beiser 2003: 466; Windsor 2019: 2).



*Kuva 5. Kuvassa esitetty tokamakin kaksi erisuuntaan vaikuttavaa magneettikenttää. Toruksen muotoinen reaktori (oranssilla). Kuvaan merkitty reaktorin suuntainen magneettikenttä (sininen nuoli) ja poloidiaalisen, eli plasman kulkusuuntaa ympäröivän magneettikentän suunta (punainen nuoli).*



*Kuva 6a) Suorassa sähköjohtimessa kulkevan virran  $I$  (musta nuoli) synnyttämän magneettivuon tiheyden suunta  $B$  (punainen nuoli). b) Tokamak-reaktorin sisällä olevaan plasmaan indusoidun sähkövirran synnyttämä magneettikenttä  $B$  ja sen plasmaan kohdistama voima  $F$  (vihreä nuoli) kuvan 6a periaatteen mukaisesti.*

Kuvasta 6a nähdään, miten sähköjohtimessa kulkeva virta synnyttää johtimen ympärille magneettikentän, joka puristaa johdinta kasaan (Windsor 2019: 5). Kuvassa 6b sähköisesti varattuun plasmaan indusoitu sähkövirta  $I$  (kuvattu mustalla) toimii samalla tavalla. Se synnyttää plasman ympärille poloidiaalisen, eli reaktorin ympäri suuntautuvan magneettikentän  $B$  (kuvattu punaisena). Magneettikenttä kohdistaa sähköisesti varautuneeseen plasmaan kaikista kulmista voiman  $F$  (kuvattu vihreällä), jonka vektori osoittaa kohti reaktorin keskusta (Beiser 2003: 210).

Tämä plasmanhallintamenetelmä perustuu magneettikentillä koossa pysyvään polttoaineeseen ja siksi sen tehokkuus on sidottu olemassa olevan magneettien tehokkuuteen ja niiden tulevaan kehitykseen. Nykyisillä suprajohdavilla magneeteilla saadaan aikaan muutaman teslan vahvuisia magneettikenttiä, jotka mahdollistavat 10 kertaisen ilmakehän paineen kohdistamisen plasmaan. Voimakkaammat magneetit puristaisivat plasman tiiviimmäksi lisäten reaktorin tehokkuutta (Kikuchi ym. 2012: 61).

Kuten aikaisemmin mainitsin, plasman hallintaa vaikeuttaa plasman kuumetessa ilmenevä turbulenssi. Turbulenssin seurauksena plasmasta pääsee karkaamaan hiukkasia ja lämpöenergiaa. Ongelmat pystytään ratkaisemaan joko lisäämällä energiansyöttöä plasmaan, jotta menetetty energia saadaan korvattua tai suurentamalla reaktorin kokoa. Suuremmissa reaktorissa fuusioon vaadittavat olosuhteet voidaan ylläpitää turbulenssista huolimatta. Tutkijat kuitenkin pyrkivät ymmärtämään turbulenssin syitä ja vaikutuksia paremmin, jotta niistä mahdollisesti päästäisiin eroon (Wilson 2019: 5).

### **3.4 Energian kerääminen talteen**

Fuusiossa syntyy korkeaenerginen, varaukseton neutroni, jolla on yhtälön (7) mukaan liike-energiaa noin 80,1 % fuusioreaktiossa vapautuvasta energiasta. Neutronin liike-energia saadaan kerättyä talteen reaktorin kuoreen, jossa myös tritium breeding tapahtuu (Wilson 2019: 3). Neutronien liike-energia muuttuu lämpöenergiaksi, jota voidaan käyttää perinteisen höyryturbiinin pyörittämiseen (Kikuchi ym. 2012: 26).

Fuusioreaktiossa syntyy neutronin lisäksi sähköisesti varautuneita hiukkasia, kuten D-T-fuusiossa syntyvä positiivisesti varautunut alfahiukkanen, joten voimalan olisi mahdollista kerätä energiaa talteen myös sähkökentässä jarruttavilta alfahiukkasilta vapautuvasta säteilystä tai induktion avulla (Kikuchi ym. 2012: 26).

