

SAULES ENERĢIJA UZ ZEMES

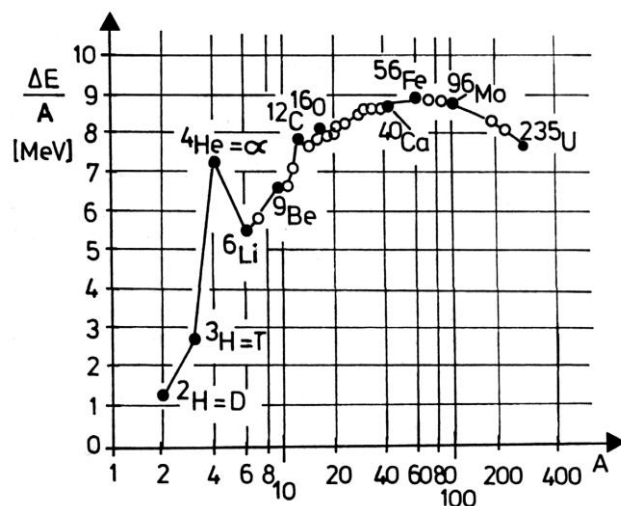
Enerģijas krājumi uz Zemes. Cilvēces nodrošināšana ar pietiekamu enerģijas daudzumu ir priekšnoteikums tālākai civilizācijas attīstībai. Pašreizējais vidējais enerģijas patēriņš pasaulē ir 2 kW uz cilvēku. Taču enerģijas sadalījums ir ļoti nevienmērīgs: 100 W trešās pasaules valstīs un 10 kW augsti attīstītās industriālajās valstīs. Kopējais patērējamais enerģijas daudzums sasniedz 14 TW . Pieaugot dzīves līmenim un cilvēku skaitam, enerģijas patēriņš neapšaubāmi pieaugs. Jādomā, ka tuvākajos 30 gados nepieciešamais kopējais enerģijas daudzums varētu pārsniegt augšā minēto skaitli 2 - 3 reizes.

Principā uz Zemes esošie enerģijas krājumi ir pietiekoši. Zeme saņem no Saules $5,4 \cdot 10^{24}\text{ J}$ gadā. Tam jāpieskaita no Zemes iekšienes nākošais siltums, kas ir 10^{21} J gadā. Akmeņogļu, dabiskās gāzes un naftas krājumu potenciālā enerģija ir 10^{23} J . Tradicionālajās atomelektrostacijās, saskaldot smago elementu kodolus, varētu iegūt $10^{21} - 10^{23}\text{ J}$. Kodolsintēzes ceļā, sakausējot deiterija kodolus, iegūstamā enerģija ir milzīga - 10^{31} J . Sintēzei izmantojot deiteriju un tritiju, iegūstamais enerģijas daudzums ir mazāks - $5 \cdot 10^{27}\text{ J}$, kam par iemeslu ir ierobežotais litija daudzums uz Zemes, kas vajadzīgs tritija radīšanai reaktorā. Taču arī šis pēdējais skaitlis ir desmit miljonus reizes lielāks par pašreizējo kopējo enerģijas patēriņu...

Neskatoties uz šiem lielajiem enerģijas krājumiem, iezīmējas nopietnas problēmas. Akmeņogļu, dabiskās gāzes un naftas sadedzināšana dod 90% no pašreiz patērējamās enerģijas daudzuma. Diemžēl, šie enerģijas avoti uz Zemes ir izvietoti ļoti nevienmērīgi, kas ir viens no politiskā saspīlējuma cēloņiem mūsdienu pasaulē. Paredzams, ka naftas un gāzes krājumi drīzumā izsīks. Jāatceras, ka šo fosīlo enerģijas avotu izmantošana palielina oglekļa dioksīda koncentrāciju atmosfērā, kas rada nevēlamas klimata izmaiņas.

Jāsecina, ka nākotnes enerģija, šī vārda visplašākajā nozīmē, var būt tikai kodolenerģija. Te jāakcentē, ka ir divi principiāli dažādi kodolenerģijas iegūšanas ceļi: kodolskaldīšana un kodolsintēze. Kodolsintēzes ceļš ir daudz drošāks, taču nesamērojami grūtāks.

Kodolenerģijas fizikālie pamati. Kodolu saites enerģija attiecībā uz vienu nuklonu ir atkarīga no kodola masas. Brīva nuklona (kodoldaļiņas) masa ir nedaudz lielāka par nuklona masu tad, ja tas ir saistīts ar kodolspēkiem, resp., atrodas kodolā. Veidojoties atomiem un ķīmiskiem elementiem, masa, saskaņā ar Einšteina ekvivalences principu $E = mc^2$, pārvēršas par saites enerģiju. Vidēji smagu kodolu, piemēram dzelzs Fe , niķeļa Ni , kriptonā Kr , masa attiecībā uz nuklonu skaitu tajos ir vismazākā, kas izskaidro to, ka šie elementi ir ļoti stabili. Kodolu saites enerģija ΔE attiecībā uz nuklonu skaitu A kodolā ir atšķirīga dažādos kodolos (sk. 1. att.).

