

Laserska termonuklearna fuzija - novi izvor energije

Paar, Vladimir

Source / Izvornik: **Matematičko fizički list, 1977, 113, 58 - 60**

Journal article, Published version

Rad u časopisu, Objavljeni verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:867934>

Rights / Prava: [In copyright](#) / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-08**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Laserska termonuklearna fuzija — novi izvor energije¹⁾

dr VLADIMIR PAAR, Zagreb

Početkom ožujka 1977. godine u sredstvima javnog informiranja širom svijeta pojavila se vijest o senzacionalnom uspjehu na putu praktičnog ovladavanja energijom termonuklearne fuzije, neiscrpnog izvora energije s obiljem goriva. O čemu je riječ? To je samo jedna od etapa intenzivnog istraživačkog rada posljednjih godina na tom problemu primjene fizike.

U atomskoj jezgri njeni nukleoni, tj. protoni i neutroni iz kojih se sastoje, zaraobljeni su dje-lovanjem snažnih privlačnih nuklearnih sila među njima; kao da su pali duboko u jednu energetsku jamu iz koje više ne mogu iskočiti. Zato im je energija znatno manja od energije slobodnih protona i neutrona, koji su izvan jezgre. Prema formuli $E = mc^2$ to znači da svaki nukleon u jezgri ima manju masu nego kad je slobodan: ukupna masa atomske jezgre manja je od zbroja mase koju bi imali njeni protoni i neutroni da su slobodni i miruju. Na primjer, masa jezgre helija-4 (2 protona i 2 neutrona) manja je od zbroja mase dvaju slobodnih protona i neutrona. I eto izvora energije: spajanjem lakih jezgara, *fuzijom*, nukleoni skaču dublje u energetsku jamu, time smanjuju svoju masu, pretvorivši je u energiju koja se oslobada. To smanjenje mase osobito je izraženo idući od vodika-1 (1 proton i 0 neutrona) do helija-4 (2 protona i 2 neutrona), a u manjoj mjeri nastavlja se i dalje, sve do željeza-56 (26 protona i 30 neutrona).

Zašto u prirodi ne dode do masovnog spontanog spajanja lakih jezgara? Njihovu spajaju snažno se opire jedna teško premostiva barijera — odbojna električna sila među jezgrama. Naime, da bi se dvije jezgre spojile, moraju prići jedna drugoj na domet snažnih nuklearnih sila koji je izvanredno malen: tek oko tisućinke milijarditinke milimetra.²⁾ Da bi se toliko približile, jezgre moraju svladati odbojne električne sile kojima se protoni jedne jezgre odbijaju od protona druge; iako stotinjak puta slabije od nuklearnih sila, u njihovoj odsutnosti električne sile ipak su vrlo djelotvorne. One su taj kritičan činilac koji prigušuje spajanje lakih jezgri.

Kako postići masovno spajanje atomske jezgri? To se može ostvariti zagrijavanjem materijala na ogromnu temperaturu od oko milijun stupnjeva. Što je temperatura materijala veća, veća je i energija nasumičnih gibanja njegovih atomske djeliča. Kod temperatura koje su ostvarene u zemaljskim uvjetima radi se o nasumičnom gibanju atoma i molekula. Međutim, prilikom zagrijavanja na ogromne temperature atomi dobiju tolike energije gibanja da im u sudarima stradaju elektronski omotači. Materija se tada nalazi u stanju ogoljelih jezgri i izdvojenih rojeva elektrona. Takvo stanje materije naziva se termonuklearna plazma. Na temperaturi od oko milijun stupnjeva laki jezgri u plazmi imaju dovoljnu kinetičku energiju da pri sudaru mogu svladati odbojne električne sile, približiti se na domet nuklearnih sila od nekoliko tisućinki milijarditinke milimetra i — spojiti se. Takvo spajanje lakih jezgri pri ogromnim temperaturama naziva se termonuklearna fuzija.

Kako praktički postići ogromnu temperaturu od milijun stupnjeva? Na Zemlji je dosad to ostvareno samo na jedan način: eksplozijom atomske bombe. Eksplozijom atomske bombe, koja služi kao detonator, ostvaruje se dovoljno visoka temperatura da u hidrogenskoj (vodikovoj) bombi dode do spajanja jezgara vodika-2 (1 proton i 1 neutron) pri čemu nastaju jezgre helija-4 (2 protona i 2 neutrona) uz oslobadanje ogromne energije³⁾. Pri tom se odvijaju četiri medusobno povezana procesa, u kojima kao međuprodukti nastaju helij-3 (2 protona i 1 neutron) i vodik-3 (1 proton i 2 neutrona). Najveća energija oslobada se u četvrtom procesu: spajanjem jezgara vodika-2 i vodika-3 nastaje helij-4 i neutron koji dobiju ogromnu kinetičku energiju od 17,6 MeV.