Fuusiossa syntyvät alfahiukkaset ovat positiivisesti varautuneita ja hidastuvat nopeasti reaktorin magneettikentissä. Jarruttaessaan ne luovuttavat energiaansa säteilynä ja auttavat ylläpitämään reaktorin lämpötilaa. Jarruttava alfahiukkanen vapauttaa mikroaaltosäteilyä syklotronisäteilynä, eli kiihdyttävän tai suuntaansa muuttavan sähkömagneettisen hiukkasen säteilemänä energiana. Alfahiukkanen säteilee myös röntgensäteilyä kuten muutkin nopeasti hidastuvat sähkömagneettiset hiukkaset. Mikroaaltosäteily auttaa yhdessä plasman sisäisen sähkövirran resistanssin kanssa ylläpitämään riittävän korkeaa lämpötilaa reaktorin sisällä, mutta mikroaaltosäteilyn hyödyntäminen suoraan energian tuotantoon ei tällä hetkellä ole todennäköistä. Tulevaisuudessa alfahiukkasen jarrutussäteilynä syntyvän, ionisoivan röntgensäteilyn energiaa voitaisiin mahdollisesti kerätä talteen sähköä johtavilla foliolevyillä ja valosähköisellä ilmiöllä (Windsor 2019: 2; Kikuchi ym. 2012: 26). Valosähköisessä ilmiössä fotonit, eli sähkömagneettisen säteilyn hiukkaset, törmäävät metallin elektroneihin, luovuttavat niille energiansa ja saavat ne irtomaan metallista. Vapaiden elektronien virta johtaa sähkövirran syntymiseen (Beiser 2003: 62).

Röntgensäteilyn vaarallisuuden vuoksi energiaa kerääviä sekä suojaavia kerroksia olisi oltava useita, jotta henkilökunnan mahdollisilta haittavaikutuksilta voitaisiin välttyä. Reaktorin rakennetta olisi muutenkin suunniteltava uudelleen röntgensäteilyn energian talteen keräämistä varten, sillä nykyiset reaktorit eivät ole siihen tarkoitettuja tai suunniteltuja (Kikuchi ym. 2012: 26).

## 4. Muita ratkaisuja fuusion toteuttamiseen

Fuusioreaktion aikaansaamiseksi ja valjastamiseksi on myös muita mahdollisia ratkaisuja tokamak-reaktoreiden lisäksi. Tässä kappaleessa käsittelemme niistä kahta: lasereita hyödyntävää inertiafuusioreaktoria sekä monimutkaisempia magneettikenttiä käyttävää stellaraattoria.