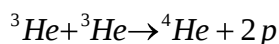
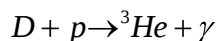
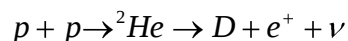


1. att. Kodolu saites enerģija attiecībā uz vienu nuklonu atkarībā no kodola nuklonu skaita.

Var secināt, ka smago kodolu sadalīšana vieglākos fragmentos un vieglo kodolu sakausēšana smagākos kodolos atbrīvo enerģiju. Pirmā ir tā saucamā kodolskaldīšanas enerģiju, ko iegūst parastajās atomelektrostacijās, otrā - kodolsintēzes enerģija, ko iegūst nākotnes reaktoros.

Kodolsintēze uz Saules. Kodolsintēzes procesa fizikālie pamati tika noskaidroti pagājušā gadsimta divdesmitajos gados, pētot Saules un zvaigžņu izstaroto enerģiju. Ņemot vērā, ka kopš Zemes rašanās pirms 4,5 miljardiem gadu, Saule nav zaudējusi savu starojuma spēku. J.-B. Perrins un A. S. Edingtons 1919. gadā izteica domu, ka Saules starojums rodas kodolenerģijas atbrīvošanas ceļā, ūdeņradim pārvēršoties hēlijā. Šo hipotēzi 1923. gadā atbalstīja ievērojamais atomfiziķis E. Rezerfords. 1929. gadā tam sekoja R. Atkinsons un F. G. Houstermana postulējums, ka zvaigžņu enerģijas avots ir viegļu elementu sakušana kodolsintēzes reakciju rezultātā.

Uz Saules četri ūdeņraža atomi (katra svārs ir 1,008145 a.m.v.) sakūst vienā hēlija atomā, kura svārs ir 4,00387 a.m.v. Starpība $\Delta m = 0,02871 \text{ a.m.v} = 4,768 \cdot 10^{-26} \text{ g}$ saskaņā ar likumu $\Delta E = \Delta mc^2 = 26,72 \text{ MeV}$ pārvēršas enerģijā. Uz Saules vienā sekundē apmēram 600 miljonu tonnu ūdeņraža sakūst 596 miljonus tonnu hēlija. Masu starpība 4,3 miljonu tonnu sekundē pārvēršas enerģijā, kuras blīvums, sasniedzot Zemi, ir $1,37 \text{ kW/m}^2$ (Saules konstante). Šī ūdeņraža kodolu sakušana notiek trijos posmos:

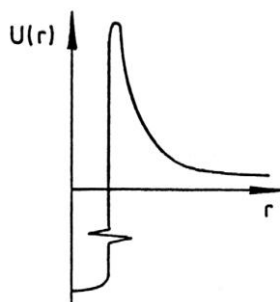


Papildus atbrīvotai enerģijai rodas pozitrons e^+ , neitrīno ν un gamma kvants γ . Īstenībā uz Saules notiekošie procesi ir sarežģītāki. Tie ir tā saucamie CNO reakciju cikli, kurus 1938. gadā atklāja H. Bēhe un K.F. fon Veiczekers.

Kodolsintēze uz Zemes. Uz Saules notiekošās reakcijas nevar īstenot uz Zemes enerģijas iegūšanai kodolsintēzes ceļā. Galvenokārt tādēļ, ka šo reakciju šķēsgriezumi (varbūtības) ir mazi, Zemes gravitācijas lauks ir par vāju, lai tas saturētu kopā noteiktā tilpumā sintēzes reaģentus. Jāmeklē citas reakcijas un citi ceļi.

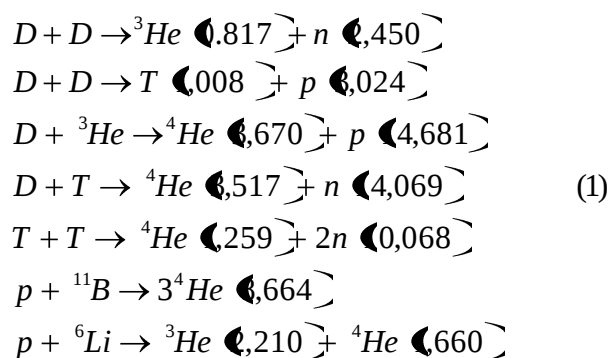
No apmēram 80 teorētiski iespējamām sintēzes reakcijām tikai dažas ir piemērotas Zemes apstākļiem. Pozitīvi lādēti kodoli ar lādiņiem $Z_1 \cdot e$ un $Z_2 \cdot e$ atgrūžas saskaņā ar

Kulona likumu. Potenciālā enerģija $U = Z_1 Z_2 e^2 / (4\pi\epsilon_0 r)$ (Z_1 un Z_2 ir kodolu lādiņu skaitļi, e ir elementārais lādiņš, ϵ_0 ir vakuuma dielektriskā konstante, r ir attālums starp kodoliem) ir apgriezti proporcionāla attālumam starp kodoliem. Šī likumsakarība darbojas tikai līdz tā saucamajam kodola rādiusam r_A . Attālumos, kas mazāki par r_A , sāk dominēt kodolspēki, kas pievelk kodolus un tādējādi rada apstākļus kodolsintēzes reakcijas norisei. (sk. 2. att.).

