

ZGODOVINA RAZISKOVANJA PLAZME - MAGNETOHIDRODINAMIKA (II del)

Stanislav Južnič*

History of Plasma Research - Magnetohydrodynamics

ABSTRACT

The article describes the discovery of pinch effect and the development of magnetohydrodynamics, a new field of scientific research that had to push hard to get its place in scientific world.

POVZETEK

V drugem delu razprave opisujemo odkritje "pinch"- efekta in razvoj magnetohidrodinamike, nove panoge znanosti, ki si je le stežka utirala pot.

1 Uvod

Fizika plazme je že hitro dala slutiti, da bo pomembna tako pri raziskovanju vesolja kot pri simulaciji tamkajšnjih razmer v laboratorijih. Osnovna težava ni bila ustvarjanje plazme, temveč njeno zadrževanje v omejenem prostoru. Podobno kot pri elektronskem mikroskopu v začetku tridesetih let so se tudi raziskovalci plazme odločili, da jo bodo z elektromagnetnim poljem raje zadrževali dovolj daleč od sten posode, saj ni bilo verjetno, da bi katerikoli material lahko zdržal tako visoke temperature.

2 Slovenski prispevek k raziskovanju plazme v magnetnem polju: Sirkovo raziskovanje pred prvo svetovno vojno

Boltzmannove transportne enačbe so temelj raziskovanja plazme, pri katerem pa sam Boltzmann ni več aktivno sodeloval, razen kot mentor raziskav na dunajskem fizikalnem inštitutu. Tam so za raziskovanje katodnih žarkov uporabljali ogromen elektromagnet. Tako je Boltzmann 18.3.1906 ocenil disertacijo Radakovitsa o meritvah prevodnosti ioniziranega zraka pri različnih tlakih kot "ne čisto brez znanstvenega interesa". Radakovits je opisal tudi zgodovino raziskovanja lastnosti segretega zraka in še posebej Nahrwoldovo delo /1/. Zagovora disertacije 28.4.1906 pa Boltzmann ni več dočakal.

Tlivne razelektritve je raziskoval tudi Hugo Sirk, rojen 11.3.1881 v Gradcu, poznejši univerzitetni profesor v Ljubljani. Fiziko je študiral pri Leopoldu von Pflaundlerju (1839-1920) v Gradcu, saj je bil Paul Czermak (1857-1912) izredni profesor eksperimentalne fizike na Univerzi v Gradcu le do 30.3.1898 in je odšel pred začetkom Sirkovega študija. Teoretično fiziko je Sirku predaval Anton Wassmuth (1844-1927), ki je leta 1893 po dvakratni neuspešni kandidaturi le prešel iz Prage v Gradec in je od tam bržkone prinesel tudi Pulujevo in Gintlovo zanimanje za katodne žarke. Wassmuthu je

pomagal tudi Franz Streinz (1855-1922), ki je bil obenem tudi profesor na Visoki tehniški šoli v Gradcu od leta 1892. Na teorijski katedri univerze v Gradcu sta bila tudi docent Victor Hausmaninger (1855-1907) ter izredni profesor Simon Šubic (1830-1903), ki je bil upokojen septembra 1902, sredi Sirkovih študijev.

Graški fizikalni inštitut, kjer je Sirk leta 1904 doktoriral in delal v naslednjih letih, je bil dobro opremljen za raziskovanje razelektritev v plinih, saj sta tam kmalu po odkritju snemala rentgenske fotografije tako Pflaundler kot Czermak /2/. Pflaundler je že 21.1.1896 na seji dunajske akademije objavil lastno rentgensko fotografijo igle v dlani za potrebe kirurgije z ekspozicijo 15-20 min, 8 dni za Boltzmannovim poročilom /3/.

Sirk je 29.4.1909 na Fizikalnem inštitutu v Gradcu nadaljeval Rutherfordove raziskave radioaktivnosti torija v vakuumski cevi. Z elektrolizo je raziskoval aktivnost raztopine v odvisnosti od njene koncentracije v solni kislini in dokazoval, da kemijski pojavi ne vplivajo na radioaktivnost, ki je jedrski proces /4/.

Po prehodu na novo ustanovljeni Inštitut za preučevanje radija na Dunaju je Sirk 13.3.1913 objavil razpravo o padcu tlaka tlivne razelektritve pod vplivom transverzalnega magnetnega polja. Nadaljeval je raziskovanje Eugena Goldsteina (1850-1930) /5/, ki se je edini ukvarjal tudi s prenosom delcev plina pri tlivni razelektritvi, čeprav je imel premalo natančne naprave /6/. V teorijskem delu razprave je Sirk pokazal, da je povprečna prosta pot v plinu veliko manjša od velikosti vakuumske posode, kar je po Stefanovi teoriji dokazoval že Puluje v nasprotju s Crookesom (1879) in Stokesom /7/.

