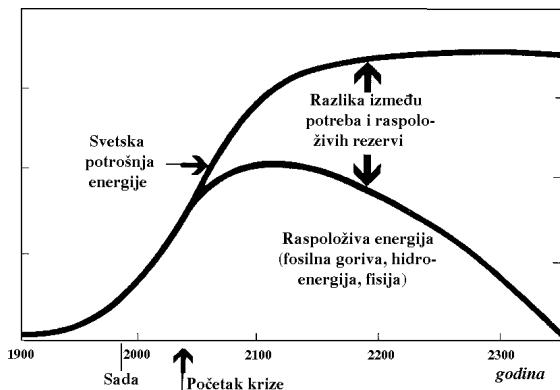


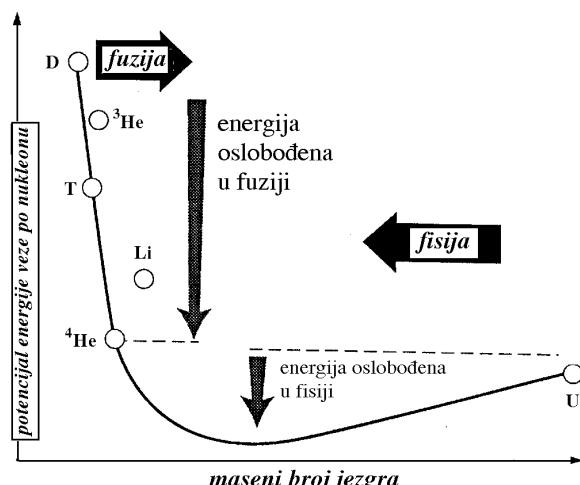
Dr Moma Jovanović (PMF Univerziteta u Nišu):

## LASERSKA FUZIJA - ENERGIJA ZA TREĆI MILENIJUM

Poslednja dva veka predstavljaju doba munjevitog naučnog i tehnološkog razvoja. Osnovni uslov za primenu i korištenje tehničkih dostignuća, jeste adekvatno i neometano snabdevanje energijom. Procene su da će se ukupna svetska potrošnja energije do sredine ovog veka utrostručiti, u odnosu na dosadašnju potrošnju (v. sl. 1). Današnja tehnička civilizacija je zasnovana na korištenju rezervi fosilnih goriva. Ugaj se eksplorativne nekoliko vekova, nafta od početka XVIII veka, a zemni (prirodni) gas nekoliko poslednjih decenija.



*Slika 1: Era fosilnih goriva bliži se kraju. Ako nastavimo da ih trošimo sadašnjim tempom, fosilna goriva će potrajati još stotinak godina. Prvi znaci krize će se osetiti kroz pedesetak godina.*



*Slika 2: Sa krive potencijalne energije veze jezgra po jednom nukleonu vidi se da se pri fuziji lakih elemenata kao i pri fisiji teških elemenata, oslobađaju energiju. Zbog ustrmljenosti krive na početku fuzioni procesi daju mnogo veću energiju po jedinici mase upotrebljenog goriva.*

Procenjuje se da nuklearni reaktori mogu pokriti samo 20-40% energetskih potreba u različitim zemljama. Izgradnja novih nuklearki se, uglavnom, ne planira zbog narasnih bezbednosnih standarda koji iziskuju ogromne troškove oko sigurnosnih sistema. Još veći problem predstavlja odlaganje i uvanje visoko radioaktivnih produkata fisije. Tako dolazimo do kontrolisane termonuklearne fuzije kao jedine nadje za izlaz iz buduće energetske krize.