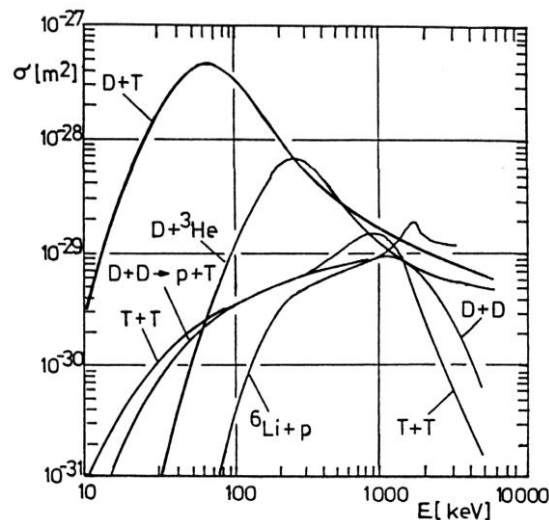


2. att. Kodolu mijiedarbības potenciāls atkarībā no attāluma starp tiem. Pie maziem r Kulona potenciāla vietā darbojas kodolspēku potenciāls, kura rezultātā elektriskie atgrūšanas spēki tiek pārvarēti un kodoli pievelkas.

Lai līdz šiem mazajiem attālumiem nokļūtu, jāpārvar tā saucamā Kulona barjera $(Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2) / (4\pi\epsilon_0 r_A)$, kas deiterija D un tritija T sakušanas gadījumā $r_A \approx 3,7 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ sasniedz $0,4 \text{ MeV}$. Šo barjeras pārvarēšanu kvantu mehānikā apraksta tā saucamā tunelēšanas varbūtība (G. Gamovs, 1928. gads): $W_T \sim \exp \left[-\pi Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2 / (\epsilon_0 \cdot h \cdot v) \right]$ (v ir kodolu relatīvais ātrums, h ir Planka konstante). No šīs izteiksmes seko, ka kodolsintēzes process reāli iespējams tikai vieglu un ātru kodolu gadījumā, kad tunelēšanas varbūtība ir pietiekami liela. Zemes apstākļos varētu tikt izmantotas šādas reakcijas:

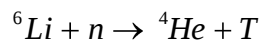
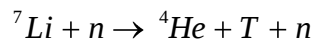


Iekavās norādīti sintēzes rezultātā atbrīvotās kinētiskās enerģijas lielumi MeV vienībās ($1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$). Šo reakciju reakciju šķērssgriezumi (varbūtības) ir ļoti dažādi (sk. 3. att.).



3. att. Dažādu sintēzes reakciju šķērsgrīzumi.

Var secināt, ka visizdevīgākā ir sintēzes reakcija starp deiteriju un tritiju, jo tās šķērsgrīzums ir vislielākais pie mazām sadursmju enerģijām (ātrumiem). Deiterijs ir smagais ūdeņraža izotops. Dabīgajā ūdeņradī tā daļa ir 0,015 molu %. Uz Zemes deiterija krājumi praktiski ir neizsmeļami. Smagais tritija izotops dabā praktiski nav satopams. Tas ir radioaktīvs elements ar pussabrukšanas laiku 12,346 gadi. Par laimi, tritiju var viegli iegūt bombardējot litiju ar neitroniem:

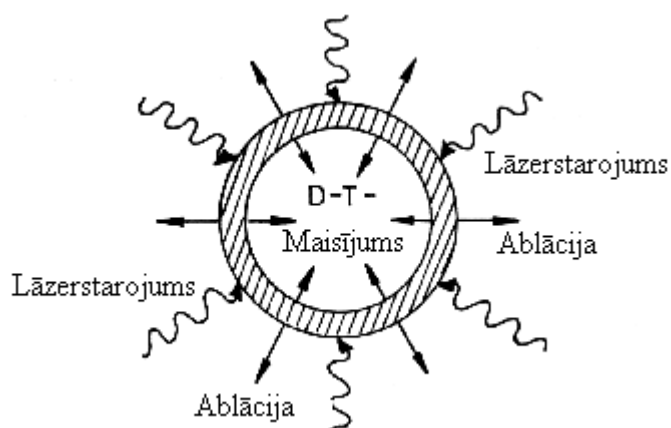


Litija krājumi uz Zemes ir ļoti lieli un tie ir ģeogrāfiski vienmērīgi sadalīti. Kodolsintēzes reaktora sienu var pārklāt ar litiju saturošu savienojumu un šādā veidā iegūt reakcijai vajadzīgo tritiju pašā reaktorā.