Obenem z raziskovalnim delom se je Sirk uveljavljal tudi na univerzi, tako da ga je pot zanesla celo v Ljubljano. Prvi redni profesor za fiziko na Univerzi v Ljubljani je postal v juliju leta 1920. V. Rubinowicz, vendar je marca 1922 odšel na tehniko v Lvov. Tečaj teorijske fizike je za njim nadaljeval profesor na realni gimnaziji Poljane Valentin Kušar. Leta 1924 je postal redni profesor na tehniški fakulteti, kjer je že od leta 1920 vodil tečaj eksperimentalne fizike. Predavanja iz eksperimentalne fizike so bila na realni gimnaziji do spomladi 1925, ko je tehniška fakulteta dobila za svoj fizikalni in matematični inštitut visoko pritličje v vzhodnem traktu glavnega univerzitetnega poslopja. Tam je domovala nadaljnjih dvajset let. Po Kušarjevi smrti je leta 1927 honorarno predaval fiziko Julij Nardin (1877-1959) s tehniške srednje šole, med letoma 1928-1934 pa kot pogodbeni redni profesor dunajski privatni docent Sirk. Kljub slovenskemu poreklu je slovenščino obvladal le na pol. Poučeval je tudi Antona Peterlina (1908-1990) in leto dni starejšega Miroslava Adlešiča, ki sta diplomirala leta 1930. Peterlin je leta 1933 postal Sirkov asistent in je mesto obdržal tudi po Sirkovem imenovanju za docenta na dunajski univerzi leta 1934, ko je predavanja fizike na tehniški fakulteti prevzel Anton Kuhelj (1902-1980), docent za mehaniko /8/.

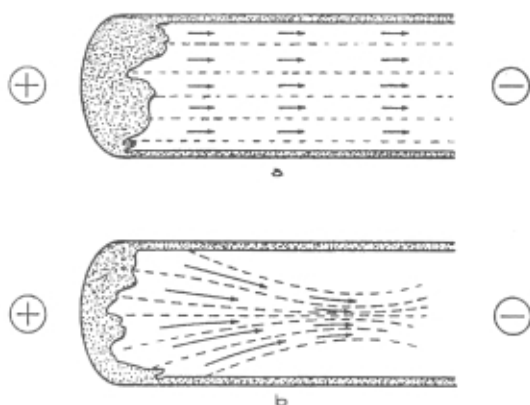
* Stanislav Južnič je profesor fizike in računalništva na srednji šoli v Kočevju. Leta 1980 je diplomiral iz tehnične fizike na Fakulteti za naravoslovje in tehnologijo, magistriral pa leta 1984 iz zgodovine fizike na Filozofski fakulteti v Ljubljani.

Sirk je leta 1940 napredoval do izrednega profesorja na Dunaju saj ni bil v posebnih sporih s fašističnim režimom, zaradi katerega je leta 1938 Erwin Schrödinger (1887-1961) zapustil univerzo v Gradcu. Leta 1952 je bil Sirk upokojen in je 15.12.1959 umrl na Dunaju.

3 "Pinch"-efekt

Američan Benett je leta 1932 domneval /9/, da preboj pri mrzli emisiji povzročajo majhni tokovi pozitivnih ionov iz plina, ki se vzdolž toka elektronov gibljejo proti hladni katodi. Vendar Benett ni znal razložiti pojava, zato je dve leti pozneje na državni univerzi Ohio raziskoval vzroke za preboj pri hladni emisiji in regulacijo plazme z magnetnimi polji in odkril "pinch"-efekt:

"Tok hitrih elektronov, ki lahko zbere dovolj pozitivnih ionov, da približno dosežejo linearno gostoto elektronov, postane magnetno samofokusirajoč, ko tok preseže vrednost, določeno z začetnimi razmerami v toku... Samofokusiranje delce približuje osi v vedno večjem delu toka elektronov... Ta vrsta procesa se lahko nadaljuje v neskončnost, če je le zadoščeno pogojem za magnetno samofokusiranje v vsakem delu toka, ki je dolg v primerjavi s svojim premerom... Opisani proces je verjetno le kratkotrajen, reda velikosti 10^{-4} ali 10^{-5} s. Pozneje tokovi prenehajo biti samofokusirajoči, ker transverzalne energije elektronov ob ostrih robovih kraterjev na katodi postanejo prevelike ali pa blizu katode gostota snovi toliko naraste, da trkov ne moremo več zanemarjati." /10/



Slika 1: Shema "pinch"-efekta

Pred Benettom so sicer raziskovali fokusiranje počasnih elektronov zaradi ostankov plina, niso pa preučevali fokusiranja zaradi magnetnega privlaka med deli toka elektronov, ki postane pomembno pri visokih napetostih.

Benett je dokazal, da preboja pri hladni katodi ne povzročijo strukturni defekti na površini katode, temveč razmere v toku plazme. Naštel je šest eksperimentalnih dejstev, opaženih ob preboju pri hladni emisiji:

- 1) Porušenje je bilo izrazitejše pri elektrodah, iz katerih so izločili pline
- 2) Poliranje površine katode ni imelo vpliva, razen na začetne majhne tokove
- 3) Če je pri razplinjnih elektrodah po preboju poljska jakost na katodi malo manjša od poljske

jakosti, pri kateri nastopa preboj, stečejo močni nenadni curki elektronov skozi elektronko (Townsendova razelektritev). Ti tokovi so podobni tokovom ob samem preboju, vendar njihova frekvenca pada s časom

- 4) Preboj lahko preprečimo ali vsaj močno zmanjšamo verjetnost za njegov nastanek z razplinjanjem elektrod ali s povečanjem upornosti zaporedno vezanega reostata, do vrednosti, ki za 10^{-3} , 10^{-4} ali manj omeji največjo vrednost toka
- 5) Pred porušenjem "pinch-efekta" je tok postal zelo nestalen
- 6) Ob porušenju je Benett opazil majhne bliske svetlobe tako na anodi kot na katodi /11/

Naštete ni bilo mogoče pojasniti z dotedanjimi idejami o trganju nečistoč ali kosov kovine iz katode s poljem, medtem ko je bila ideja o magnetnem samofokusiranju zelo ustrezna.