### 4.1 Inertiafuusio

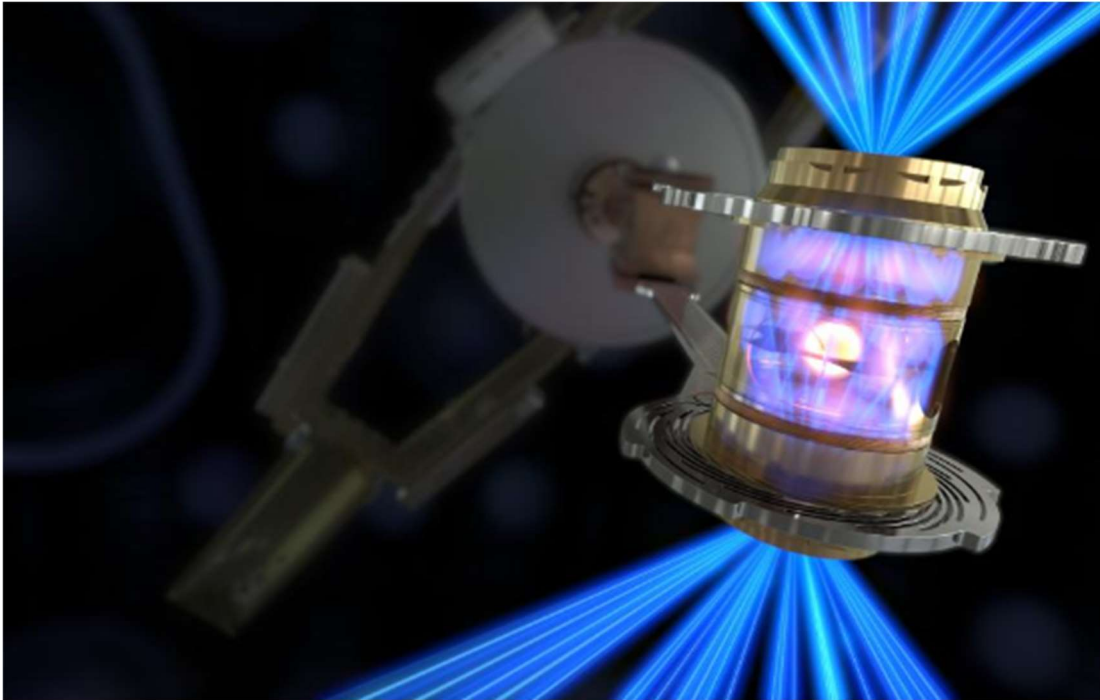
Yksi mahdollinen ratkaisu rengasmaisten reaktorien lisäksi fuusion valjastamiseen toruksen muotoisten reaktorien lisäksi on inertiaalifuusio eli inertial confinement fusion (jatkossa ICF). Siinä laseria tai ionisäteilyä käytetään kohdistamaan voima kiinteään polttoainepanoniin tai -pellettiin (ks. Kuva 7), saaden kuoren räjähtämään ulospäin. Myös elektroni- tai protonisäteitä voitaisiin mahdollisesti hyödyntää. Koska liikemäärän on säilyttävä, polttoaine räjähdyskeskellä puristuu voimakkaasti kasaan noin sadasosaan alkuperäisestä koostaan. Puristuessaan polttoaine kuumenee fuusioreaktion vaatimaan lämpötilaan ja hetkellisesti voidaan saada nettoenergiaa fuusioreaktiosta ennen kuin panos hajoaa räjähdyksessä. Kun saadaan ylläpidettyä kymmenen 0,1 mg panoksen räjähdysisiä sekunnin sisällä, voitaisiin räjähdyksistä seuraavista fuusioreaktioista odottaa saatavan noin 100 MJ lämpöenergiaa polttoainepanosta kohden, yhteensä noin 1 GJ. Siitä noin 30 % olisi muunnettavissa sähköenergiaksi (Beiser 2003: 467; Kikuchi ym. 2012: 35).

Polttoainepanoksen ideaali koko voidaan selvittää ottamalla huomioon, että polttoaineen olisi aluksi oltava kiinteässä olomuodossa, mikä vedyn tapauksessa tarkoittaa hyvin matalia lämpötiloja (Kikuchi ym. 2012: 35). Koska D-T fuusio tapahtuu optimaalisesti noin 10 keV lämpötilassa, eli noin 100 miljoonaa °C, saadaan Kikuchin ym. (2012: 35) mukaan teoreettisen panoksen ideaaliksi halkaisijaksi arvioitua noin 1 mm.

Ensimmäinen merkittävä inertiafuusio koe suoritettiin elokuussa 2021 yhdysvaltalaisella National Ignition Facility NIF-reaktorilla, jossa tuotettiin inertiafuusiossa 1,35 MJ energiaa. Syyskuussa 2022 samalla reaktorilla tuotettiin 1,2 MJ energiaa. Paremmen tuloksen toistamista olivat viivästyttäneet polttoainepanosten pienet epätäydellisyydet. Niistä johtuneet ongelmat kyettiin ratkaisemaan lisäämällä laserien tehoa, mikä mahdollisti paksumpiseinäisten panosten käyttämisen. Syyskuun 2022 kokeessa NIF-reaktorin yhteensä 192 laseria kohdistivat polttoaineeseen 2,08 MJ kokonaistehon, kun edeltävässä elokuun 2021 kokeessa laserien teho oli 1,92 MJ, mikä

tarkoittaa 8,3 % kasvua laserien tehossa (LLNL 2022a).

Myöhemmin joulukuussa 2022 NIF teki merkittävän läpimurron fuusion kehityksessä onnistuessaan tuottamaan enemmän energiaa fuusioreaktorilla kuin mitä se kulutti reaktion aikaansaamiseksi (LLNL 2022b). Kerroin aiemmin, että tämä on ollut tavoitteena jo kauan ja nyt Q-arvo on saatu suuremmaksi kuin 1. Reaktori käytti 2,05 MJ energiaa ja reaktiossa sitä vapautui 3,15 MJ.