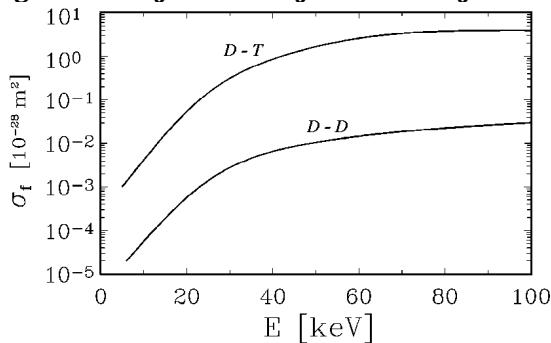
Fuzija je sinteza, spajanje atomskih jezgara da bi se kao rezultat pojavilo tečje jezgro i energija znatno veća od onih koja se oslobađa u aktu fisije. Dobijanje energije putem kontrolisane fuzije ima mnoge prednosti u odnosu na do sada korištenje, gore opisane načine. Pre svega, to je dostupnost goriva u neograničenim količinama. Naime, u projektima fuzije figura deuterijum (D) i tricijum (T), tečni izotopi veoma rasprostranjenog vodonika (H) sa jednim, odnosno dva neutrona u jezgru. Na svakih 6300 običnih molekula morske vode ( $H_2O$ ) dolazi jedan molekul koji sadrži deuterijum (HDO). Pošto u procesu nema sagorevanja, ne javlja se ugljen-dioksid kao produkt reakcije. Nema ni dugočekih radioaktivnih produkata koji će predstavljati problem vekovima, kao kod fisije.

Jedini način da se nuklearna fuzija u D-D i D-T reakciji isplati jeste da se temperatura deuterijuma podigne na nekoliko desetina miliona stepeni, pošto bi tada energija termalnog kretanja deuterona bila dovoljna za savladavanje kulonovske barijere i odvijanje fuzione reakcije. Na temperaturi od nekoliko desetina miliona stepeni, deuterijum će biti u stanju plazme, čime se i objedinjava nagli porast interesovanja za ovo agregatno stanje.

S obzirom da će se u fuzionom reaktoru 80% energije dobijati u vidu kinetičke energije proizvedenih neutrona, unutrašnjost reaktora će biti obložena debelim apsorbujućim slojem, koji je zadat da usporava neutrone i njihovu energiju pretvara u toplotu. Ova toplota će se u konvencionalnim metodama koristiti za zagrevanje vodene pare ili gasa u turbinama za proizvodnju elektriciteta.

Na last, ideja korištenja fenomena fuzije donosi mnogo praktičnih tečajeva koje treba prevazići. Na primer, Coulomb-ova sila između dva nanelektrisana tela je obrnuto proporcionalna kvadratu rastojanja među njima, tako da pri malom rastojanju ova sila dostiže fantastično velike vrednosti. Kulonovsku barijeru je moguće premostiti samo pri velikim energijama, tj. temperaturama. Tako je verovatno da fuzione reakcije bitno određena verovatnošćom "tuneliranja" kroz odbojni kulonovski potencijal. Efikasni preseci za D-D i D-T reakcije prikazani su na slici 3. Uzavava se da su

verovatno}e za D-T reakciju ve}e za dva reda veli~ine od odgovaraju}ih vrednosti za D-D proces, zbog ~ega se deuterijumsko-tricijumska reakcija smatra komercijalno atraktivnijom.



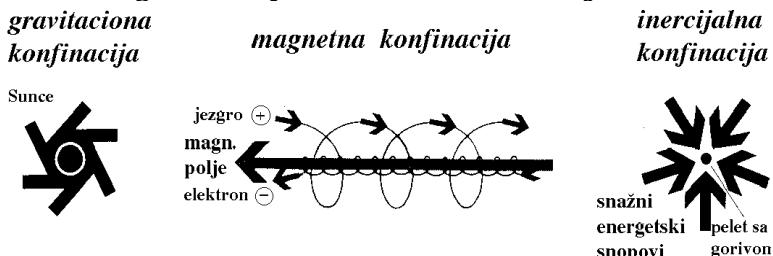
Slika 3: Efikasni preseci za D-T i D-D fuzionu reakciju u funkciji relativne energije ~estica.