Willard Harrison Benett je bil rojen leta 1903 v Findleyju. Leta 1926 je končal univerzo v Wisconsinu. Med letoma 1928-1930 je delal na CalTech, nato pa do leta 1938 na univerzi Ohio. Med letoma 1946-1950 je raziskoval v Nacionalnem biroju standardov. Sledile so akademske službe: med letoma 1951-1961 je predaval na univerzi v Arkansasu, nato pa na univerzi v Severni Karolini. Odkril je "pinch"-efekt in razvil princip tandemskega pospeševalnika.

Benett je domneval, da curek nabitih delcev vodika tvori električni tok, ki lahko inducira svoje lastno magnetno polje. Ta potem tišči plazmo skupaj, tako da spravi posamezne ione k medsebojnim trkom. Čim močnejši in pogostejši so trki, torej čim večji je tlak in temperatura plina, tem večja je verjetnost, da bo prišlo do zlivanja jeder /12/.

4 Kinetika plazme

Lev Davidovič Landau (1936 in 1946) ter A.A.Vlasov (1938) sta raziskovala kinetiko plazme. Landau je odpravil Langmuirjevo in Tonksovo omejitev na ničelno temperaturo /13/. Pokazalo se je, da Langmuirjeva frekvenca ni edina frekvenca tlačnih vibracij, temveč le spodnja meja vibracijskih frekvenc, s katerimi je povezano najmanjše dušenje difuzijskega tipa. Spekter vibracij je urejen z disperzijskim zakonom, ki povezuje frekvenco in valovno število EM motnje. Kot dodatek spodnji limiti, ki jo daje Langmuirjeva frekvenca /14/, je Landau dobil tudi zgornjo mejo frekvenčnega spektra z enačenjem valovnih dolžin oscilacij z Debyevo dolžino, ki jo je Nizozemec Peter Debye (1884-1966) definiriral že leta 1912.

Landau je prvi pojasnil, da v razredčeni plazmi ni trkov, pride pa do dušenja valov. Elektroni se v plazmi gibljejo kaotično in imajo različne hitrosti. Med njimi so tudi takšni, ki se gibljejo skupaj z valovi plazme, saj imajo takšno hitrost, da ostanejo vseskozi v fronti valov. Ti elektroni se vseskozi nahajajo pod vplivom istega elek-

tričnega polja in se zato vsi enako pospešujejo in ustavljajo. Pojav so imenovali "dušenje Landaua". Vendar so bili raziskovalci desetletja prepričani, da dušenje Landaua ni praktično uporabno, saj je v vroči plazmi premalo hitrih elektronov, ki bi ustvarili dovolj toka glede na vloženo moč. Do spremembe je prišlo leta 1978 po teoretičnih raziskavah plazme v tokamak-u na MIT, tako da danes z dušenjem Landaua dodatno grejejo plazmo pri uravnavanju termojedrskih reakcij /15/.

5 Magnetohidrodinamika

Že André Marie Ampère (1775-1836) je raziskoval gibanje prevodne tekočine Hg v magnetnem polju. Delal je tudi poskuse z "moulinet électrique", kjer se je magnetna igla vrtela na gladini Hg. Vendar so bili zaradi nizke prevodnosti Hg hidromagnetni pojavi šibki in jih še celo stoletje niso opazili /16/.

Stefan je v svojih raziskavah transportnih pojavov v tekočinah uporabil enačbe hidrodinamike zvezne snovi pri problemih kinetične teorije plinov. S tem se je leta 1886 izognil določitvi sile med molekulami, katere odvisnosti od razdalje ni z gotovostjo poznal /17/. Pol stoletja pozneje je dovršena matematika klasične hidrodinamike ponovno pomagala fizikom iz zagate, ko je Alfvén leta 1942 pojasnil vrsto pojavov v kozmični plazmi z enačbami magnetohidrodinamike /18/. Objavil je njene osnovne domneve, idejo o zamrznjenosti magnetnega polja v plazmi in opisal magnetohidrodinamične valove kot novo vrsto valovnega gibanja prevodnega medija v magnetnem polju.

Šved **Hannes Olof Gösta Alfvén** se je rodil leta 1908. Študiral je v Uppsali. Med letoma 1937-1940 je delal v Nobelovem inštitutu fizike v Stockholmu, nato pa je predaval na univerzi prav tam. Kot Skandinavec je bil naravnost namenjen pojasnitvi severnega sija. Nadaljeval je raziskovanja Norvežanov Kristiana Birkelanda in Carla Störmerja s konca 19. in z začetka 20. stoletja, ki sta severni sij povezovala s "katodnimi žarki" po vzoru Aragovega opisa Davyjeve obločnice /19/. Alfvén je leta 1939 zasnoval teorijo magnetne nevihte in severnega sija, ki je temeljila na ideji "zamrznjenja" magnetnih polj v plazmi. Leta 1943 je razvil planetno kozmogonijo s Prasoncem, ki je med potovanjem skozi galaktično meglico povzročilo ionizacijo v njenem plinu. Ioni naj bi se nato po spiralah gibali okoli silnic magnetnega polja Sonca in se kasneje zgoščili v planete. Tako je Alfvén zasnoval novo vedo, imenovano kozmična elektrodinamika, ki pa je potrebovala dolga leta do priznanja, tako da je moral svoje razprave sprva objavljati v drugorazrednih revijah. Leta 1970 je dobil polovico Nobelove nagrade za fiziko.