Lai Kulona barjera tiktu pārvarēta un sintēzes reakcija varētu sākties, deiterijam ar tritiju jāsaduras ar milzīgiem ātrumiem. To var panākt divos veidos: pirmais ir tā saucamā inerciālā sintēze, otrais - sintēze plazmā, ko satur magnētiskais lauks.

Inerciālā sintēze. Inerciālās sintēzes gadījumā deiterija un tritija (*D-T*) maisījumu apstaro ar ļoti spēcīgiem lāzera stariem, lai sasniegtu vajadzīgo augsto temperatūru (sadursmju ātrumu). Šādi radīto karsto plazmu inerces spēki satur kopā tikai īsu brīdi. Lai šajā laikā sprīdī sāktos sintēzes reakcija, plazmas blīvumam jābūt ļoti lielam. Tai jābūt par 11 kārtām blīvākai nekā magnētiskā laukā saturētai plazmai, jo tās saturēšanas laiks ir par 11 kārtām mazāks. Vajadzīgo lielo blīvumu var radīt, saspiežot mazas lodītes, kas satur *D-T* degvielu, tās sfēriski apstarojot ar lāzera stariem. Apstarošanas rezultātā plazma uz lodītes virsmas izgaro. Ablācijas spiediens ir tik liels, ka lodītes iekšienē notiek sprādziens (*sk. 4. att.*), un sākas sintēzes reakcija. Atbrīvotā enerģija ātro neitronu veidā triecas pret reaktora sienu, kas aptver lodīti. Šis enerģijas iegūšanas veids atgādina ūdeņraža bumbas sprādzienu, kurā lāzera staru vietā lieto miniatūru atombumbu, lai saspiestu degvielu un izraisītu sintēzes reakciju. Šī iemesla dēļ daudzi darbi inerciālās sintēzes laukā ir slepeni, jo tie ir tieši saistīti ar jaunu kodolieroču attīstīšanu. Raksta autors kādas inerciālai sintēzei veltītās konferences laikā Amerikas Savienotajās Valstīs bija liecinieks faktam, kad amerikāņi atteicās aizdot vācu

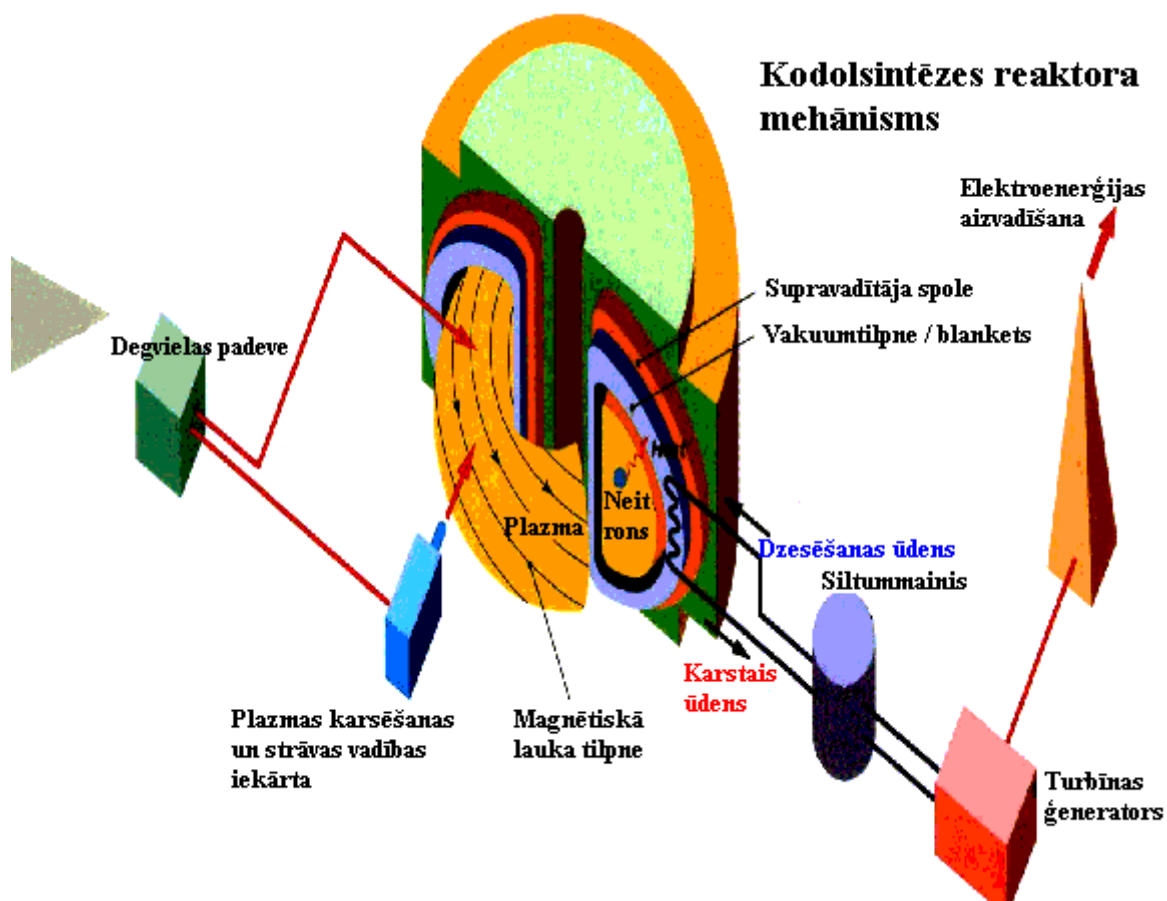
zinātniekiem savu datora programmu, ar kuru tie varētu pārbaudīt savus sintēzes rēķinus, aizbildinoties ar to, ka ar šo programmu var veikt arī dažādus militārus aprēķinus.



