

ZGODOVINA RAZISKOVANJA PLAZME - FUZIJSKI REAKTORJI (3. del)

Stanislav Južnič*

History of Plasma Research - Fusion Reactors (Part 3)

ABSTRACT

Third part of the article describes scientific research in plasma physics in fusion reactors. We try to figure why the new field of plasma physics was formed so late among other fields of science and what benefit that retardation gives to it by putting plasma as a possible key for solving of the energetic crisis problem. We also try to describe some visions of the future of plasma.

POVZETEK

V tretjem delu razprave opisujemo raziskovanje plazme v reaktorjih za zlivanje jeder. Poskušamo dognati, zakaj je fizika plazme kot posebna panoga nastala tako pozno glede na druge panoge znanosti in kakšne so prednosti te zamude, ko si od raziskovanja plazme in fuzije ometamo rešitev energetske krize zaradi izčrpanja fosilnih goriv. Podajamo tudi nekaj vizij o prihodnjih smereh raziskovanja plazme.

1 Uvod

Naraščanje cene premoga je Britance usmerilo k nadomeščanju termocentral z jedrskimi. Fuzija bi imela pred jedrskimi centralami seveda prednost, saj je devterij kot gorivo zelo poceni in ni težav z jedrskimi odpadki.

Sanje o umetnem Soncu so malodane prirojene ljudem. V začetku sedemdesetih let se je po uspehih TOKAMAK-a "T-3" v SZ zdelo, da je kontrolirano zlivanje jeder pred durmi. Zanesenjaki so načrtovali TOKAMAK-e za posamezna gospodinjstva... Vendar se je četrto stoletje pozneje izkazalo, da rešitev le ni tako blizu.

Večina raziskovanj plazme v zadnjih štiridesetih letih je bila posvečena kontroli energije zlivanja, ki naj bi služila kot praktično neizčrpen energijski vir. Temu problemu so posvetili večino raziskovanj magnetne fuzije med letoma 1945-1958 in inercialne laserske fuzije /1/.

2 Zlivanje jeder

Poznamo dva osnovna tipa termojedrskih reaktorjev. V prvem, katerega najstarejši predstavnik je TOKAMAK, potrebujemo zunanjo energijo le za prižiganje termojedrske reakcije. Pri drugem tipu pa delci α prinašajo premalo energije za vzdrževanje reakcije, zato moramo energijo dovajati od zunaj.

2.1 Magnetne pasti in stellarator

Leta 1952 sta V.D. Šafranov v SZ in neodvisno od njega Anglež M.D. Krosal v tajnosti hladne vojne neodvisno eden od drugega našla pogoje za stabilizacijo plazme z magnetnim poljem. Poskusi v SZ so se izvajali pod vodstvom I.N. Golovina in N.A. Javlinskega. G.I. Budker je predložil, da bi trak plazme vstavili še v eno zunanje

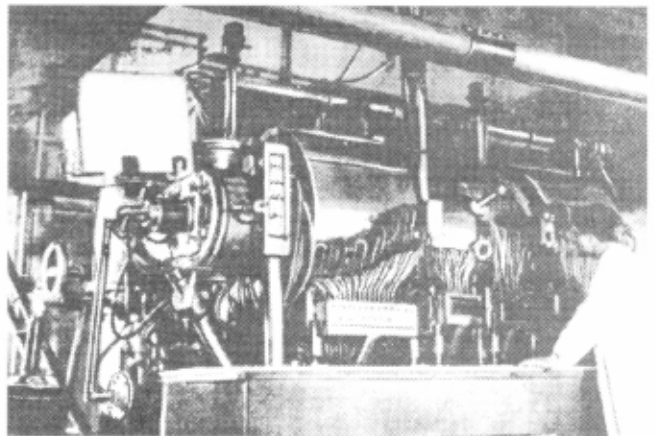
magnetno polje, usmerjeno vzdolž osi. Medsebojno delovanje tega polja s tokom po plazmi daje silo v smeri niti plazme. Če pravilno izberemo velikost povprečnega polja, lahko ta sila kompenzira balonski efekt.

Nestacionarnost plazme je prisilila raziskovalce k iskanju drugih načinov za zadrževanje plazme z magnetnimi polji. Leta 1952 so G.I. Budker v SZ in neodvisno od njega York in Post v Livermoru v ZDA izdelali past, v kateri so za daljše zadrževanje plazme uporabljali odboj nabitih delcev od področja s povečano indukcijo magnetnega polja. Preprosta past je po obliki spominjala na steklenico z dvema grloma. Indukcija magnetnega polja je v grlih višja kot sredi pasti. Ta povišana indukcija tudi sestavlja magnetni zamašek, ki preprečuje pobeg plazme iz pasti. Zato je G.I. Budker svojo konstrukcijo pasti z "magnetnimi zamaški" imenoval "probkotron". V ZDA so enako past imenovali "sistem z magnetnimi zrcali".

Budker je leta 1953 domneval, da se masa delcev spreminja med prehajanjem skozi past, kar so eksperimentalno zaznali na napravi "OGRA" /2/ v SZ in "DSH" v ZDA. OGRA, zgrajena 1958 na Institutu za atomsko energijo Kurčatova, je imela vakuumski prostor premera 1,4 m in dolžine 12 m. Magnetno polje sredi pasti je dosegalo do 0,5 T, na koncih pa do 0,8 T. V tako velikih napravah so že lahko dosegali vakuum 10^{-9} mbar.