Da bi lahko opisali najenostavnejše vedenje plazme, je bilo treba uporabiti klasično transportno teorijo Boltzmannova s konca 19. stoletja. Dotedanje teorije prevodnosti so bile razvite le za delno ioniziran plin, zato so bile le približne za popolnoma ioniziran plin iz nabitih delcev v plazmi. Po koncu 2. svetovne vojne se je Spitzer vrnil na Yale in prav s tem problemom nadaljeval svoja raziskovanja medzvezdne snovi iz obdobja pred vojno. Zaradi pomanjkanja eksperimentalnih rezultatov se je Spitzerju še po prehodu na



Slika 2: Hannes Olof Gösta Alfvén (B.M. Ševarli)

univerzitetni observatorij v Princetonu razvijanje poglobljene teorije zdelo jalovo. Leta 1948 se je med Alfvénovim obiskom v ZDA seznanil s temeljni magnetohidrodinamike, ki jo je v naslednjih letih tudi sam razvijal. Leta 1950 je s sodelavci izračunal termično in električno prevodnost popolnoma ioniziranega plina z upoštevanjem vpliva posameznih elektronov na porazdelitev hitrosti kot difuzije v hitrostnem prostoru. Tri leta pozneje so objavili natančnejšo teorijo, predvsem za potrebe astrofizike /20/. Zgodaj je spoznal pomembnost določitve toplotne in električne "Spitzerjeve" prevodnosti ter mehanskih transportnih koeficientov v povsem ioniziranem plinu. Spitzerjevo pionirsko raziskovanje fizike plazme je kronala monografija "Physics of Fully Ionised Gases" leta 1956, ki so jo ponatisnili 6 let pozneje.



Slika 3: Lyman Spitzer z ameriškim astronomom in direktorjem univerze Princeton Henryjem Norrisom Russelom (1877-1957), ki je leta 1929 spektroskopsko dokazal, da je Sonce večinoma sestavljeno iz vodika

Lyman Spitzer je bil rojen leta 1914 v Toledu, Ohio. Po diplomu na Yale leta 1935 je med letoma 1935-1936 študiral na koledžu St. John's v Cambridgu, kjer je bil njegov mentor Eddington. Spitzer ga je občudoval, čeprav je bil nad osebnimi stiki z njim razočaran /21/. Študij je končal med letoma 1936-1938 pri Russelu v Princetonu in nato poučeval na univerzah Harvard, Yale in Kolumbija. Leta 1947 je nasledil Russela kot profesor astronomije in direktor observatorija v Princetonu, ki ga je vodil četrto stoletja do leta 1979. Leta 1985 je dobil Crafoordovo nagrado švedske kraljevske akademije znanosti, ki je na ravni Nobelove nagrade za tista področja, ki jih ta ne pokriva. Spitzerjeva dela pokrivajo štiri velika področja: medzvezdno snov, zvezdno dinamiko, astronomijo in fiziko plazme, ki jo je raziskoval do leta 1966.

Američan Rosenbluth in sodelavci z Radiacijskega laboratorija Kalifornijske univerze v Berkeleyju so Boltzmannovo transportno enačbo po Chandrasekharjevi ideji iz leta 1943 razvili za opis trkov dveh teles z izotropno porazdelitveno funkcijo v prostoru in v hitrostnem prostoru. Pri tem so uporabili enostavno konservativno osno simetrično enačbo Fokker-Plancka za Newtonovo silo, ki pada obratno sorazmerno s kvadratom razdalje, in dobili Chandrasekharjev in Spitzerjev način kot posebna primera. Pri numeričnem reševanju Fokker-Planckove enačbe so že 31.8.1956 predložili uporabo računalnika /22/.

Postopek je bilo mogoče izpeljati dovolj korektno v limiti nizekotlačne plazme, kjer je povprečna prosta pot dolga v primerjavi z Debyejevo dolžino. Drugače povedano, potencialna energija med delci je veliko manjša od produkta med Boltzmannovo konstanto in temperaturo. Podaljšanje do limite močnih interakcij pa je zahtevalo bolj zapleteno statistično mehaniko /23/.

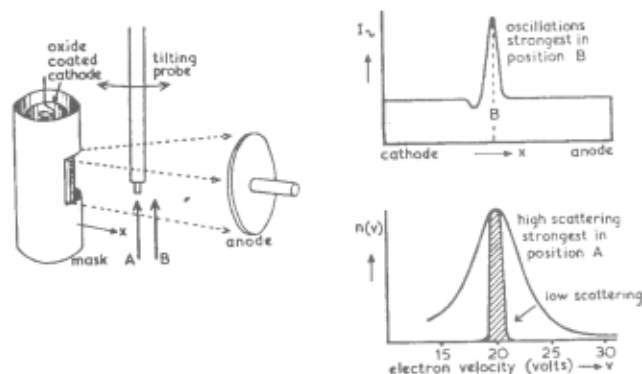
6 Nadaljevalci Langmuirjevega raziskovanja nihanja v plazmi

Nihanja plazme niso omogočila posebne praktične uporabe, razen "plazemskega oscilatorja", ki ga je opisal G. Wehner leta 1950. Preučevanje nastanka nihanja pa ima velik znanstveni pomen /24/.

Leta 1952 je Denis Gabor (1900-1979) izračunal hitrost izmenjave energije med posameznimi elektroni in celotnim spektrom oscilacij plazme v razelektrivni ob domnevi o ekvipartitiji energije med različnimi načini nihanja plazme /25/. Dobil je premajhen prenos energij, da bi lahko pojasnili pojave, zaradi katerih je bil koncept nihanja plazme sploh vpeljan. Izkazalo se je, da spremenjena teorija pojasni mnogo manj od prvotne Langmuirjeve.