4. att. Ar D-T maisījumu pildītas lodītes šķēsgriezums. Lodīte tiek apstarota ar spēcīgiem lāzera stariem.

Sintēze magnētiskā laukā saturētā plazmā. Šeit situācija ir pavisam citāda. Pagājušā gadsimta piecdesmitajos gados sākās mēģinājumi ar magnētiska lauka palīdzību saturēt noteiktā tilpumā ūdeņraža izotopus pie augstām temperatūrām tā, lai sāktos sintēzes process. Pie šādām temperatūrām izotopi ir pilnīgi jonizēti. Runa ir par plazmu, kas kopumā ir neitrāla un kurā lādētas daļiņas, joni un elektroni, pakļaujas Lorenca spēkiem, rotē ap noslēgtām magnetiskā lauka līnijām. Šādu plazmu var aprakstīt, apvienojot elektrodinamikas un hidrodinamikas likumus. Radās jauna fizikas nozare: magnetohidrodinamika. Karstās plazmas saturēšanas laiks ir par 11 kārtām lielāks nekā inerciālas sintēzes gadījumā, tāpēc plazmas blīvums var būt par 11 kārtām mazāks. Nekāds saspiešanas (sprādziena) mehānisms nav vajadzīgs.

Sintēzes reaktora darbību var stādīt priekšā sekojoši. Vispirms plazma jāuzkarsē, piemēram, ar augstfrekvences radio viļņu palīdzību, līdz aizdedzināšanas temperatūrai. (Starp citu, autora maizes darbs saistīts ar jaudīgu viļņu ģenerātoru (žirotronu) attīstīšanu). Šī plazma pietiekami ilgu laiku jāsaturs kopā, lai reakcija tiešām sāktos. Reaktors (parasti tas ir tā saucamais tokamaks) sastāv no vairākām toroidālām tilpnēm. Iekšējā tilpnē deg plazma. Helija kodoli (alfa daļiņas), kas rodas reakcijā (1), sadursmju rezultātā atdod savu 3,517 MeV lielo kinētisko enerģiju deiterija un tritija kodoliem, padarot tos vēl ātrākus. Kad alfa daļiņu kinētiskā enerģija kļūst nulle, tās pārvēršas par "pelniem" un tiek izvadītas ārpus reaktora. Enerģētiskajiem neitroniem, kas rodas reakcijā (1), ir divi uzdevumi. Daļa neitronu reaģē ar reaktora sienā (to sauc par blanketu) esošo litiju un ražo tritiju. Lielākā neitronu daļa savu 14.069 MeV lielo kinētisko atdod blanketam, to karsējot. Siltuma apmaiņas blokā šis siltums tiek pārvērsts ūdens tvaikos, kas, savukārt, darbina turbīnas (sk 5. att).