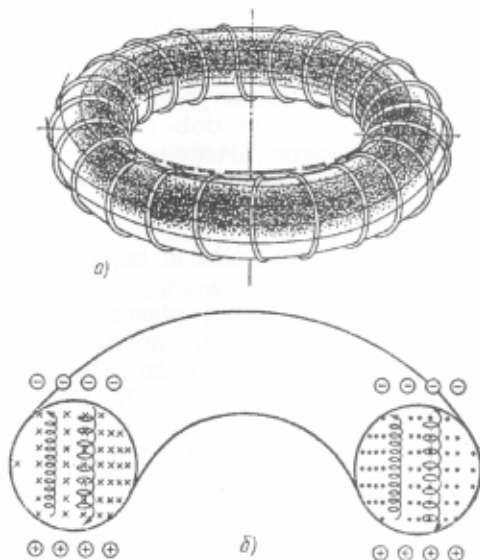
Druga precej manjša past "PR-1" je delovala pod vodstvom M.S. Ioffa v Institutu za atomsko energijo Kurčatova. Premer vakuumske posode s tlakom do $0,8 \cdot 10^{-7}$ mbar je bil 0,5 m, razdalja med magnetnimi zamaški pa okoli 1 m. Sredi prostora je bilo magnetno polje gostote 0,2 T, v zamaških pa 3,4 T.

Že pred začetkom poskusov na "PR-2" so B.B. Kadomcev v SZ leta 1957 ter Rosenblut in C.L. Longmire v ZDA istega leta predvideli, da iz pasti v magnetnem polju plazma ne beži le skozi zamaške, temveč tudi poprek čez magnetno polje /3/.

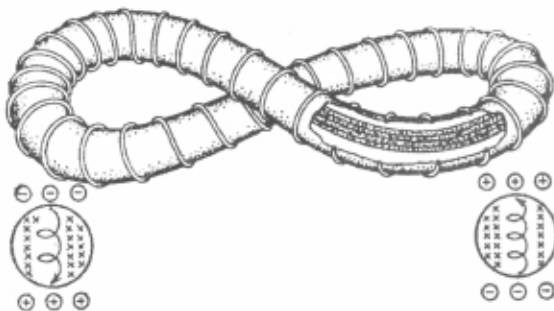


Slika 1: Fotografija Ioffejevega "PR-1" (L.A. Arcimovič, *Controlled thermonuclear reactions*, Oliver & Boyd, Edinburg & London, 1964)

* Dr. Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehnične fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani, kjer je leta 1999 tudi doktoriral.



Slika 2: Skica magnetne pasti (G.S. Voronov, Šturm termojedrnej kreposti, Moskva, Nauka, 1985, str. 67)



Slika 3: Skica stellaratorja (G.S. Voronov, Šturm termojedrnej kreposti, Moskva, Nauka, 1985)

Objavo argentinskega predsednika Perona marca 1951, da so njegovi raziskovalci v laboratoriju v Argentini uspešno izpeljali kontrolirano termojedrsko reakcijo, je spravila k razmišljanju Spitzerja, ki se je z družino ravno odpravljal na smučanje za teden dni. Med dolgim čakanjem na vlečnico je Spitzer premišljeval in po vrnitvi v Princeton zasnoval "stellarator"/4/. 1.6.1951 je od Komisije za atomsko energijo dobil materialno podporo za leto dni teorijskega raziskovanja "stellaratorja" za "pridobivanje energije iz termojedrskih reakcij v devteriju ali devteriju in tritiju". Po letu dni teorijskega raziskovanja so začeli tudi poskuse pod vodstvom Van Allena z univerze Iowa, ki je najprej predložil enostavni model "A" s stekleno vakuumsko posodo premera 5 cm. Sledil je model "B" z enako veliko vakuumsko posodo, ki je omogočala "manjši premer plazme" 2,5 cm in magnetno polje 5 T. Z ultra visokim vakuumom so zmanjšali tok nečistoč s sten in dobili dobro soglasje z rezultati, ki jih je napovedovala magnetohidrodinamika. Zdelo se je, da je uspeh pred durmi. Zato so začeli konstruirati štirikrat večji model "C", ki naj bi mu sledil model "D" v obliki že uporabnega reaktorja. Vendar pa so podrobnejši poskusi pokazali, da je bil čas omejitve plazme v modelu "B" nepričakovano kratek, reda velikosti 10^{-4} s. Zato je Komisija za atomsko energijo končala program na modelu "C". Ker

pa je bila izdelava že v zamahu, so maja 1961 vendarle začeli poskuse, ki so dali za red velikosti daljši čas omejitve plazme.

V stellaratorjih so se težav v toroidnih magnetnih poljih znebili s konstrukcijo v obliki številke "8" za magnetno zadrževanje plazme. Magnetne sile iz tanke magnetne tuljave, ki je bila ovita okoli vakuumske posode v obliki osmice, so usmerjale vodikove ione v posodo. Nenavadna posoda je bila na univerzi Princeton uporabljena zato, da bi preprečila izgube energije pri trkanju vodikovih ionov ob steno. Nabitih delcev se je v eni zanki gibal v smeri urinega kazalca, v drugi pa v nasprotni smeri, tako da se je odklik delcev izničil. Dotedanji vodja izdelave ameriške vodikove bombe Teller je leta 1954 na Kalifornijski univerzi dognal, da ta oblika stellaratorja ni odporna proti vzbujanju plazme vzdolž vijajne črte. Težavo je pozneje razrešil Spitzer, ki je na Princetonu med letoma 1953-1966 vodil tudi laboratorij za fiziko plazme, do leta 1960 imenovan s skrivnim imenom "projekt Matterhorn" /5/.