*Kuva 7. LLNL 2022. Satoja lasereita kohdistetaan polttoainepanokseen, mikä saa sen kuumenemaan ja räjähtämään, mahdollistaen sisällä olevan vedyn fuusioitumisen räjähdystä seuraavassa kuumuudessa ja paineessa (LLNL 2022b). (Lawrence Livermore National Laboratory, CC BY-NC-SA 4.0)*

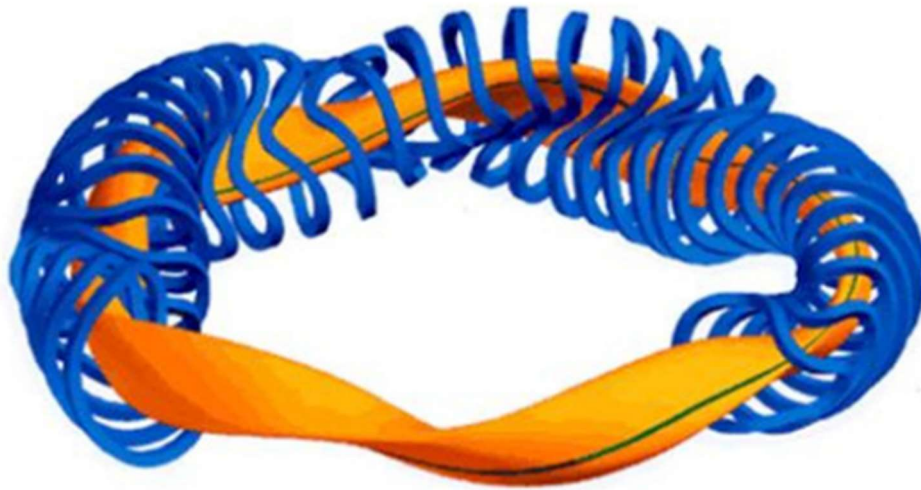
## 4.2 Stellaraattori

Toinen tokamakin lisäksi toroidin muotoista reaktoria käyttävä malli on stellaraattori. Sen idean kehitti Lyman Spitzer vuonna 1951. Stellaraattorit eroavat tokamakeista niiden reaktoria ympäröivien magneettikenttien asettelusta ja suunnista. Tokamakissa plasma kulkee toroidin muotoisen reaktorin sisällä suoraa, kaksiulotteista ympyrärataa pitkin. Stellaraattoreissa rata ei ole ympyrämuotoinen, vaan muistuttaa enemmän spiraalia tai heliksiä (ks. kuva 8). Magneettikentät eivät myöskään asetu kohtisuorasti reaktorin ympärille. Magneettikenttien epäsymmetrinen asettelu stellaraattorin ympärille mahdollistaa plasman hallinnan ilman plasman sisäisen sähkövirran indusoimaa magneettikenttää. Stellaraattoreissa on kuitenkin huolehdittava riittävästä suojauksesta



plasmasta peräisin olevien alfahiukkasten ja herkkien kolmiulotteista magneettikenttää luovien käämien välillä (Kikuchi ym. 2012: 31-32, 847-848).

Stellaraattorit eivät tarvitse plasmaan indusoitua sähkövirtaa ja sen synnyttämää magneettikenttää kuten tokamak-reaktorit. Erilainen magneettikenttärakenne aiheuttaa kuitenkin myös puutteita. Magneettikentän epäsymmetrisyyden takia plasman hiukkasvirrat saattavat ajoittain merkittävästi poiketa reitiltään, eivätkä muutkaan sähköisesti varautuneet hiukkaset jää kiinni pelkästään reaktorin suuntaiseen magneettikenttään. Tokamak reaktoriin verrattuna stellaraattorin etu olisi, että niissä voitaisiin hyödyntää jo olemassa olevaa suprajohdeteknologiaa reaktoria ympäröivissä käämeissä, mikä vähentäisi ylläpitokuluja (Kikuchi ym. 2012: 848).



*Kuva 8. Malli stellaraattorin plasmavirrasta (oranssilla) ja reaktoria ympäröivistä magneettikentistä (sinisellä) (Fusion physics, © IAEA, 2012, 32)*

## 5. Pohdinta ja yhteenveto

Fuusio energiantuotantomuotona on tärkeä osa kestävästä tulevaisuudesta. Koostan lopuksi, mikä tekee fuusiosta niin hyvän perustan tulevaisuuden energiantuotannolle. Pohdin myös fuusion mahdollisia haittoja ja selvitän, minkälaista keskustelua Suomessa käydään tällä hetkellä ydinenergiasta ylipäättäen, sillä fuusiovoimaloita ei ole vielä Suomessa eikä muuallakaan tuotantokäytössä.