5. att. Kodolsintēzes reaktora principiālā shēma

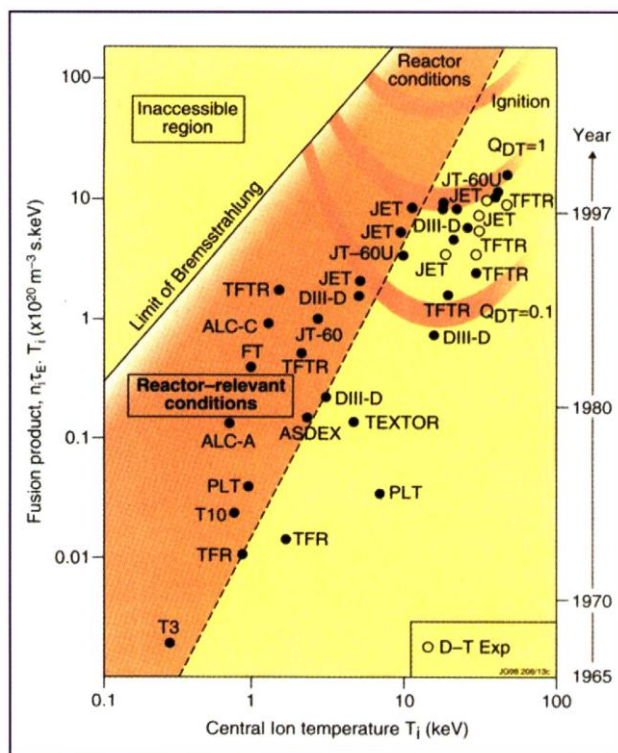
Reaktora drošība. Sakarā uz sintēzes reaktora drošības jautājumu jārunā par divām problēmām: 1) iespējamā tritija noplūde; 2) reaktora sienas materiāls kļūs radioaktīvs neitronu bombardēšanas rezultātā.

Tritija sabrukšanas rezultātā $\text{t} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}$ rodas ${}^3\text{He}$ kodoli un antineitrīno $\bar{\nu}$. Tie nerada problēmu. ${}^3\text{He}$ nav radioaktīvs, $\bar{\nu}$ mijiedarbība ar apkārtējo vidi ir niecīga. Elektronu vidējā enerģija ir visai maza $\sim 5,7 \text{ keV}$, to vidējais brīvais ceļš gaisā ir 1 mm , ūdenī un audos $6 \mu\text{m}$, ko var salīdzināt ar nedzīvās ādas slāņa biezumu $70 \mu\text{m}$. Cilvēka organismā tritija bioloģiskais pusizvadīšanas laiks ir apmēram 10 dienas. Aprēķini rāda, ka tritija noplūde kodolsintēzes reaktorā, kas ražos 1 GW elektrisko jaudu, gadā nepārsniegs 2 g . Tas palielinās radioaktivitātes devu uz cilvēku par $10 \mu\text{Sv}$ (salīdzināt ar pieļaujamo dozu $300 \mu\text{Sv}$ gadā). Reaktors tiek plānots tā, lai avārijas gadījumā kopējais noplūdušā tritija daudzums nepārsniegtu 25 g , pie kam noplūde drīkst notikt tikai HTO molekulu veidā.

Reaktora sienas materiāla aktivācija noved pie radioaktīvo atkritumu rašanās. Atšķirībā no kodolšķelšanas reaktoriem, kuros radioaktīvi atkritumi ar garu pussabrukšanas laiku tiek producēti lielos vairumos, kodolsintēzes reaktoros radušies atkritumi ir samērā nekaitīgi. Reaktora sienas materiālu var izvēlēties tādu (piemēram, vanādiju), ka tajā inducētā radioaktivitāte ir ļoti vāja.

Kodolsintēzes pētījumu progress. Ir trīs svarīgi lielumi, kas raksturo plazmu kodolsintēzes reaktorā. Tie ir: 1) plazmas temperatūra T , (mūsdienu reaktoros tā sasniedz 200 miljonus grādu Celsija, tātad ir 10 reizes augstāka par temperatūru Saules centrā); 2) plazmas saturēšanas laiks τ , kas var sasniegt vairākas sekundes; 3) plazmas blīvums n , līdz $2 - 3 \cdot 10^{14} \text{ daļ./cm}^3$ (dažas tūkstošdaļas grama kubiskajā metrā). Jo lielāki šie lielumi, jo

labvēlīgāki apstākļi sintēzes reakcijas norisei. Pētījumu progresu mēdz raksturot ar tā saucamo sintēzes reizinājumu $n \cdot \tau \cdot T$ (sk. 6. att.).



6. att. Sintēzes reizinājums atkarībā no plazmas temperatūras. Attēlā uzrādīti pasaules svarīgāko reaktoru saīsinājumi. Piemēram, JET apzīmē tokamaku Anglijā, kura pilnais nosaukums ir Joint European Torus. Augšējā labejā stūrī vārds "ignition" nozīmē aizdedzināšanu, bet "reactor conditions" to apgabalu, kurā reaktors var darboties pats par sevi, t.i., stāvoklī, kad plazmas sākotnējās karsēšanas avoti ir atslēgti un reaktora saražotā enerģija pārsniedz tam pievadīto enerģiju.

Redzams, ka pēdējo 30-40 gadu laikā sasniegts milzīgs progress: esam pienākuši tuvu klāt tam apgabalam, kurā reakcijas pašnorises kritērijs ir izpildīts.

ITER. Pašreiz kodolsintēzes pētnieki gatavojas svarīgam notikumam. Tuvākā gada laikā tiks izlemts, kur tiks būvēts vislielākais reaktors pasaulē - Starptautiskais kodoltermiskais eksperimentālais reaktors (ITER) (sk. 7. att.). Šī reaktora jauda sasniegs 1,5 GW, plazmas degšanas laiks tajā būs stundas ceturksnis.