Ker nobena posoda ne more obdržati česa tako vročega, kot je "vnetljiva" plazma, jo je bilo treba držati v omejenem prostoru z magnetnimi polji v "magnetni steklenici". Seveda plazma ne sme iz steklenice, saj bi se na stenah posode ohladila in tako znižala temperaturo, potrebno za fuzijo.

V ZDA so že konec petdesetih let dosegali okoli 10 milijonov K. Podobne poskuse so delali tudi v SZ, Veliki Britaniji, Švedski, Nemčiji, Japonski in drugod. Britanci so kot pionirji novega področja raziskav sestavljali posebno velike naprave. Sprva so kot reakcijsko substanco uporabljali devterij, pozneje pa tudi tritij, s katerim so bile težave zaradi sevanja večje. Pri uporabi čistega devterija, kjer dve tretjini energije pride v obliki nabitih delcev, se je zdelo možno vso energijo delcev pretvoriti naravnost v električno energijo. Podobno kot delovanje bata v parnem stroju si lahko zamislimo gibljivo plazmo, ki deluje proti magnetnemu polju in električni tok, ki odnaša energijo. Pri mešanici med devterijem in tritijem pa večino energije odnesejo nevtroni. Ovira iz tekočega litija se lahko uporabi za absorpcijo nevtronov in spremembo njihove energije v toplotno, razpad litija pa obenem proizvaja uporabne tritijeve atome. Energija zlivanja jeder se potem uporabi za segrevanje zunaj plazme, ki se potem znova uporabi za proizvodnjo še večje energije.

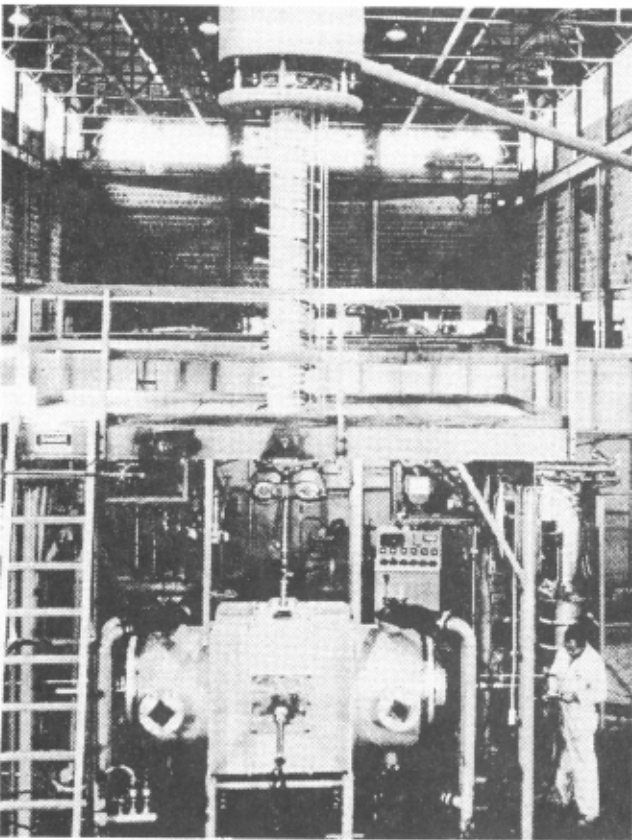
Leta 1952 so v SZ ugotovili, da je za močne "pinch"-e v razredčenem devteriju značilno, da pri nekaterih pogojih postanejo vir močnega sevanja nevtronov in rentgenskih žarkov.

Benettov "pinch"-efekt je postal stalna tema raziskovanj astrofizike in geofizike, v drugi polovici 20. stoletja pa tudi fuzije, ki pa je ni bilo lahko kontrolirati ali stabilizirati. Leta 1950 so v SZ in ZDA predložil uporabo Benettovega odkritja magnetne termoizolacije plazme za kontrolirano termojedrsko zlivanje jeder. Med letoma 1950-1951 so začeli na državni ravni raziskovati "pinch"-efekt devterija v SZ, ZDA in Veliki Britaniji. V ZDA so zastavili projekt Sherwood za razvoj kontroliranega izhoda moči fuzije. Raziskovanje se je z majhno podporo začelo leta 1951, do leta 1959 pa so za projekt dajali že po 40 milijonov dolarjev na leto. Celo vrsto eksperimentalnih naprav za raziskovanje "pinch" efekta so postavili v znanstvenem laboratoriju Los

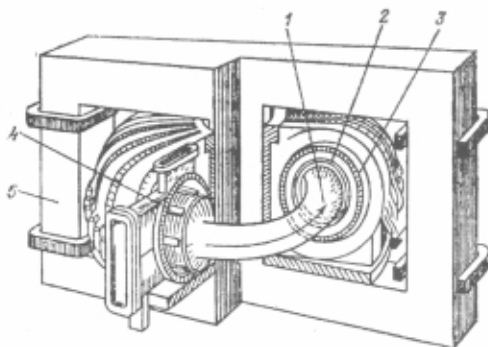
Alamos. Med njimi je napravo, zgrajeno leta 1952, Gamow posrečeno krstil za "Perhapsatron". V njem so vodikovi ioni krožili v vakuumski elektroni oblike, podobne krofu, električni tok pa jih je potegnil skupaj v ozko kolono znotraj elektronke. Plazma je omejevala le magnetno polje, ki je nastajalo zaradi samega toka plazme, kar ni omogočalo zelene stabilnosti.

