

Laserska termonuklearna fuzija — novi izvor energije¹⁾

dr VLADIMIR PAAR, Zagreb

Početak 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 sastoji, zarobljeni su djelovanjem 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 masa 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 masa 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 oslobađa. 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 dođe do masovnog spontanog spajanja lakih jezgara? Njihovu spajanje 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 atomskih 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 atomskih djelića. 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 lake jezgre 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 dođe do spajanja jezgara vodika-2 (1 proton i 1 neutron) pri čemu nastaju jezgre helija-4 (2 protona i 2 neutrona) uz oslobađanje ogromne energije³⁾. Pri tom se odvijaju četiri međusobno povezana procesa, u kojima kao međuprodukti nastaju helij-3 (2 protona i 1 neutron) i vodik-3 (1 proton i 2 neutrona). Najveća energija oslobađa 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 nameću se međutim dva teška problema: kontrolirano zagrijavanje plazme i njeno zarobljavanje u malom dijelu prostora. Termonuklearnu 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 hladi. Nijedan materijal ne može izdržati temperaturu od milijun stupnjeva. Stoga pri konstrukciji termonuklearnog reaktora treba pronaći neki drugi način kako zarobiti 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 svemirskih crnih rupa, od nuklearne energije do nuklearnog lasera«, Vladimir Paar i Nedeljko Dragić (ilustracije), Školska knjiga, Zagreb, 1978.

²⁾ Prisetimo 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 nuklearnih 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. slabest nuklearne sile, izvanredno je sporo. To je taj delikatni regulator koji uspješno obuzdava i usporuje termonuklearne procese u zvijezdama i sprečava opću termonuklearnu eksploziju Svemira. 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 spiralo 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 sićušne loptice, promjera od nekoliko desetinki milimetra. Iznenađa je zapljusnu 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 zgušne materija unutarnjeg dijela loptice zagrijevši 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 njihovim bombardiranjem snopovima laserske svjetlosti postiglo bi se stalno i kontrolirano oslobađanje energije. Svaka loptica je poput minijature hidrogenske bombe, a laserski snop svjetlosti njen detonator. Unutrašnjost termonuklearnog 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 koncentrira u izvanredno kratkom vremenu (oko milijarditinke sekunde) u izvanredno malom volumenu (promjera oko stotinke milimetra). Stvaranje monokromatskih koherentnih valova svjetlosti u laseru zasniva se na jednoj kvantnomehaničkoj zakonitosti, koju bi mogli nazvati kvantna proničnost: svjetlosne čestice (fotoni), sićušne 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 valci 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 koherentni 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 termonuklearni reaktor radio komercijalno, trebalo bi fuzijom dobiti bar nekoliko desetaka puta više energije no što se utroši na pogon lasera. Postotak jezgara koje 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 oslobodila 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 apsorbera energiju laserskog snopa i radna efikasnost samog lasera. Prvi problem vrlo je složen, a njegovo razumijevanje bitno je za optimalni izbor veličine, oblika 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⁾ Sićušni djelići tvari, npr. atom ili molekula, mogu se nalaziti samo u stanjima s određenim porcijama energije (v. npr. članak J. Hendekovića u MFL). Slikovito govoreći, oni se mogu nalaziti samo na nekoj od stepenica svog energetske stepeništa, gdje visinom pojedine stepenice predočujemo njenu energiju. Ako se sićušni djelići tvari nelazi na dnu svog energetske stepeništa, kažemo da je u osnovnom stanju. U normalnim uvjetima koji vladaju na Zemlji atomski objekti se uglavnom nalaze u osnovnom stanju. U slučaju izloženosti nekom vanjskom utjecaju, npr. sudaru s nekim drugim sićušnim djelićem materije pri prolazu električne struje, zagrijavanju ili osvjetljavanju, djelić materije može skočiti na neku višu stepenicu, tj. u pobuđeno 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 sićušne 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, i laserskim sabijanjem omogućuje i znatno smanjenje kritične mase u atomskoj bombi, tj. lančana reakcija nastaje i uz manju količinu fisionog 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%. Takvi 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 stijenke 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 oslobađanje 10000 neutrona. Ta efikasnost podjednaka je kao u ranijim pokusima pomoću 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. Predviđa se da bi za komercijalni termonuklearni reaktor bila potrebna energija laserskog pulsa od oko 100 kJ.

Ako se ostvari termonuklearni reaktor koji bi bio izvor energije u termonuklearnim elektranama, energetska 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 oslobađanje 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 preorijentacija na nove izvore energije je nužna. Bez toga, konačna energetska kriza započela bi nestašicom nafte već za dvadesetak godina da bi se potom sve više i više zaoštravala. Ni uranske nuklearne elektrane današnjeg tipa nisu trajnije rješenje; zalihe uranove rude na Zemlji mogle bi biti iscrpljene već za pedesetak godina. Zato traženje novih izvora energije predstavlja jedan od glavnih udarnih pravaca suvremene nauke.