Zato se je Gabor vrnil k prvotni domnevi o obstoju močnih koherentnih, skoraj enotnih frekvenčnih nihanj znotraj razelektrivne. Domnevo so Gabor, E.A. Ash in D. Dracot leta 1955 preverili s pošiljanjem curka elektronov skozi razelektritev na fluorescenčni zaslon /26/. Ugotovili so, da obstajajo presenetljivo visoka nihanja amplitude v mejni plasti, ki loči plazmo od izolirane stene. Takšnih nihanj ni v sami plazmi. Zato je bilo treba upoštevati vpliv mejne plasti na nihanje. To sta David Joseph Bohm (rojen 1917) in E.P. Gross že leta 1949 na Princetonu vključila v svojo teorijo /27/, ki je dopolnila starejše domneve Vlasova /28/.

Ena izmed napovedi Bohmove in Grossove teorije je bila, da nihanje povzroči curek elektronov, poslan skozi homogeno plazmo. Njuno domnevo so potrjevali deset let starejši poskusi H.J. Merilla in H.W. Webba /29/, ki sta z izboljšano tehniko lokalizirala nihanja v plazmi in določila zvezo med nihanjem in močnim sipanjem, kar se Langmuiru in Tonksu leta 1929 ni posrečilo. Rezultate Merilla in Webba je analiziral R.Q. Twis leta 1951. Vendar sovpadanje med poskusi in teorijo ni bilo nesporno, saj je v Merillovi in Webbovi meritvi elektronski curek prišel v plazmo skozi curek ionov. Da bi obšla dvome, sta D.H. Looney in S.C. Brown med letoma 1952-1954 eksperimentirala brez curka ionov. Nista dobila nihanj v plazmi, kar se je zdelo nasprotno teoriji Bohma in Grossa. Zato so sistematično analizirali in interpretirali disperzijske zakone, med drugim J.E. Drummond in D.B. Chang leta 1958, ki sta pokazala, da Bohmov in Grossov zakon sipanja napoveduje bolj ojačenje kot nihanje. Do enakih sklepov je že pred njima leta 1944 prišel John Robinson Pierce (rojen 1910) z drugačnimi metodami. Looney in Brown verjetno nista opazila ojačenj zaradi izgub v merilnem sistemu. V podobno zastavljenem poskusu je R. Demirkanov dobil močno interakcijo med moduliranim curkom in plazmo. Sturrock je pokazal, da je bil premer curka elektronov v poskusu Looneya in Browna veliko manjši, kot bi bila valovna dolžina v plazmi, in tako ni bilo zadoščeno pogoju Bohma in Grossa o neskončno ozkem curku. Teorijo o disperziji valov in o končnem curku v plazmi je objavil G.J. Budker leta 1956 pri CERN-u.



Slika 13: Poskusi Merilla in Webba z lokalizacijo nihanja v plazmi leta 1939

Osnovni problem fizike plazme je bila interakcija posameznih elektronov z drugimi v ioniziranem plinu. D. Bohm in P. Pines sta leta 1951 in 1952 pokazala, da lastnosti vplivajo na nihanja plazme /30/. Ta osrednji problem raziskovanja plazme pokriva tudi "pobegle" elektrone v termojedrskih napravah, kjer hitri elektroni močno reagirajo s plazmo in povzročajo visokofrekvenčne nestabilnosti: ojačenja ali nihanja.

Če je prvi problem fizike plazme interakcija oscilacij plazme s posameznimi elektroni, je drugi problem interakcija nihanja plazme s poljem EM sevanja. Ta drugi problem je skoraj prav tako star kot prvi. Nihanja plazme so predpostavili za pojasnitev nepravilnosti, povezanih z vedenjem elektronov v obločnicah. Obstoj teh nihanj je podprlo odkritje radijskih valov približno ustrezne frekvence, ki jih oddajajo obločnice. Vendar je teorija nihanja pokazala, da so ta valovanja longitu-

dinalna, torej brez sevanja. Tonks in Langmuir sta sicer predpostavila obstoj transversalnih valov v plazmi, vendar ti načini širjenja niso bili speti z drugimi načini nihanja plazme. Zato je bilo nujno upoštevati vpliv robov ali nehomogenosti, ki združijo oba tipa valov v teorijah N.G. Danisova (1954), G.B. Ferde (1956) in V.V. Zhelezmakova (1956). Drugi važni način sklapljanja energij nihanja plazme s sevalnim poljem omogoča nastanek statičnega magnetnega polja v plazmi.

7 Plazma v ionosferi: magnetohidrodinamika poveže raziskovanje plazme v astrofiziki in jedrski fiziki

Magnetohidrodinamika ali, bolje, magnetofluidodinamika obravnava gibanje prevodnih tekočin v magnetnih poljih in tako združuje elektrodinamiko in hidrodinamiko. Astrofiziki so se z magnetohidrodinamiko ukvarjali že od začetka fizike radiofrekvenčne plazme. Raziskovali so "hidrodinamiko Sonca" ter vir magnetnih polj Zemlje in Sonca.

Plazma sestavlja 90% vse snovi v zvezdah in med njimi, na Zemlji pa je redka. Strelo in iskro pri navadnem tlaku so dobro pojasnili šele sredi 20. stoletja. Prevajanje elektrike skozi razredčene pline, ki se v visokih delih atmosfere kaže kot severni sij, so začeli intenzivno raziskovati v drugi polovici 19. stoletja /31/.

Že Newton je določil višino severnega sija med 33 in 281 angleških milj. Večina raziskovalcev je soglašala, da severni sij povzročajo dvigajoči se električni naboji, vendar so ponujali različne modele. Severni sij je vzbujal zanimanje tudi med Slovenci, čeprav je bil na naših zemljepisnih širinah viden bolj redko, konec preteklega stoletja 24. in 25.10.1870 ter 14.2.1892 /32/.