V laboratoriju univerze Lawrence Livermore v Kaliforniji so izbrali drugačen način reševanja problema fuzije, imenovan "magnetna zrcala". Namesto prostora v obliki krofa so uporabili ravno cev in so vodikovo plazmo lovili z močnimi magnetnimi polji ter "odbijali" nazaj s konca cevi v notranjost.

V nacionalnem laboratoriju v Oak Ridge so se fizike lotili z zaganjanjem molekul težkega vodika navzdol v reakcijsko posodo. Tam so jih ionizirali z električno obločnico in nato nanje vplivali z magnetnimi polji.



Slika 4: Fotografija naprave za raziskovanje fuzije v Oak Ridgu (Ralph E. Lapp, *Roads to discovery*, Harper & Brothers Publishers, New York, 1960, str. 170)



Slika 5: Skica TOKAMAK-a (G.S. Voronov, *Šturm termojedrnei kreposti*, Moskva, Nauka, 1985)

2.2 TOKAMAK /6/

Struktura magnetnega polja v TOKAMAK-u je bila zelo podobna stellaratorju. Razlika je le v tem, da se vrtenje silnic magnetnega polja ne dobi z zunanjim ovojem vijačnice, temveč s tokom, ki teče premo po plazmi. Pri tem nastanejo prav takšne zaprte magnetne površine kot v stellaratorju.

TOKAMAK je najenostavnejša in najbolj raziskana omejitvena shema za plazmo, saj je potrebno le najenostavnejše toroidno polje, plazma in tok. Prvi TOKAMAK je leta 1956 razvila Arcimovičeva skupina na Institutu za atomsko energijo Kurčatova v SZ. Dosegali so temperature 15 milijonov K /7/. Sprva so za TOKAMAK uporabljali naziv "Toroid v Magnetnem Polju (TMP)". Leta 1958 so sestavili "T-1" s posodo iz nerjavečega jekla, vendar so dosegali le nekaj tisoč stopinj in niso presegli potencialne bariere. Praktično enaka "T-1" in "T-2" sta imela vakuumsko posodo premera 125 cm pri največji magnetni poljski jakosti 0,8 MA/m /8/.

Lev Andrejevič Arcimovič (1909-1973) je bil rojen v Moskvi, šolal pa se je v Minsku. Med letoma 1930-1944 je raziskoval v Leningrajskem fizikalno-tehničnem inštitutu Nacionalne akademije SZ, nato pa v inštitutu za atomsko energijo Kurčatova. Leta 1936 je s sodelavci dokazal ohranitev impulza pri anihilaciji pozitrona in elektrona. Od leta 1951 je vodil raziskovanje termojedrske sinteze v SZ. Že naslednje leto je skupaj z Mihailom Aleksandrovičem Leontovičem (rojen leta 1903 v Moskvi) in sodelavci odkril sevanje nevtronov v visokotemperaturni plazmi.

Leta 1956, po februarjem govoru Nikite Hruščova proti stalinizmu na 20. kongresu komunistične partije SZ, je Igor Vasiljevič Kurčatov (1903-1960) v harvelskem atomskem centru v Angliji predaval o temeljnih termojedrskih raziskavah in tako z njih razkril dotedanje zaveso skrivnosti. Dve leti pozneje se je izmenjava izkušenj nadaljevala na 2. mednarodni konferenci za miroljubno uporabo atomske energije pod okriljem OZN v Ženevi, kjer je tudi Spitzer prvič javno predstavil svoj stellarator /9/. Leta 1961 so se raziskovalci sestali v Salzburgu na 1. mednarodni konferenci za fiziko plazme in kontroliranem zlivanju jeder. Ob številnih monografijah vodilnih raziskovalcev (Spitzer (1956, 2:1962), T.G. Cowling (1957), Chandrasekhar (1960), Alfvén (1950, 2:1963), Arcimovič (1961, 2:1964)) je fizika plazme postala priznana raziskovalno področje na obeh straneh "železne zavesa".

Odkritje N.V. Filippova v začetku petdesetih let je do današnjih dni ostalo ena realnih različic rešitev termojedrskega problema. Ko je postalo jasno, da je ena od glavnih poti izgube energije v teh praznjenih povezanih z izločanjem primesi, je akademik L.A. Arcimovič predložil zamenjavo fosforne stene prostora za praznjenje z bakreno. Domneval je, da bo visoka toplotna prevodnost bakra zmanjšala grete površine pri stiku s plazmo in se bo tok primesi, prihajajočih v plazmo, zmanjšal. Zaradi varnosti so stransko steno prostora električno povezali s katodo. Ko so na anodo pritisnili impulz visoke napetosti, je v prostoru zasvetila razelektritev. Raziskovalci so bili presenečeni nad izrednim

pojavi, saj je sprememba materiala bočne stene pripeljala k velikemu povečanju števila izhodnih nevtronov. Drugače kot pri navadni razelektiviti, se je v tem sistemu nevtronski impulz začel vesti stabilno.

N.V. Filippov je s pomočjo svinčenih kolimatorjev z majhno odprtino in z nevtronskim detektorjem odkril, da je izvir nevtronov v izredno majhnem področju na osi med anodo in katodo velikosti okoli 1 cm. Kazalo je, da se med sproščanjem tako sestavljenih nabojev pod tlakom magnetnega polja plazma od vseh strani usmeri v središče sistema. V točki simetrije "potoki" plazme trkajo in tvorijo površinsko zgostitev, iz katere izhajajo nevtroni.