Rast temperature donosi mnogo br`e kretanje atoma, koji se sve ~e}e “~e{u” jedni o druge i gube elektrone. Dobijeni joni i elektroni kre}u se ogromnim brzinama i ovakvo stanje materije poznato je kao plazma. Ukoliko je plazma retka, te}ko }e do}i do direktnih sudara me|u njenim ~esticama. Plazma je izuzetno nestabilan sistem u kome elektroni i joni te}e da se brzo udalje jedni od drugih. Prema ~uvanom Lawson-ovom kriterijumu, energetski bilans fuzije (razlika dobijene i ulo`ene energije) bi}e pozitivan ukoliko je proizod koncentracije i vremena odr`anja:

$$n\tau \geq 10^{14} \text{ cm}^{-3}\text{s} = 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s},$$

pri ~emu ova procena va`i na temperaturama plazme od oko  $10^8$  stepeni, {to odgovara srednjoj energiji kretanja ~estica u plazmi od oko 10 keV. Jasno je da postoje najmanje dva mogu}a puta u planiranju fuzionih eksperimenata:

- magnetna konfinacija (zadr`avanje ~estica plazme {to du`e vreme u ograni-enom delu prostora uz pomo} posebnih geometrijskih konfiguracija sna`nog magnetnog polja);
- inercijalna konfinacija (enormno pove}anje gustine goriva uz pomo} sopstvene inercije plazmenih ~estica izazvane visokoenergetskim snopovima laserske svetlosti ili jona te}kih elemenata).



Slika 4: Tri tipa konfinacije (odr`avanja) plazme

Ideja magnetne konfinacije zasnovana je na poznatoj ~injenici da se nanelektrisane ~estice kre}u po spiralnim putanjama oko linija sila magnetnog polja. Najpoznatiji ure|aj ovog tipa je ruski "tokamak"- posebno dizajnirana magnetna konfiguracija toroidalnog oblika. U poslednje vreme najve}e nade se pola`u ITER ("International Thermonuclear Experimental Reactor"), koji treba da bude plod me|unarodne saradnje izme| u SAD, Evropske Unije, Rusije i Japana.

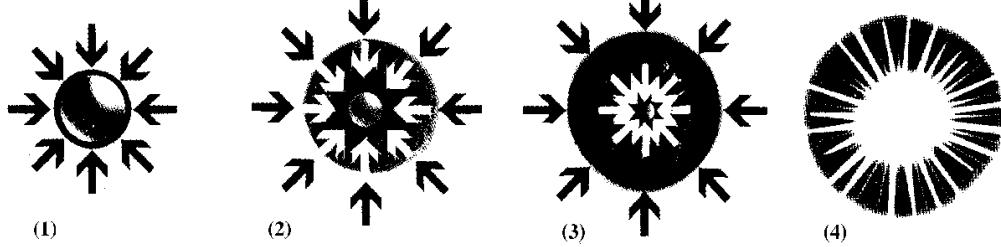
Pobornici ideje kontrolisane fuzije uz inercijalno odr`avanje plazme, popularnije zvane laserska fuzija, o~ekuju da }e koncentracija ogromne laserske snage na povr{ini male kuglice ("peleta") sa fuzionim gorivom dovesti do dovoljnog zgu{njanja plazme u centru mete da to pokrene paljenje fuzione mete. Napori teoreti-ara i eksperimentatora fizike plazme kre}u se u dva pravca:

- pove}anom snagom lasera izazvati probijanje kanala kojim bi se laser pribli`io centru kapsule;
- umanjiti uticaj nelinearnih efekata koji rasejavaju lasersku energiju.