Faraday je leta 1850 obravnaval odvisnost severnega sija od magnetnih lastnosti atmosfere in objavil veliko meritev svojih sodelavcev /33/. "Magnetna sestava kisika in magnetno stanje atmosfere" ter njene letne in dnevne spremembe so se Faradayju zdele posebno pomembne. Čeprav majhne, naj bi gotovo vplivale tudi na magnetizem Zemlje, kot je sočasno leta 1850 domneval tudi A.E. Becquerel (1820-1891) v Parizu /34/.

Vpliv atmosferskih nabojev na kazalec kompasa je še posebno zanimala britanske pomorščake viktorijanske dobe, zato so njihovi rojaki razvili Faradayjeve ideje. V času burnih razprav o Crookesovem 4. agregatnem stanju je Stewart leta 1878 in 1882 objavil, da vodoravni električni tokovi visoko v atmosferi povzročajo dnevne spremembe smeri in jakosti magnetnega polja Zemlje reda 10^{-8} T. Podobno domnevo je leta 1887 objavil njegov nekdanji študent Schuster, vendar se je ideja v tistem času zdela pretirana. Veliko problemov še ni bilo pravilno zastavljenih, tako da se je leta 1888 med nemškimi raziskovalci vnela razprava o tem, ali je atmosferski zrak sploh lahko statično naelektrjen /35/.

Zanimanje za Stewartove električne naboje v ozračju je naraslo po 12.12.1901, ko se je Guglielmu Marconiju (1874-1937) in sodelavcem posrečilo poslati radijski signal iz Cornwalla v Angliji v Newfoundland v Ameriki. Večina raziskovalcev je po Ircu Georgu Francisu FitzGerald (1851-1901) menila, da uklon valov ob okroglini Zemlje omogoča širjenje čez Atlantik. To ni bila edina možnost, saj sta že leta 1902 dva angleška

inženirja z matematično žilico pojasnila Marconijev uspeh s staro Stewartovo hipotezo. To sta bila v Bombayju rojeni Anglež Arthur Edwin Kennelly (1861-1939) v ZDA in nekaj mesecev pozneje junija 1902 neodvisno njegov rojak Oliver Heaviside (1850-1925) /36/. Kennelly je bil sprva telegrafist, podobno kot Edison, in je med letoma 1877-1894 delal kot njegov asistent, a se je pozneje osamosvojil kot inženir svetovalec.

Škot Balfour Stewart (1828-1887) se je po študiju v Dundeeju in Edinburghu zaposlil na observatoriju Kew. Leta 1858 je pri RS v Edinburghu, leto dni pred Gustavom Robertom Kirchhoffom (1824-1887), objavil poskuse s toplotnim sevanjem in absorpcijo na steklu in sljudi. Ugotovil je, da je "za vse vrste toplotnih žarkov absorpcija plošče enaka njenemu sevanju". Leta 1859 je postal direktor v Kewu. Pri astronomskih raziskovanjih je sodeloval z Angležem Warrenom De la Ruejem (1815-1889). Leta 1870 je odšel na Owens College v Manchesteru, kjer je med drugimi poučeval tudi Nemca Arthurja Schusterja (1851-1934) in J.J. Thomsona (1856-1940). Schuster je leta 1873 doktoriral pri Kirchhoffu in Bunsenu v Heidelbergu, leta 1875 je dobil britansko državljanstvo in pozneje prevzel Stewartovo katedro v Manchesteru.

Heaviside je zapisal junija 1902 v kratki opombi ob prispevku o "teoriji električne telegrafije" za Britansko enciklopedijo: "Nekaj podobnega nastane pri "telegrafiji brez vodnikov". Morska voda, čeprav prozorna za vidno svetlobo, je povsem dovolj prevodna, da prevaja Hertzove valove. Prevodna je tudi Zemlja, čeprav slabo. Zato Hertzovi valovi sledijo prevodnejši površini morja. Brez dvoma nepravilnosti ovirajo širjenje valov, vendar glavni valovi sledijo ukivljenosti Zemlje in ne prehajajo vanjo. Je pa tudi druga pot, saj morda obstaja dovolj prevodna plast v zgornjem delu atmosfere. Če to drži, bodo valovi, tako rekoč, bolj ali manj zajeti v tej plasti. Tako po eni strani valove prevaja morje, po drugi pa vrhnja plast atmosfere" /37/. Heaviside je tudi pravilno domneval, da je prevodnost plasti posledica ionizirajočega sevanja Sonca /38/.

Računi uklona radijskih valov v ozračju so bili dovolj zapleteni, da se je bilo težko odločiti med obema domnevama, dokler ni nizozemski radiofizik B. van der Paul dal prednost Heavisidu pred FitzGerald. Heavisidovo hipotezo so podrobneje razvili leta 1912 /39/. Ionosfero sestavlja nekaj Heaviside-Kennellyjevih plasti različne sestave in stopenj ionizacije, ki niso v stalni medsebojni legi. Njihovo število in medsebojna oddaljenost se med vrtenjem Zemlje spreminja z jakostjo ultravijoličnega sevanja.

Decembra 1924, poldrugi mesec pred Heavisidovo smrtjo, sta Heaviside-Kennellyjeve plasti prva izmerila Anglež Appleton s Cambridga in 19 let starejši Američan Samuel Jackson Barnett s Tehnološkega inštituta Carnegie, Washington.

Rezultate Barnettovih meritev odboja elektromagnetnih valov od ionosfere sta leta 1926 potrdila njegova naslednika na Tehnološkem inštitutu Carnegie Gregory Breit (rojen 1899) in dve leti mlajši Merle Anthony Tuve z oddelka za magnetizem Zemlje. Naziv ionosfera se je udomačil namesto "Heavisidovih plasti" po predlogu Škota Roberta Wattsona-Watta, rojenega leta 1892.