To področje in z njim ves sistem so poimenovali "plazmatski fokus". Tok plazme se je zbiral ob osi na podoben način, kot se svetlobni žarki zbirajo v gorišču leče.

Na 2. mednarodni konferenci o fiziki plazme in kontroliranem zlivanju jeder v Angliji leta 1965 je Bohm predložil povezavo med časom obstoja, temperaturo in velikostjo magnetnega polja v plazmi:

$$\tau = 4 a^2 B/T$$

kjer je a radij plazme, B indukcija magnetnega polja in T temperatura plazme. Enačba je kazala izrazit pesimizem do delovanja termojedrskega reaktorja, saj je Bohm predvidel krajšanje časa obstoja plazme z naraščanjem njene temperature.

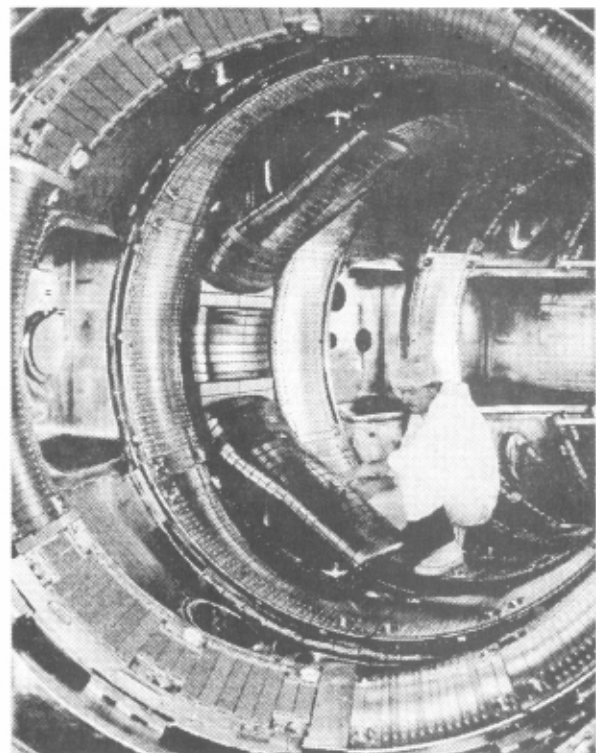
Leta 1961 so na inštitutu za atomsko energijo v SZ sestavili "T-3" s toroidno posodo premera 200 cm, na katerem so začeli poskuse poleti 1962. "Manjši premer plazme" s premerom 40 cm so z dvema vakuumskima črpalkama dosegali tlak $4 \cdot 10^{-8}$ mbar pri največji magnetni poljski jakosti 3 MA/m. Leta 1968 so tu prvi dobili kvazistacionarno termojedrsko reakcijo. Istega leta so na 3. mednarodni konferenci o fiziki plazme in kontroliranem zlivanju jeder v Novosibirsku objavili, da se jim je posrečilo preseči radiacijsko bariero, do katere je skoraj vsa vložena energija odhajala z izločanjem primesi. Po sovjetskih meritvah naj bi v TOKAMAK-u "T-3" dosegali deset milijonov stopinj, kar je bilo skoraj desetkrat več kot v najboljšem stellaratorju. Američani tega sprva niso hoteli verjeti, zato so na konferenci sprožili razpravo o metodah merjenja temperature in drugih lastnosti plazme ter skušali najti napako pri meritvah sovjetskih kolegov. Angleži so naslednje leto sami merili temperaturo v "T-3" in dobili še višjo vrednost. Zato so v ZDA prenehali delo na stellaratorjih. Največji stellarator, model "C", so predelali v TOKAMAK "ST". Odstranili so vijčno navitje in ustavili večjo vakuumsko posodo /10/. Poskuse so začeli leta 1970 in o njih že naslednje leto poročali na mednarodni konferenci o fiziki plazme in kontroliranem zlivanju jeder v Madisonu. Na MIT so postavili TOKAMAK, ki je bil sicer nekoliko manjši od sovjetskega "T-3", vendar pa je zmožgal skoraj trikrat močnejše magnetno polje 9 T. "T-3" je po vrsti modernizacij, imenovanih "T-3a" in "T-4", obratoval do leta 1978.

Poznejši uspehi stellaratorjev v SZ, kjer so prvega postavili leta 1962 v fizikalnem inštitutu P.N. Lebedeva pri akademiji znanosti, so povzročili ponoven obrat, saj so tedaj imeli v ZDA okoli 20 TOKAMAK-ov in nobenega stellaratorja. Zato so Princetonov TOKAMAK "PLT" /11/, ki je dosegal 60 milijonov stopinj, predelali v stellarator. Sredi leta 1983 je Nacionalni raziskovalni laboratorij v Oak Ridgu dobil že 15 milijonov dolarjev za stellarator.

Leta 1982 so v TOKAMAK-u "T-10" v SZ pri ionih v osi nitke, segrevanih s curki hitrih atomov, dosegli že 'energijski življenjski čas' 0,1 s in temperaturo 80 milij. K.

V naslednji generaciji TOKAMAK-ov so na "T-15" v SZ, TFTR v ZDA /12/, JET v Evropski skupnosti in JT na Japonskem dosegali parametre plazme blizu tistim, potrebnim za termojedrski reaktor.