Kontrolirana termonuklearna fuzija vodika-2 otvara mogućnost praktički neiscrpnog izvora energije na Zemlji. Pri izgradnji termonuklearnog reaktora nameće se međutim dva teška problema: kontrolirano zagrijavanje plazme i njeno zaraobljavanje u malom dijelu prostora. Termo-nuklearnu plazmu, očito, ne možemo zadržati ni u kakvim materijalnim posudama. Toliko je vruća da svaki predmet trenutno ispari čim ga plazma dotakne, a plazma se pri tom hlađi. Nijedan materijal na može izdržati temperaturu od milijun stupnjeva. Stoga pri konstrukciji termonuklearnog reaktora treba pronaći neki drugi način kako zarabiti plazmu u jednom dijelu prostora unutar termonuklearnog reaktora i spriječiti je da se ne rasprši prije no što se veći dio jezgri u

¹⁾ Podrobnije izlaganje ovih pojava čitaoci će naći u knjizi: »Što se zbiva u atomskoj jezgri — od kvarkova do svemirske crne rupa, od nuklearne energije do nuklearnog lasera«, Vladimir Paar i Nedeljko Dragić (ilustracije), Školska knjiga, Zagreb, 1978.

²⁾ Prisjetimo se, promjer atoma je oko 100 000 puta veći.

³⁾ Nuklearni procesi pri eksploziji hidrogenske bombe bitno se razlikuju od nuklearnih procesa u unutrašnjosti zvijezda. U zvijezdama se u lancu nuklearnog procesa četiri protona spajaju u jezgru helija-4. Pri tom se, dakle, dva neutrona moraju pretvoriti u protone. To pretvaranje protona u neutrone, koje se odvija beta raspadom, pod utjecajem tzv. »slabeg nuklearne sile«, izvanredno je spor. To je taj delikatni regulator koji uspješno obuzdava i usporuje termo-nuklearne procese u zvijezdama i sprečava opću termonuklearnu eksploziju Svetog. Uzimanjem vodika-2 kao goriva u hidrogenskoj bombi, neutroni su već prisutni i taj usporavatelj termonuklearnih procesa spajanja jezgri je zaobiden.

gorivu ne spoji. Današnja vrlo intenzivna istraživanja tog problema u osnovi idu u dva pravca: zarobljavanje termonuklearne plazme u *magnetskoj boci* ili pomoću *laserskog šoka*.

Magnetska boca sastoji se od određenog rasporeda izvanredno snažnih magnetskih sila, koje djeluju na gole jezgre i jata elektrona tako, da ih prisiljavaju na kružno ili spiralno gibanje. Tako se onemogućuje bježanje plazme iz jednog određenog dijela prostora. Kažemo da je plazma zatvorena u magnetsku bocu. Međutim, u praktičkoj izvedbi magnetske boce nailazimo na niz još neriješenih problema.

Laserski šok predstavlja način ostvarivanja termonuklearne fuzije korištenjem izvanredno snažnih pulzirajućih snopova laserske svjetlosti. Termonuklearno gorivo je u obliku srušene loptice, promjera od nekoliko desetaka milimetara. Iznenada je zapljenjeno izvanredno snažni snopovi laserske svjetlosti. Površinski sloj loptice upije ogromnu količinu energije i nastaje strahoviti eksplozivni udar koji ogromnom brzinom potisne unutarnji dio loptice prema sredini. U trenu tamo se zgusne materija unutarnjeg dijela loptice zagrijavši se pri tom na temperaturu od oko milijun stupnjeva. Fizičari nastoje ostvariti takve uvjete da i prije no što se to vruće sabijeno gorivo stigne opet razletiti, u njemu dođe do masovnog spajanja jezgara. Postepenim ubacivanjem takvih loptica u unutrašnjost termonuklearnog reaktora i njegovim bombardiranjem snopovima laserske svjetlosti postiglo bi se stalno i kontrolirano oslobođenje energije. Svaka loptica je poput minijature hidrogenske bombe, a laserski snop svjetlosti njen detonator. Unutrašnjost termo-nuklearnog reaktora ispunjena je tekućim litijem, na koji bi se prenosila energija oslobođena fuzijom. Kružnim strujanjem litija energija bi se odvodila iz termonuklearnog reaktora.