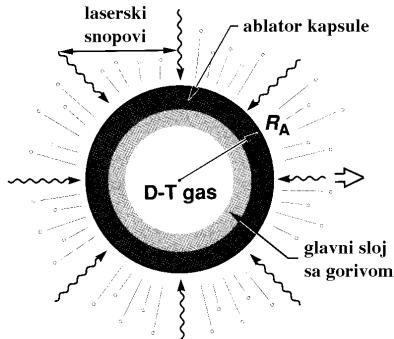
Inercijalna fuzija zasnovana je na jednom od bazi-nih principa fizike - inerciji, svojstvu materije da se odupire promenama na-ina svog kretanja. Si}u{n kapsula sa fuzionim gorivom pre-nika ne ve}eg od par desetih delova milimetra obasjava se istovremeno sa vi{e strana sna`nim energetskim snopovima laserske svetlosti ili te}kih jona. Ovi snopovi greju periferijske delove fuzione mete i istovremeno ih pokre}u ka centru velikom brzinom (implozija). Usled inercije materijal kuglice se sabija ka centru i, tokom tog vremena, nastala plazma je ograni~ena, konfinirana. Istovremeno sa inercijalnom kompresijom prisutna je slobodna difuzija ~estica plazme u svim pravcima, koja je utoliko intenzivnija ukoliko je temperatura vi{a. Kada ova difuzija nadja-a efekte implozije, vreme konfamacije je isteklo i dolazi do razletanja ~estica plazme, ~ime je fuzioni proces okon-an. Fuzioni proces }e se ostvarivati u nekoliko koraka (sl. 5).

- Zagrevanje povr{ine kapsule sa gorivom do temperature od vi{e desetina miliona stepeni;
- [irenje spolja{njenog sloja izaziva imploziju stvaraju}i ogroman pritisak u centru kapsule;
- Pri ovim uslovima u centru otpo-inje fuzija;

- Fuziono sagorevanje se {iri iz centra po celoj zapremini fuzione mete.



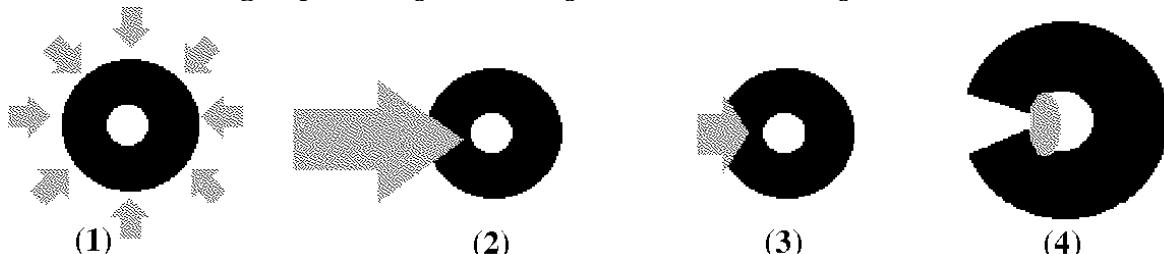
Slika 5: Tipi-ni scenario laserske fuzije.



Slika 6: Kapsula sa fuzionim gorivom je sfernog oblika, punjena gasom niske gustine ( $\leq 1 \text{ mg/cm}^3$ ). Omota~je sastavljen od spoljnog dela - ablatora i unutra{njeg dela od smrznutog ili te~nog D-T goriva.

Po prestanku dejstva lasera implozija mete se nastavlja jo{ izvesno vreme usled inercije, tako da gorivo u centralnom delu dosti~e temperaturu od 50-100 miliona stepeni i gustinu 20 puta ve}u od gustine ~vrstog olova - nekoliko stotina  $\text{g/cm}^3$ . Pomenuta inercija dr~i na okupu fuzionu materiju nekoliko desetih delova nanosekunde, i tokom tog vremena o-ekuje se da u centru tako vru{e i gусте plazme zapo-ne proces fuzije najpre pojedina-nim aktovima sudara me|u jezgrima, a zatim }e do}i do ~eljenog "zapaljenja" mete i njenog fuzionog sagorevanja.