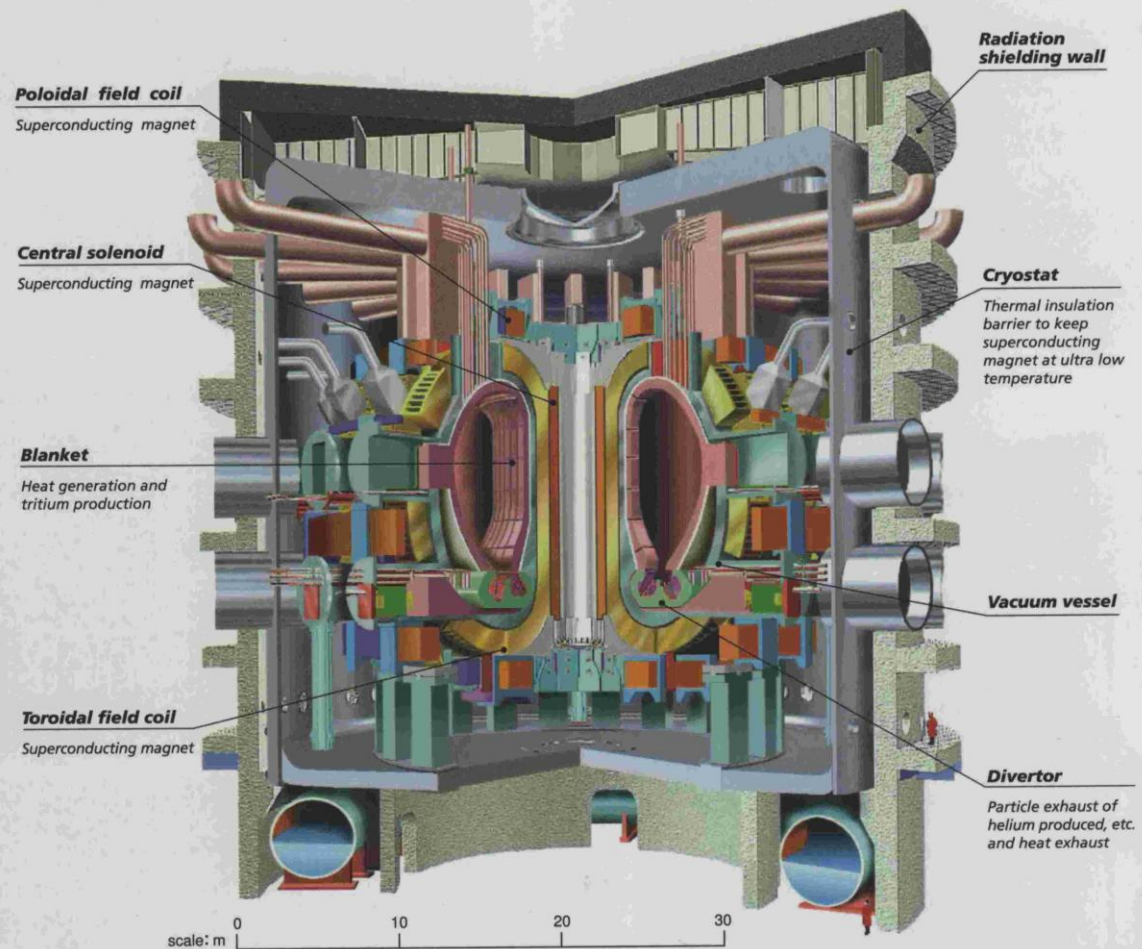
International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

Utilization of fusion energy is one of the most attractive options for a future long-term energy source which responds to a common demand of mankind.

The International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) project is an international collaboration by four parties-Japan,USA,European Union (EU) and Russia Federation (RF)-pooling their resources and expertise toward the practical realization of fusion energy.

Fusion research is now proceeding towards the next step, the demonstration of reactor engineering.