Leta 1957 je J.D. Dawson pokazal, da mora produkt med gostoto ionov v plazmi in zapornim časom presegati $3 \cdot 10^{20}$ s/m³, da bi obdržali termojedrsko reakcijo po prenehanju zunanega segrevanja. Leta 1994 se je TFTR v Princetonu že močno približal Lawsonovemu merilu za produkt med gostoto ioniziranih jeder in časom, ki naj bi presegal $2 \cdot 10^{20}$ s/m³. Dosegali so tudi temperature do $4 \cdot 10^8$ K, vendar ne v istem poskusu. TFTR je začel delovati konec leta 1982, vendar je pozneje Laboratorij za plazmo v Princetonu zašel v krizo, tako da je od 1300 zaposlenih leta 1984 ostalo le še 800 /13/.



Slika 6: TFTR v Princetonu (Harold P.Fluth, Reaching ignition in the tokamak, Phys.Today, marec 1985)

Pozneje se je izkazalo, da bi cena testnega reaktorja preseгла možnosti posameznih držav. Zato je leta 1985 Mihael Gorbačov predložil Ronaldu Reaganu skupno izdelavo TOKAMAK-a. Na osnovi tega dogovora se od leta 1987 dalje v Garchingu v Nemčiji v presledkih sestajajo raziskovalci Evropske skupnosti (s Švico), Japonske, Rusije in ZDA. Aprila 1988 so se odločili za skupno gradnjo TOKAMAK-a ITER /14/. Toroid plazme naj bi bil širok okoli 5 m, dolg 10 m, premer okrog središčne linije toroida pa naj bi bil okoli 50 m. Koncept za ITER je bil dodelan leta 1990 /15/, vendar zaenkrat še ni soglasja o lokaciji naprave.

Na Japonskem so leta 1990 začeli graditi tudi napravo tipa stellaratorja z manjšim radijem vakuumске posode, 50 cm. Naprava bo, tako kot podobna v Nemčiji, mnogo manjša od ITER, vendar bo omogočila bolj neposredno primerjavo s TOKAMAK-i.

2.3 Laserska metoda

Zlivanje jeder je mogoče kontrolirati z impulzno metodo tudi brez uporabe magnetnega zadrževanja plazme. Zgoščino devterija in tritija premera okoli milimeter segrevamo zelo kratek čas, v katerem se še ne more razleteti. Pri tem nastane zelo visok tlak, ki omogoča intenzivnejšo izmenjavo toplote med elektroni in protoni. Uporabljamo dobro fokusirano, močno lasersko sevanje, ki mora zgoščino sočasno segreti z vseh strani v času reda velikosti ns. Način kaže nekaj tehničnih in konstrukcijskih težav, denimo kako koristno izrabiti dobljeno energijo nevtronov /16/.

Prvo lasersko termojedrsko zlivanje se je posrečilo leta 1968 v laboratoriju Nikolaja Genadijeviča Basova na napravi Kalmar v Fizikalnem inštitutu P.N. Lebedeva pri Sovjetski akademiji znanosti /17/. V laboratoriju univerze Lawrence Livermore v Kaliforniji so leta 1995 izdelali dotlej najmočnejši (10^{15} W) laser za raziskovanje fuzije.

2.4 Nепretrgano gretje plazme

Metodo so razvili v laboratoriju za fizikalne probleme v Moskvi pod vodstvom Kapice leta 1969/18/. Nasprotno od TOKAMAK-a in laserske metode je skupina Kapice slučajno našla metodo za pridobivanje "goreče" plazme. Že leta 1950 so izdelali močan visokofrekvenčni generator "Nigotron", ki je deloval nepretrgoma. V enem izmed modelov so valovanje prepuščali skozi kroglo iz kremenca, napolnjenega s helijem pri tlaku 133 mbar. Krogla je v ostrih mejah zažarela za nekaj sekund, tako da se je na enem mestu stopila.

Leta 1955 so objavili hipotezo, da se tudi kroglasta strela v nevihtnih oblakih pojavi po navadni strelji zaradi nihanja pri visokem tlaku, ki dovaja energijo za svetlikanje krogle.

Marca 1958 so začeli meriti s kroglastim resonatorjem, napolnjenim s He pri navadnem tlaku. Dobili so prosto padajoči naboj ovalne oblike, ki je nastal v območju maksimuma električnega polja in se je počasi gibal po krogu, ki je sovpadal s silnicami.

Najzanimivejše je bilo sevanje plazme v vodik ali devteriju. Pri majhnih močeh razelektritev ni imelo strogo določenih mej in je svetilo difuzno. Pri večjih močeh je svetilo bolj, premer razelektritve se je povečal, v notranjosti pa je nastalo strogo ločeno jedro oblike niti. V prvotnih poskusih so razelektritev vzbujali z močjo do 15 kW pri tlaku 5 bar. Čim večji je bil tlak, tem stabilnejša je bila razelektritev in tem izrazitejša je bila oblika jedra plazme.

S preučevanjem prevodnosti plazme in tudi z aktivno in pasivno spektralno diagnostiko so ugotovili, da imajo elektroni v središču praznjenja zelo visoko temperaturo, več milijonov stopinj. Na meji niti plazme nastane velik temperaturni gradient, ki ga lahko omogoči le dobro toplotno izolirana plast. Sprva je tolikšen gradient vzbujal dvome, dokler zanj niso našli fizikalne razlage. Na meji goreče plazme mora nastati dvojna električna plast, od katere se elektroni odbijajo brez izgube energije. Podobno je tudi, ko plazmo obdaja plast dielektrika, denimo stekla ali porcelana.

Zaradi dvojne električne plasti na površini dielektrika imajo lahko tudi pri višjih tlakih elektroni temperaturo več 10000 stopinj, ne da bi zaznavno grela stene posode. Model takšne toplotne izolacije plazme je prvi

predložil Langmuir. Elektroni pri trku ob dielektrik prodrejo globlje od bolj okornih ionov. Prostorninski naboj elektronov je zato globlje od površinskega naboja ionov in obrne električno polje dvojne plasti tako, da se hitri elektroni od njega elastično odbijajo.