Opisani scenario zvu{i prili~no jednostavno i ostvarljivo. Ipak, u opisanom scenariju najproblemati-niji je prelaz iz tre}e u ~etvrtu fazu, tj. pitanje da li }e lan~ano i masovno otpo~eti fuzione reakcije. Da bi se preduhitrio eventualan negativan ishod, u poslednje vreme se veoma intenzivno razmatra ne{to izmenjena koncepcija gornjeg scenarija, pod nazivom "brzo paljenje" ("fast ignition"). Na isti, prethodno, opisani, na~in bi se vr{ila kompresija mete, a u trenutku kada je gorivo maksimalno zgušnuto upu}uje se u pravcu centra sekundarni laserski impuls mnogo kra}eg trajanja (100-300 ps) od kompresionog impulsa, ali znatno ve}eg intenziteta ( $\approx 10^{20} \text{ W/cm}^2$ ). Njegov je zadatak da se probije, koliko god je to mogu}e, u dubinu komprimovane mete. Tada nastupa impuls jo{ kra}eg trajanja ( $\approx 1 \text{ ps}$ ) koji prolazi kroz formirani kanal, interaguje sa njegovim zavr{etkom i predaje svoju energiju visoko-energetskim elektronima koji }e izvr{iti centralno zapaljenje mete. Uskoro se o-ekuju rezultati prvih eksperimenata sa primenom "brzog paljenja" u laboratorijama u Livermoru i Osaki. Rezultat ovih testova ukaza}e na mogu}e pravce daljih istra`ivanja u oblasti laserske fuzije.

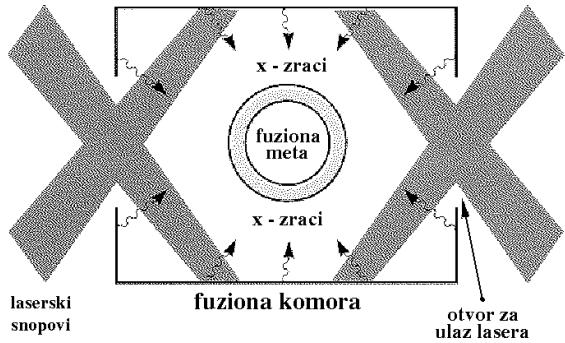


Slika 7: Scenario "brzog paljenja" ("fast ignition"): 1. Standardna kompresija; 2. Laserski impuls za probijanje kanala; 3. Laserski impuls za "paljenje"; 4. Termonuklearno sagorevanje.

U cilju re{avanja simetri~nosti i uniformnosti (homogenosti) kompresije goriva krenulo se u dva divergentna pravca koji, ipak, imaju i zajedni~kih ta~aka:

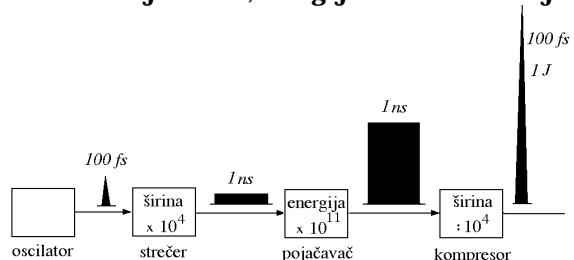
- direktna ("direct-drive");
- indirektna ("indirect-drive") laserska fuzija.

Kod direktne laserske fuzije direktno se deluje na metu elektromagnetskom energijom u ve}im brojem visoko-energetskih laserskih snopova simetri~no fokusiranih na njenu povr{inu. Kod indirektnе laserske fuzije, kapsula sa gorivom sli~na onoj kod direktne fuzije sme{ta se u malu cilindri~nu komoru tankih zidova, oblo`enu sa unutra{njem strane nekim materijalom visokog atomskog broja. U ovom slu~aju laser osvetljava direktno zidove komore koji se intenzivno zagrevaju i emituju x-zrake, koji vr{e kompresiju fuzione kapsule.



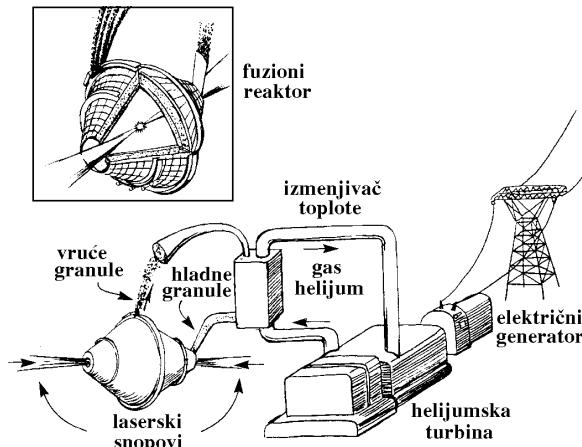
**Slika 8:** Indirektna laserska fuzija ima mnoge prednosti nad direktnom: mnogo bolja uniformnost iluminacije mete (x-zracima), umanjena opasnost od hidrodinamičkih nestabilnosti i mogućnost jednostavne zamene laserskog "drajvera" snopovima ubrzanih tečnih jona.