Edward Victor Appleton (1892-1965) je do leta 1913 študiral pri J.J.Thomsonu in Rutherfordu v Cambridgu. K izbiri raziskovalne usmeritve ga je gotovo usmeril vojni čas, ko je služil kot radijski oficir. Med letoma 1920-1924 je bil asistent demonstrator v Cambridgu, nato pa do leta 1936 profesor fizike na univerzi v Londonu. Po začetkih komercialnih radijskih postaj v Veliki Britaniji leta 1922 je imel možnost preučevati mnogo radijskih signalov. Leta 1924 je eksperimentalno razdalji med sprejemnikom in oddajnikom okoli 70 milj z različnimi valovnimi dolžinami. Ponoči je zaznal interferenco med direktnim valom in odbojem od Heaviside-Kennellyjeve plasti na višini okoli 90 km, po zori pa je pojav oslabil. Dve leti pozneje je Appleton opazil še nabitost plast, ki je podnevi odbijala valove z višine okoli 200 km in jo včasih imenujemo po njem. Leta 1927 je razvil magnetno-ionsko teorijo visokih plasti atmosfere. Tam ioni nastajajo pod vplivom sončne svetlobe in kozmičnih žarkov /40/ ter močno vplivajo na magnetno polje Zemlje. Leta 1947 so mu raziskovanja ionosfere prinesla Nobelovo nagrado za fiziko.

Leta 1926 je petintridesetletni Harold Jeffreys s Cambridgeja iz opazovanja potresov domneval, da je "kovinska sredica Zemlje v resnici kapljevina". Skozi sredico so namreč z zelo majhnim dušenjem prehajali longitudinalni valovi, transverzalni pa ne. Leta 1928 sta G. Angenheiser in J. Bartles pokazala, da večina magnetnega polja Zemlje nastane zaradi električnih polj, ki segajo skozi sredico Zemlje. Vendar so raziskovanja z raketami in sateliti v začetku šestdesetih let pokazala tudi vpliv tokov okoli Zemlje. Dva tokova so zaznali na območju magnetnega ekvatorja na višini okoli 100 km s tokom od zahoda proti vzhodu ter od severa proti jugu. Druge tokove pa so rakete križale na višini 22.000 km. Pasove naelektrjenih delcev kozmičnega izvira, ujetih v nehomogeno magnetno polje Zemlje, je skupina Jamesa Alfreda Van Allena z univerze Iowa, rojenega leta 1914, odkrila s sateliti Explorer I, III in IV, izstreljenimi januarja, marca in julija leta 1958 /41/. V zadnji četrtini stoletja jih intenzivno raziskujejo v zvezi s kozmičnimi poleti in izboljšavami radiokomunikacije.

Obnavna tokov skozi sredico Zemlje se je razvila v raziskovanje gibanja nestisljivega prevodnega polja v magnetnem polju, ki je postalo osnovni problem magnetohidrodinamike. J.Hartmann je 20.11.1931 opisal zanimivo interakcijo med povsem nepraktično astrofizikalno magnetohidrodinamiko in zelo praktičnimi problemi, kot je "vrtenje curka živega srebra". Druga praktična uporaba magnetohidrodinamike so bili "magnetni samo-fokusirajoči sistemi", ki jih je, kot smo že opisali, raziskoval Bennett leta 1934 in je danes temelj delovanja fuzijskih reaktorjev.

8 Sklep

Tako kot večina odkritij v fiziki 20. stoletja se je tudi fizika plazme razvila iz raziskovanja električne razelektritve v vakuumu. Kmalu se je pokazalo, da njena odkritja zadevajo predvsem snov v vesolju in je zato posebno zanimiva za astrofiziko, ki jih dotlej raziskovanje katodnih elektronov ni izrecno zanimalo. Tako se odkritja fizike plazme dotikajo samih temeljev spoznanj o svetu, ki nas obdaja. Z uporabo v reaktorjih na zlivanje jeder, ki jih bomo opisali v nadaljevanju, pa fizika plazme obeta praktično rešitev energijske krize in obenem zmanjšanje onesnaževanja okolja.