Conceptual Drawing of ITER



Target of ITER

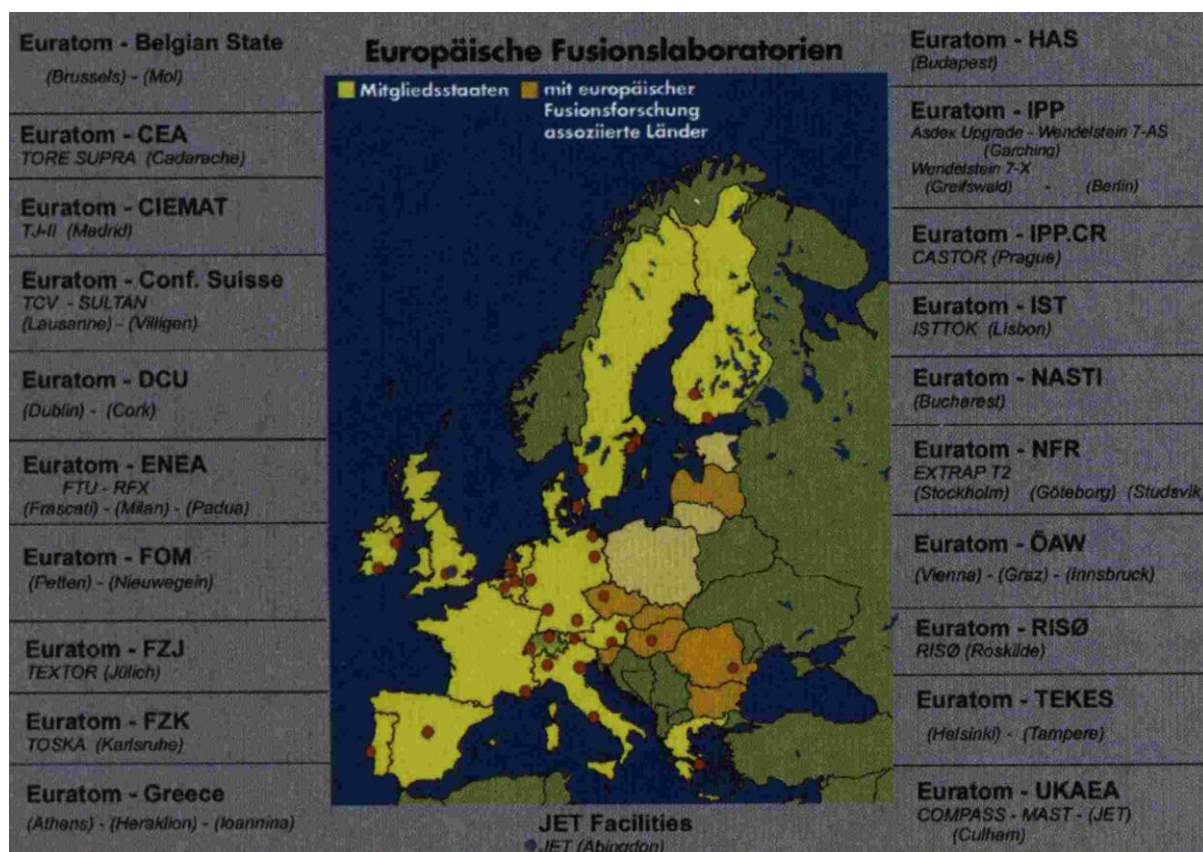
Controlled ignited plasma and extended plasma burn
Demonstration of engineering technologies required for utilization of fusion energy

Main Parameters

Fusion Output 1.5GW
Burn Time 1000 s.
Plasma Current 21MA
Toroidal field 5.7 T

ITER Project

Kodolsintēzes pētījumu organizācija. Kodolsintēzes pētījumi notiek centralizēti un ir labi organizēti. Piemēram, Eiropā šajos pētījumos iesaistīti 2000 fiziķu, ķīmiķu un inženieru. Gada budžets ir 450 miljonu euro (270 miljonu latu). Pētījumi tiek veikti 20 Eiropas valstīs. Pētnieki apvienojušies tā saucamajās asociācijās (sk. 8. att.). Latvijas asociācija EURATOM-University of Latvia tika nodibināta 2002. gada janvārī. Latvijas zinātnieki var lepoties ar to, ka tie aktīvi piedalās darbā, kura cildenais mērķis ir nodrošināt cilvēci ar neizsīkstošu enerģijas avotu.



8. att. Kodolsintēzes pētījumu ģeogrāfija Eiropā. Ar sarkaniem punktiņiem atzīmētas laboratorijas-asociācijas. Karte sastādīta pagājušā gadsimta beigās, kad Latvijai vēl nebija savas asociācijas.

Galavārds. Tiem, kam šajā rakstā skartā tematika izraisījusi lielāku interesi, varu ieteikt izlasīt divus rakstus, kurus esmu publicējis Latvijas zinātniskajos žurnālos:

1. O. Dumbrājs, "Nuclear Fusion", RAU Scientific Reports, Computer Modeling & New Technologies, 1998, volume 2, pp. 50-56.
2. O. Dumbrājs, "Fusion Energy and its Research in Latvia", Latvian Journal of Physics and Technical Sciences 2002, N 1, pp. 3-16.

Internetā atrodamas daudzas publikācijas veltītas kodolsintēzes problēmām. Piemēram,

<http://www.iter.org> <http://www.fusion-eur.org> <http://www.efda.org>.

Gatavojot rakstu, izmantoju sekojošus avotus:

1. U. Schumacher, "Fusions-Forschung-Eine-Einführung". Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1993.
2. "Die Energie der Sterne", European Fusion Development Agreement, 2001.