V sedemdesetih letih so zelo izboljšali metodo mikrovalovne diagnostike, tako da so lahko v plazmi z natančnostjo 5 % merili porazdelitev gostote po radiju niti ter njeno odvisnost od magnetnega polja in tlaka. Pojasnjene so bile okoliščine, ki peljejo k stabilizaciji niti plazme. Večkratno so povečali moč, dovajano k niti, in dvignili temperaturo elektronov do 50 milijonov stopinj. Tako bi lahko dobili zlivanje devterija s tritijem tudi brez dopolnilnega segrevanja plazme z magnetoakustičnim nihanjem, če bi se dalo zagotoviti temperaturno ravnovesje med ionskim in elektronskim plinom. To bi zelo poenostavilo konstrukcijo termojedrskega reaktorja.

Čeprav je bila konstrukcija Kapičinega reaktorja na nepretrgano gretje plazme zelo enostavna, je Kapica dvomil, ali ga bo mogoče uporabiti za kontrolirano zlivanje jeder. Konvekcijskih procesov izmenjave toplote namreč ni mogoče oceniti s teorijo in jih je zato moral eksperimentalno raziskati konec sedemdesetih let.

Možnost nastanka konvekcije zaradi notranjih napetosti, ki jih povzročajo gradienti temperature, je prvi opisal James Clerk Maxwell (1831-1879). Malo pred smrtjo je pri raziskavah Crookesovega radiometra pokazal, da so notranje napetosti sorazmerne kvadratu viskoznosti in odvodu gradienta temperature /19/. Viskoznost je sorazmerna povprečni prosti poti, ki je pri navadnih plinih in pri navadnih tlakih blizu 10^{-4} mm. Pri majhnih gradientih temperature je potem notranja napetost premajhna za meritev.

Pri plazmi sega povprečna prosta pot do centimetra, gradient temperature pa je velik. Zato je notranja napetost po Maxwellovi enačbi tudi desetkrat večja kot v plinu in lahko v plazmi povzroči konvekcijski tok in turbulence. Magnetno polje lahko vpliva na naravo tega pojava. Dodatno delovanje električnega polja pa povsem onemogoča celo grobo oceno moči konvekcije, potrebne za učinkovito segrevanje ionov in morebitno naraščanje kritične velikosti niti plazme v reaktorju z večanjem dimenzij reaktorja brez ustreznega pridobivanja energije. Slednje bi seveda postavilo pod vprašaj gospodarnost konstrukcije reaktorja te vrste /20/.

4 Prihodnost raziskovanja plazme in plazemskih tehnologij

V idealni limiti brez sipanja je plazma povsem zmrznjena na silnicah magnetnega polja. Resnična plazma pa je navadno turbulentna in kompleksna, tako da je raziskovanje njenega vedenja postalo eden ključnih prispevkov k razvoju nelinearne fizike.

Dolgoletne težave so spodbudile raziskovalce k šaljivi pripombi, da rešitev problemov fuzijskega reaktorja odpira pred novincem na tem področju vedno nove probleme z vedno dražjimi rešitvami, kot tarča, ki se sproti odmika. Rešitev problema fuzije naj bi bila "vedno 20 let pozneje" /21/. Vendar ni dvoma, da je fuzijski reaktor zmogljivosti 1 GW mogoče zgraditi, čeprav je veliko problemov še odprtih. Osnove fizike

TOKAMAK-a so dovolj dobro raziskane, vendar je veliko raziskovanja še vedno usmerjeno v razumevanje podrobne narave mikroturbulenc, ki povzročajo anomalno prepustnost energije in goriva.

Brez pridrzkov je mogoče predvideti, da bo fizika plazme ostala živo raziskovalno področje tudi v naslednjem stoletju. Temeljni problemi dinamike Zemlje in vpliva magnetnih polj na kozmološki razvoj ostajajo odprti. Ob raziskovanju fuzije nastajajo nove plazemske tehnologije, ne da bi bile vnaprej načrtovane. Uspehi so predvsem rezultati "Edisonovskega načina" poskusov in napak, ki res prinaša uspeh, vendar le ob visokih stroških. Podrobno razumevanje z možnostjo predvidevanja turbulenc in vedenja fuzijske plazme so pomembni izzivi sodobne fizike.

Plazma postaja vedno pomembnejša v tehnologiji varjenja, rezanja, čiščenja in nanašanja tankih plasti, izboljševanja fizikalne žilavosti površin ter odpornosti proti rji. Najpomembnejša in najdonosnejša pa je uporaba plazme za jedkanje, ki je bilo v poznih sedemdesetih letih prvič uporabljeno v proizvodnji čipov in je postalo nepogrešljivo za proizvodnjo VLSI.

Prednost plazemskih procesov je predvsem ta, da omogoča anizotropno odstranjevanje materiala polprevodnika, izolatorja ali kovine. Pri plazemskem jedkanju z reaktivnimi ioni kombiniramo vodeno obstreljevanje s hitrimi ioni s kemično reaktivnimi interakcijami. Jedkanje zato poteka v smeri pravokotno na površino. Postopek omogoča dovolj hitro in enakomerno jedkanje brazd v siliciju debeline 0,2 μm in globine 4 μm , ki jih jedkanje s tekočinami ali druge sodobne metode ne zmorejo /22/.