1987. godine prvi put je predložen koncept "pojava-avanja skraćenog pulsa" (engl.: "CPA = Chirped - Pulse Amplification"), koji omogućava pojava-avanje laserskih intenziteta do fantastičnih  $10^{20}$ - $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> i dalje. CPA-tehnika je vrlo pogodna jer je bila moguća njena implementacija u postojeće velike (Nd: staklo) laserske sisteme: Nova u Livermoru (Kalifornija), CEA-Limeil u Francuskoj, Rutherford - Appleton laboratorijski u Oksfordu i ILE - Osaka u Japanu (GEKKO XII). Novi sistem NIF, u izgradnji u Livermoru je u toku, i Megajoule u Francuskoj biće kompletno zasnovani na CPA-tehnologiji.



**Slika 9:** Osnovi CPA koncepta: Oscilator proizvodi kratak puls koji se srije 1000 do 100000 puta smanjujući I, pri tome, svoj intenzitet: sada je intenzitet dovoljno nizak da se može pojaviti bez bojazni od nelinearne distorzije i oteženja. Posle pojava-avanja i ekstrakcije, snop se ponovo komprimuje do svoje polazne dužine trajanja.

Idejni nacrti za izgled buduće fuzione elektrane su u fazi razrade. Procjenjuje se da će samo jedna fuziona komora moći da proizvodi električnu energiju snage 1 GW i tako snabdeva energijom jedan prosečan grad od 600000 stanovnika.



**Slika 10:** Nacrt buduće fuzione elektrane. Fuziona komora permanentno da prima seriju kuglica (meta), izaziva njihovo fuzione sagorevanje i odvodi dobijenu toplotu u strujni generator. Kaskadni generator od 1 GW bi trošio oko 5 fuzionih kuglica svake sekunde. Fuziona energija oslobođenih neutrona zahvata se debelim slojem granulastog materijala koji pod dejstvom centrifugalne sile klizi zidovima rotirajuće komore. Kroz otvore na obodu rotacione komore izlaze vruće granule, koje se specijalnim mehanizmom hvataju i sprovode u izmenjivač topline, gde svoju energiju odaju helijumskom gasu. Ovaj se naglo srije i pokreće turbinu elektrogeneratora.

Neizmeran je doprinos fuzionih istraživanja razvoju fundamentalne fizike plazme i nelinearnih pojava vezanih za interakciju sličnih svjetlosnih talasa i materije. Dalji razvoj sličnih koherentnih lasera će se odraziti i na proučavanje strukture materije, uopšte. Konačno, fizika materijala je moćda i najveći dobitnik, jer će se za potrebe korištenja u fuzionim reaktorima razviti novi, savršeni materijali sa veoma povoljnim osobinama i izrakim potencijalima tehničkog korištenja.

Od ideje se ne smje odustati, uprkos svim težnjama i preprekama, jer skoro da i nemamo drugog puta u budućnost osim ovog, i stoga na njemu moramo istražati i uspeti.

## LITERATURA:

- J. Nuckolls: "Laser compression of matter to super-high densities", Nature, 239, 139 (1972).
- J.J. Duderstadt, G.A. Moses: "Inertial Confinement Fusion", Wiley and Sons, New York, 1982.
- W.L. Kruer: "Intense laser plasma interactions: From Janus to Nova", Phys. Fluids, B3, 2356 (1991).
- M.D. Perry, G. Mourou: "Terawatt to petawatt subpicosecond lasers", Science, 264, 917 (1994).
- K. Brueckner, S. Jorna: "Laser driven fusion", Rev. Mod. Phys., 46, 325 (1974).