Zašto je laserska svjetlost pogodna za zagrijavanje i sabijanje loptice? Zato jer je to danas najbolji raspoloživi način da se ogromna energija vrlo efektivno koncentriira u izvanredno kratkom vremenu (oko milijarditinke sekunde) u izvanredno malom volumenu (promjera oko stotinke milimetra). Stvaranje monokromatskih koherenčnih valova svjetlosti u laseru zasniva se na jednoj kvantnomehaničkoj zakonitosti, koju bi mogli nazvati kvantna proničnost: svjetlosne čestice (fotoni), srušne grudice energije iz kojih se sastoji svjetlost, pokazuju snažnu »sklonost« da ih što više dođe u isto stanje, tj. da sve imaju jednak kvantnomehanički val. Takva svjetlost ima strogo određenu valnu dužinu (kažemo da je monokromatska) i svjetlosni valovi se točno poklapaju, bregovi s bregovima i dolovi s dolovima (kažemo da je ta svjetlost koherentna). U laserima su ostvareni takvi uvjeti među određenim atomima ili molekulama da svjetlosne čestice mogu zadovoljiti svoju »sklonost« da ih se što više ugura u isto kvantnomehaničko stanje. Stimuliranim skokovima mnogih atoma ili molekula s neke određene energetske stepenice⁴⁾ na neku određenu nižu stepenicu nastaje laserska lavina svjetlosnih čestica; izvanredno kratkotrajan koherenti monokromatski puls ogromne snage koji se lako može fokusirati.

Koliko su fizičari odmakli u konstrukciji takvog termonuklearnog reaktora? Laserska termonuklearna fuzija ostvarena je no problem je u povećanju efikasnosti tog procesa. Da bi termo-nuklearni reaktor radio komercijalno, trebalo bi fuzijom dobiti bar nekoliko desetaka puta više energije no što se utroši na pogon lasera. Postotak jezgara koji se spoje pri termonuklearnoj fuziji to je veći što je veća temperatura i što je veća gustoća termonuklearnog goriva. Što je gustoća veća, proces je efikasniji: manje je energije potrebno utrošiti da bi se ostvarila termonuklearna fuzija⁵⁾. Ukoliko se gustoća goriva sabijanjem poveća za oko hiljadu puta potrebna energija pulsa laserske svjetlosti iznosila bi oko desetak kJ. U tom slučaju fuzijom bi se oslobođila oko 1000 puta veća energija no što je utrošena na zagrijavanje i sabijanje loptice. Za rad termonuklearnog reaktora ključna su dva faktora: efikasnost kojom kuglica apsorbira energiju laserskog snopa i radna efikasnost samog lasera. Prvi problem vrlo je složen, a njegovo razumijevanje bitno je za optimalni izbor veličine, oblike i sastava loptice kao i za optimalni izbor frekvencije laserske svjetlosti i trajanja i oblika pulsa. Pri apsorpciji laserske energije odvija se niz različitih fizikalnih procesa, tj. niz različitih mehanizama apsorpcije koji se međusobno isprepliću. Na temelju približnih iako još uvijek izvanredno složenih teorijskih računa zaključeno je da je efikasnost apsorpcije laserske energije obrnuto proporcionalna valnoj dužini laserske svjetlosti. To se i na prvi pogled čini shvatljivim; što je svjetlost kraće valne dužine, dublje prodire u plazmu. Stoga su i najveći napori zadnjih godina usmjereni na izgradnju lasera koji stvaraju svjetlost razmjerno kratke valne dužine.

⁴⁾ Srušni djeliči tvari, npr. atom ili molekula, mogu se nalaziti samo u stanjima s određenim porcjama energije (v. npr. članak J. Hendekovića u MFL). Slikovito govoreći, oni se mogu nalaziti samo na nekoj od stepenica svog energetskog stepeništa, gdje visinom pojedine stepenice predučujemo njenu energiju. Ako se srušni djeliči tvari nisu na dnu svog energetskog stepeništa, kažemo da je u osnovnom stanju. U normalnim uvjetima kojih vladaju na Zemlji atomski objekti se uglavnom nalaze u osnovnom stanju. U slučaju izloženosti nekom vanjskom utjecaju, npr. sudaru s nekim drugim srušnim djeličem materije pri prolazu električne struje, zagrijavanju ili osvjetljavanju, djelič materije može skočiti na neku višu stepenicu, tj. u pobudeno stanje, upivši pri tom upravo toliku porciju energije kolika je potrebna za taj skok. Nakon nekog vremena on će potom skočiti na neku nižu stepenicu i pri tom u obliku srušne svjetlosne čestice (fotona) odaslati energiju jednaku razlici energija tih dviju stepenica. Eto, to je ono što se zbiva prilikom nastajanja svjetlosti. Pri tome je obično riječ o skokovima ogromnog broja atoma ili molekula s viših stepenica na niže; jedan bljesak sastoji se iz milijarda milijardi svjetlosnih čestica.