### 5.1 Fuusion hyödyt

Kaikilla sähköntuotantomuodoilla on omat huonot puolensa ja haittavaikutuksensa. Fossiiliset polttoaineet, kuten kaasu ja öljy, tulevat loppumaan. Lisäksi ne tuottavat poltettaessa kasvihuonekaasuja. Tuuli- ja aurinkoenergia eivät tuota päästöjä, mutta niiden saatavuus ei ole tasaista eikä varmaa. Niistä saatavan energian määrä on riippuvainen ympäristöstä ja vaihtelee päivittäin, toisin kuin energiantarve. Maalämpö ja vesivoima tuottavat tasaisemmin energiaa, mutta ovat puolestaan riippuvaisia valtioiden maantieteellisestä sijainnista. Fissioenergia on riskialtista, mutta fuusioenergia minimoi muita energiantuotantotapoja vaivaavia ongelmia (Windsor 2019: 3-4).

Fuusioreaktorit ja niiden polttoaine eivät yksinään ole yhtä vaarallisia kuin fissiovoimalat ja niiden uraani. Reaktion ylläpitäminen vaatii erittäin tarkat ja vaikeasti ylläpidettävät olosuhteet. Mikäli reaktorissa tapahtuisi toimintahäiriö, reaktio loppuisi nopeasti eikä karkaisi käsistä kuten hallitsematon fissioreaktio. Fuusioreaktorissa on polttoainetta vain muutaman seuraavan hetken kestävästi ylläpitämiseen, kun taas fissioreaktoreissa polttoaine laitetaan reaktoriin suurina annoksina. Fissioreaktorin polttoaineesta voitaisiin valmistaa vaarallisia pommeja, mutta deuterium ja tritium tarvitsevat fuusioreaktorin tai pienemmän ydinräjähteen, jotta niistä saadaan energiaa (Kikuchi ym. 2012: 16).

Fissioenergian käytöstä on syntynyt paljon pitkäaikaista jätettä. Se on radioaktiivisena aineena vaarallista kauan ja on säilöttävä huolellisesti satoja vuosia. Tätä ongelmaa olisi mahdollista helpottaa fuusioreaktioissa syntyvillä neutroneilla. Niillä olisi mahdollista hajottaa fissiolla fissioreaktorien radioaktiivisia jätteitä lyhyemmän puoliintumisajan aineiksi, lyhentäen niiden vaatimaa varastointiaikaa (Kikuchi ym. 2012: 51). Tämä voi osoittautua suureksi eduksi tulevaisuudessa, jossa fuusio- ja fissioenergia täydentävät toisiaan riittävän energiantarjonnan takaamiseksi.

Ukrainassa 2022 alkaneessa Venäjän hyökkäyssodassa näimme kuinka aikoinaan tuhoutunut Tšernobylin ja käytössä oleva Zaporizhian ydinvoimala joutuivat sotatoimien keskelle. Mikäli hyökkäyksen kohteeksi joutuneen reaktorin yhteys sähköverkkoon sekä varavirtalähteisiin katkeaisi eikä sitä saataisi palautettua, jäisivät fissioydinvoimalat ilman tärkeitä turvatoimiaan (IAEA 2022a). Tämän seuraukset voisivat olla tuhoisat. Siksi IAEA:n puolueettomien tarkkailijoiden päästäminen Zaporizhian voimalaan syyskuussa 2022 nähtiinkin tärkeänä askeleena Tšernobylin kauheuksien toistumisen välttämiseksi. Fuusiovoimaloissa ei ole samanlaisia riskejä sähkökatkosten takia, sillä reaktio vain pysähtyisi, kun lämpötila reaktorissa laskee.

Fuusiovoimaloiden etuna olisi myös niiden käyttämän polttoaineen helppo saatavuus. Kuten Kikuchi ym. (2012: 15-16) toteavat, deuteriumia olisi käytännössä loputtomasti saatavilla kaikkialla, sillä sitä saadaan merivedestä ja tritiumia voidaan tuottaa lisää fuusioreaktorin toiminnan ohessa tritium breeding- menetelmällä, mikä varmistaisi halvemman ja ympäristöystävällisemmän energian saatavuuden ympäri maailman.