Plazmo uporabljajo tudi v pospeševalnikih, kjer s prostorsko nabitimi valovi v plazmi dobijo zelo močna električna polja, ki se premikajo s fazno hitrostjo blizu svetlobni /23/. Tako je plazma nepogrešljiva v vseh industrijah, kjer se obrača največ denarja: vesoljski, pospeševalniški, fuzijski in računalniški.

5 Sklep

"Sedaj lahko opazujemo svoje vesoljsko okolje z rentgenskimi in gama žarki - sevanji, ki jih oddajajo večinoma pojavi plazme. Tradicionalno je naše poznanje vesolja izhajalo iz opazovanja vidne oktave, pozneje dopolnjene z radijskimi frekvencami in nekaterimi opazovanji v infrardečem. Vesoljska doba nam je omogočila, da ne vidimo več le tega "vidnega vesolja", temveč tudi "vesolje plazme"... Razmerje med vidnim in plazemskim vesoljem je podobno razmerju med vidno in rentgensko sliko človeka... Podobno kot

Dodatek:

NOBELOVE in CRAFOORDOVE nagrade, ki so jih prejeli vodilni raziskovalci plazme, obravnavani v naši razpravi:

leto	priimek	znanost	področje raziskovanja	
			plazma	drugo
1932	Langmuir	kemija		tanke plasti površin
1947	Appleton	fizika	lastnosti ionosfere	
1962	Landau	fizika		teorija tekočega helija
1967	Bethe	fizika	teorija jedrskih reakcij, ki dajejo energijo zvezdam	
1970	Alfvén	fizika	magnetohidrodinamika in fizika plazme	
1978	Kapica	fizika		nizke temperature
1983	Chandrasekhar	fizika	teorija strukture in evolucije zvezd	
1985	Spitzer	astronomija		medzvezdna snov

nam vidna slika daje informacijo o površini nebesnih teles, nas raziskovanje plazme pouči o strukturi prostora med planeti in, z ekstrapolacijo, o tem, kako je Sončni sistem nekoč nastal iz drobnih delcev plazme... Prehod od "vidnega vesolja" k "vesolju plazme" je v nekaterih pogledih podoben prehodu od geocentrične k heliocentrični kozmologiji pred 400 leti. Zadnje večinoma pripisujejo Koperniku, vendar je bila Galilejeva uporaba teleskopa morda bolj pomembna, saj je dala veliko novega materiala za opazovanje. V resnici je že 2000 let pred Kopernikom Aristarh s Samosa predložil heliocentrični sistem, vendar ga ni mogel dokazati brez teleskopa. Podobno nam je uporaba vesoljskih plovil dala bogate, nove informacije, ki kličejo k novemu modelu vesolja." /24/

Literatura in opombe

- /1/ H.H. Stroke, urednik, The Physical Rev., The first hundred years, American Inst. of Physics Press, New York, str.742.
- /2/ "Odin Gramm Nevtronov v Sutki"; gram nevtronov na dan naj bi ravno zadostoval za temojedrsko reakcijo
- /3/ L.A. Arcimovič, Controlled thermonuclear reactions, Oliver & Boyd, Edinburgh & London, 1964, str.251, 330, 340-342 in 391
- /4/ zvezdna pentlja
- /5/ L. Spitzer, Dream, Stars and Electronics, Princeton University Press, 1997, str. 3 in 51
- /6/ rusko: "TOroidalnaja KAMERA s MAgnitnimi KATUškami"
- /7/ L.V. Tarasov, Lazeri: Deistvitelnost i nadeždi, Moskva, Nauka, 1985, str.164
- /8/ L. A. Arcimovič, n.d., 1964, str. 211
- /9/ L. Spitzer, n.d., 1997, str. 445
- /10/ L. Spitzer, n.d., 1997, str. 472
- /11/ Princeton Large Torus
- /12/ Tokamak Fusion Test Reactor v Princetону
- /13/ Phys.Today, januar 1991, str. 59
- /14/ International Thermonuclear Experimental Reactor (Spitzer, n.d., 1997, str.472).
- /15/ G. Cordey, R. Goldston in R. Parker, Progress toward a tokamak fusion reactor, Phys.Today, januar 1992, str. 29
- /16/ P. L.Kapica (1894-1984), Plazma i upravljajemaja termojaderna reakcija, Nobelovska lekcija 1978, ponatis v 3. izdaji zbornika del Kapice z naslovom: Eksperiment teorija praktika, Moskva Nauka 1981, str. 118
- /17/ Basov je bil rojen leta 1922, leta 1964 pa je delil polovico Nobelove nagrade iz fizike za raziskovanja v kvantni elektroniki, ki so pripeljala do iznajdbe laserjev in maserjev
- /18/ Kapica, n.d., 1981, str. 19
- /19/ On stresses in rarified gases arising from inequalities of temperature, Proc. R.S. London 27 (1878) str. 304; Phil.Trans. 170 (1879) str. 231
- /20/ Kapica, n.d., 1981, str. 127-128.
- /21/ G. Yonas, Fusion and the Z pinch, Sci. Am. (1998) str.22-23 in 27; Hardo Bruhns, Fusion: hopes and doubts, Physics Word (oktober 1990) str.17; Harold P.Fluth, Reaching Ignition in the tokamak, Phys.Today (marec 1985) str.61
- /22/ R. Gottscho, Plasmas make progress, Physics Word (1993) str.39-40 in 42.
- /23/ Phys.Today, januar 1987, str.S-62.
- /24/ H. Alfvén, Phys.Today, september 1986, str. 22, 23 in 26-27.