⁵⁾ Spomenimo da se na jednak način, u laserskim sabijanjem omogućuje i znatno smanjenje kritične mase u atomske bombe, tj. lančana reakcija nastaje i uz manju količinu fusionog materijala.

No tu se fizičari sukobljavaju s drugim faktorom: efikasnošću rada lasera, tj. s postotkom energije utrošene na pogon lasera koji se pretvara u energiju laserskog pulsa. Naime, današnji laseri velike snage koji stvaraju lasersku svjetlost razmjerno kratke valne dužine ($\lambda \leq 1 \mu\text{m}$)⁶⁾ vrlo su niske radne efikasnosti, oko 0,1%. Takyi su npr. neodimijevi laseri ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$). U neodimijevom laseru laserski snop nastaje usaglašenim skokovima između dva kvantnomehanička stanja neodimijevih atoma u tzv. neodimijevom staklu. Najveća snaga pulsa dosad proizvedena dobivena je takvim laserom: oko dvije milijarde kW, a trajanje pulsa oko milijarditinke sekunde.

U mnogim svjetskim laboratorijima intenzivno se radi na izgradnji novih lasera velike snage za svjetlost kraćih valnih dužina.

S druge strane moguće je izgraditi tzv. CO₂ lasere⁷⁾ velike snage koji imaju znatno veću radnu efikasnost, oko 5%, s mogućnošću da se ona poveća i na 20%. No oni imaju i bitnu manu: valna dužina njihove laserske svjetlosti je prilično velika ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$). Zato se misli da takav laser ne bi bio pogodan za zagrijavanje i sabijanje termonuklearne kuglice. Međutim, ožujka 1977. novi veliki CO₂ laser izgrađen u Los Alamos Scientific Laboratory (USA) opovrgao je tu predrasudu. Kuglica je obasjana iz suprotnih smjerova dvama pulsevima od milijarditinke sekunde, snage od 0,5 milijardi kW. Energija tog pulsa od 0,5 kJ dosad je rekordna za CO₂ laser. Goriva kuglica bio je stakleni balon promjera 0,1 mm i debljine stjenke 0,001 mm, a sadržavao je plin vodika-2 (1 proton i 1 neutron) i vodika-3 (1 proton i 2 neutrona) pod pritiskom od 10 atm. U sabijenoj kuglici došlo je do kratkotrajne termonuklearne fuzije uz oslobođanje 10000 neutrona. Ta efikasnost podjednaka je kao u ranijim pokusima pomoći neodimijevih lasera iste snage sa znatno kraćom valnom dužinom ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$). To znači da pokus ne pokazuje predviđenu zavisnost apsorpcije energije laserskog pulsa o valnoj dužini! (Ipak treba istaći da su teorijski fizičari i ranije isticali da povećana elektronska vodljivost i elektromagnetske i relativističke nestabilnosti u plazmi mogu reducirati efekt valne dužine, ali do sada nije proveden kompletan račun.) A sada ključno pitanje: da li će apsorpcija energije CO₂ laserskog pulsa još većih energija takođe pokazivati neočekivanu neovisnost apsorpcije energije o valnoj dužini? U tom slučaju komercijalni termonuklearni reaktor nije više daleko. Treba samo usavršiti i povećati postojeće CO₂ lasere. Previđa se da bi za komercijalni termonuklearni reaktor bila potrebita energija laserskog pulsa od oko 100 kJ.

Ako se ostvari termonuklearni reaktor koji bi bio izvor energije u termonuklearnim elektranama, energetski problem čovječanstva bio bi riješen. Vodika-2 ima u prirodi u izobilju, nalazi se u vodi. Doduše u vrlo malom postotku od samo 0,015 % od običnog vodika-1. Međutim, obzirom na ogromne količine morske vode na Zemlji i obzirom na vrlo efikasno oslobođanje energije prilikom spajanja jezgara pri čemu se blizu 1% mase pretvori u energiju⁸⁾, voda predstavlja praktički neiscrpan izvor energije. Tako na primjer, nuklearnim sagorijevanjem vodika-2 sadržanog u jednoj litri morske vode dobila bi se energija jednaka onoj koju daje desetak litara benzina. A preorientacija na nove izvore energije je nužna. Bez toga, konačna energetska kriza započela bi nestasicom naftne već za dvadeset godina da bi se potom sve više i više zaoštrevala. Ni uranske nuklearne elektrane današnjeg tipa nisu trajnije rješenje; zalihe uranove rude na Zemlji mogле bi biti iscrpljene već za pedeset godina. Zato traženje novih izvora energije predstavlja jedan od glavnih udarnih pravaca suvremene nauke.