## **5.2 Fuusion riskit ja haittavaikutukset**

Fuusiossa syntyvät reaktiotuotteet eivät ole pitkään radioaktiivisia ja hajoavat nopeasti (Kikuchi ym. 2012: 15-16). Vaikka fuusiossa polttoaineena käytettävä tritium on radioaktiivista, se ei säteile yhtä voimakkaasti kuin fissiovoimalan polttoaineet tai jätteet. Tritiumin säteily on heikkoa ja pysähtyy jopa paperiin (Kikuchi ym. 2012: 13).

Fuusioreaktoreissa on kuitenkin omat ongelmansa, joista on huolehdittava toiminnan turvallisuuden varmistamiseksi. Kuten aiemmin mainittiin, D-T fuusio vapauttaa yhden heliumatomin ja yhden neutronin. Neutronit ovat korkeaenergisää ja aiheuttavat aktiivisuutta törmätessään reaktorin rakenteisiin. Siksi on tärkeää löytää mahdollisimman matalan aktiivisuuden materiaaleja, jotta reaktoreihin varastoituva radioaktiivisuus häviäisi ideaalissa tilanteessa alle sadassa vuodessa reaktorin käytöstä poistamisen jälkeen (Kikuchi ym. 2012: 12-13).

Fuusioreaktorissa tarvittava tritium valmistetaan tritium breeding menetelmällä. Siinä tarvittava litium on erittäin herkästi reagoiva metalli, joka palaa tai jopa räjähtää reagoidessaan veden kanssa (Beiser 2003: 466). Tämä voi aiheuttaa mahdollisia vaaratilanteita, mikäli litiumvarastojen turvallisuus vaarantuu ja ne altistuvat kosteudelle tai muulle litiumin kanssa reagoiville aineille. Tritium breedingissä valmistettava tritium on radioaktiivista (Beiser 2003: 466). Tritiumin radioaktiivinen säteily on kuitenkin

heikkoa ja pysähtyy jopa paperiin esteenä. Vaikka tritiumia päätyisi vahingossa henkilökunnan elimistöön, se ei kerry elimiin vaan poistuu kehosta normaalien elintoimintojen mukana (Kikuchi ym. 2012: 13).

### **5.3 Asenteet ja mielipiteet**

Suomessa ei tällä hetkellä keskustella fuusioenergiasta, sillä toimivia voimaloita ei ole rakennettu missään, eikä keskustelu siitä ole ajankohtaista. Tarkastelen kuitenkin, miten Suomessa tällä hetkellä puhutaan fissioenergiasta, koska näen sen olevan lähin analogia fuusioenergialle ja mahdollinen ennakkoasenne pohja siihen liittyvissä keskusteluissa. Tästä voisi tehdä myöhemmin tutkimusta, kunhan fuusioreaktorit tulevat ajankohtaisemmiksi ja alkavat yleistyä taloudellisessa käytössä.

Suomessa on tällä hetkellä ydinenergialle enimmäkseen myönteinen ilmapiiri. Ylen (2022) kansanedustajille teettämän kyselyn mukaan yli puolet kansanedustajista on sitä mieltä, että Suomi tarvitsee lisää ydinvoimaa. Muualla Euroopassa ollaan luopumassa tai vähentämässä ydinenergian käyttöä. Esimerkiksi Saksan hallitus on päättänyt luopua kokonaan ydinvoiman käytöstä. Suomalaisessa keskustelussa nousee esiin myös kriittisiä kantoja ydinenergiaan. Uutisessa vihreiden kansanedustaja Satu Hassi tuo esille ydinvoimaan liittyviä riskejä, joita Venäjän hyökkäyssota Ukrainassa on korostanut (Yle 2022). Nämä riskit ovat kuitenkin fissioenergialla merkittävämmät kuin fuusioon perustuvalla energialla (Kikuchi ym. 2012: 16). Vaikka fuusiolla toimivia reaktoreita ei vielä ole käytössä, olisivat sen käytöstä tai potentiaalisesta sabotaasista aiheutuvat riskit paljon pienemmät. Kun fuusioreaktorit aikanaan saadaan käyttöön, riskit ydinenergian vastustajien argumentteina eivät ole enää yhtä painavia.

SDP:n Tarja Filatov huomauttaa Olkiluodon 3. reaktorin rakentamisessa ilmenneistä viivästyksistä (Yle 2022). Rakennusprojekteihin liittyvät viivästykset eivät kuitenkaan ole mihinkään yksittäiseen rakentamiseen alaan ominaisia, enkä sen takia näe tätä hyvin perusteltuna kritiikkinä ydinvoimaa vastaan.

Samassa uutisessa vasemmistoliiton Johannes Yrttiaho tuo esille, miten paljon vahinkoa uraanin louhimisesta aiheutuu ympäristölle muuten ympäristöystävälliseksi kehitettyä ydinvoiman prosessissa (Yle 2022). Fuusioreaktorit valmistuttuaan tarvitsisivat polttoainekseen vain merivedestä erotettua veden deuterium isotooppia ja tuotannon aikana litiumista valmistettavaa harvinaisempaa tritiumia.

Lopuksi haluaisin vielä pohtia fuusioenergian historiaa suuressa kuvassa. Fuusioenergia, kuten monet keksinnöt ihmiskunnan historiassa, valjastettiin muutamassa vuodessa aseelliseen käyttöön. Vaikka hallittu fuusioenergia onkin jo kauan ollut ”vain 10 vuoden päässä”, aina on ilmennyt joitakin uusia ongelmia, joiden ratkaisemista olemme jääneet odottamaan. Joulukuussa 2022 saadut tulokset inertiafuusion puolelta herättivät toivoa. Teknologian kehitys on ollut jatkuvasti kiihtyvää. Olemme viime aikoina nähneet, miten tekoäly on ottanut suuria harppauksia eteenpäin ja odotan innolla, miten sitä voitaisiin soveltaa fuusioenergiaa vaivaavien ongelmien ratkaisemiseen ja etenkin stellaraattorin monimutkaisten ja plasmassa tapahtuviin muutoksiin reagoivan magneettikentän suunnitteluun ja ohjaamiseen.

## 6. Lähteet

- Baiser 2003, *Concepts of modern physics*, 6.p. 527 s. McGraw-Hill, New York.
- IAEA (2022a), Update 104 – IAEA Director General Statement on Situation in Ukraine, <<https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/update-104-iaea-director-general-statement-on-situation-in-ukraine>>, viitattu: 21.12.2022
- IAEA (2022b), Evaluated Nuclear Data File (ENDF), <<https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>>, viitattu: 22.12.2022
- ITER (2021), What is ITER? <<https://www.iter.org/proj/inafewlines#1>> viitattu: 31.01.2023
- Kikuchi, M., Lackner, K., & Quang Tran M. (toim.). (2012,-). *Fusion physics*. IAEA, Vienna.
- LLNL (2022a), Lawrence Livermore National Laboratory, 7.10.2022, High-Laser-Energy Shot Puts NIF Back on Track Toward Ignition, <<https://lasers.llnl.gov/news/high-energy-shot-puts-nif-back-on-track-toward-ignition>>, (artikkeli), viitattu: 29.11.2022
- LLNL (2022b), Lawrence Livermore National Laboratory, 14.12.2022, National Ignition Facility achieves fusion ignition, <<https://www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-achieves-fusion-ignition>>, (artikkeli), viitattu: 22.12.2022
- Singh, A., & Agrawal, M. (2007). Acid rain and its ecological consequences. *Journal of Environmental Biology*, 29(1), 15.
- Tilastokeskus 2021, *Suomi lukuina 2021*. 48 s. Punamusta oy, Tampere.
- Windsor 2019, Can the development of fusion energy be accelerated? An introduction to the proceedings. *Phil. Trans.R. Soc. A 377*: 20170446-
- Yle (2022), Lisäydinvoima saa vahvan tuen eduskunnasta – Ylen kyselyn mukaan yli puolet kansanedustajista kannattaa, <<https://yle.fi/uutiset/3-12669270>>, 25.11.2022
- Zomh, H. 2019, *On the size of tokamak fusion power plants*. *Phil. Trans. R. Soc. A 377*: 20170437. <<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0437>>, viitattu: 22.12.2022