- 1 Johann Radakovits, Ionisierung der Gasé durch Galvanisch glühend Drähte, Wien. Ber. Ila 114 (11.9.1905) str.759-768; Nahrwold, Ueber die Elektrizitätsentwicklung an einen glühenden Platindrähte, Ann.Phys. 35 (1888) str.107-121; Höflechner, n.d., 1994, I, str.238
- 2 S. Šubic, Fotografiranje nevidnih stvari, Dom in Svet, 1896, str.187
- 3 Otto Glasser, Wilhelm Conrad Röntgen, Springer-Verlag, 1959, str.186
- 4 Versuche über die kathodische Ausfällung der Thoriuminduktion aus ihren salzsauren Lösungen, Wien. Ber. 118 (29.4.1909) str.363-371
- 5 Ann. Phys. 12 (1881) str.262
- 6 Sirk, Ein Druckgefälle im Glimmstrom bei Einwirkung eines transversalen Magnetfeldes, Wien. Ber. 122 (13.3.1913) str. 417
- 7 Puluj, prevod 1889; Wilson, 1987, str. 201
- 8 Marion, 1991, str. 285
- 9 Phys.Rev. 40 (1932) str. 416 in 1934, str. 896
- 10 Benett, Magnetically Self-Focussing Streams, Phys. Rev. 45 (1934) str. 890 in 896
- 11 Benett, n.d., str. 896-897
- 12 angleško: pinch
- 13 J.Phys. (U.S.S.R.) 10 (1946) 25
- 14 Langmuir in Tonks, Phys. Rev., 33 (1929) str. 198
- 15 Marija Bessarab, Stranice žizni Landau, Moskovskij raboti, 1971, str. 58-59; Phys.Today (marec 1992) str. 20
- 16 Ampère v razpravah, prebranih pred akademijo v Parizu 10.6.1822, 24.6.1822 in 16.9.1822. Ponatis v Collection des mémoires relatifs la physique publiés par la Societé française de physique, Tome II, Gauthier-Villars, Paris, 1885, str. 289, 291 in 330; Faraday, Experimental researches, n.d., 1952, 1581 in str. 810-811; Alfvén, n.d., 1963, str. 106-107
- 17 Bernard Pourprix in Robert Locqueneux, Josef Stefan (1835-1893) et les phénomènes de transport dans les fluides: la jonction entre l'Hydrodynamique continuiste et la théorie cinétique des gaz, Archives internationales d'histoire des sciences, 38 (1988) str. 110.
- 18 T.G. Cowling je predložil naziv Magnetohydrodynamics (Interscience publishers, New York, 1957), ki ga je sprejel tudi Spitzer (n.d., 1956, str.vi)
- 19 François Arago (1786-1853), 1820, ponatis v Collection, n.d., 1885, str.61; Alfvén, 1963, n.d., str. 18; Janez Strnad, Polarni sij, Proteus 56 (1993-1994) str. 51
- 20 Spitzer, n.d., 1997, str. 409; Spitzer in R. Härm, Transport Phenomena in a Completely Ionised Gas, Phys. Rev. 89 (1953) str. 977 in 981, ponatis s komentarjem v Spitzer, n.d., 1997, str. 434-443
- 21 Spitzer, n.d., 1997, str. 3 in 505
- 22 Marshall Nicolas Rosenbluth (rojen 1927), MacDonald in Judd, Fokker-Planck Equation for an Inverse-Square Force, Phys. Rev. 107 (1957) str. 1, 2 in 5. Rosenbluth je pozneje, leta 1965, vodil program fizike plazme na International Centre for Theoretical Physics v Trstu, po prvi odmevnejši dejavnosti ICTP, mednarodnem seminarju o fiziki plazme med 5. in 31.10.1964.
- 23 S. Ichimaru, S. Tanaka in H. Iyetomi, Screening Potential and Enhancement of the Thermonuclear Reaction Rate in Dense Plasmas, Phys. Rev. A 29 (1984) str. 2033-2035
H.Henry Stroke (urednik), The Physical Review. The First Hundred Years, American Institute of Physics Press, New York Maryland, Plasma physics str. 723
- 24 Gabor, n.d., 1950, str. 209
- 25 Proc. Roy. Soc. (London) A213 (1952) str. 73
- 26 Nature 176 (1955) str. 916
- 27 Phys. Rev. 75 (1949) str. 1851 in 1864; 79 (1950) str. 992
- 28 Gabor, n.d., 1951, str. 216
- 29 Phys. Rev. 55 (1939) str. 1191
- 30 Phys. Rev. 82 (1951) str. 625; Phys. Rev. 85 (1952) str. 338
- 31 F.M. Penning, Electrical discharges in gases, Philips technical library, 1957, str. 1
- 32 Josip Križan (1841-1924), Severni sij, Letopis SM, str. 360; Simon Šubic, Temelji vremenoznanstva, Zbornik SM, 1900, str. 70; Strnad, n.d., 1993-1994, str.51
- 33 Faraday, Experimental researches, n.d., 2796 (2.8.1850) in 2957 (14.9.1850)

- 34 Faraday, Experimental researches, n.d., 2442, 2847 in 2968 (14.9.1850); Hannes Alfvén in Carl-Gunne Fälthammar, Cosmical electrodynamics, Oxford University Press, 1963, str.207
- 35 R. Nahrwold, Ueber Luftelektricität, Ann. Phys. 31 (marec 1887) 448-474; Bemerkungen zu der Abhandlung des Hrn. F. Narr: "Über die Leitung der Elektricität durch Gase", Ann. Phys. 34 (1888) str.170-171; W. Giese, Ann. Phys. 37 (1889). Prevod v Abraham (ur.), n.d., 1905, str. 238
- 36 Podobno hipotezo je v patentnem spisu 24.6.1899 in v The Century Magazine junija 1900 opisal tudi Nikola Tesla (Slavko Bokšan, Nikola Tesla, Wien, 1932, str. 243 in 264; Nikola Tesla, Moji pronalasci, ŠK, Zagreb, 1981, str.75 in 97)
- 37 B.M. Bolomovskij, Oliver Heavyside, Moskva, Nauka, 1985, str.172 in 250-251
- 38 E.J. Hellund, The plasma state, Reinhold Publishing Company, New York,1961, str. 4
- 39 Bolomovskij, n.d., 1985, str. 176
- 40 Odkril jih je leta 1911 dunajski fizik Viktor Franz Hess (1883-1964) in za odkritje leta 1936 dobil Nobelovo nagrado
- 41 Allan A. Needell, Preparing for the space age: University-based research, 1946-1957, HSPS 18/1 (1987) str. 106

Poročilo predsednika o delovanju DVTS in o delu I.O. društva za obdobje med občinama zboroma 11.12. 97 in 17.12.98

V obdobju med občinama zboroma so bile aktivnosti DVTS naslednje:

- izdali smo štiri številke revije Vakuumist
- izvedli oz. soorganizirali smo naslednje konference:
 - 5. srečanje s hrvaškimi kolegi 20. maja v Zagrebu
 - 6. posvetovanje o materialih in tehnologijah, 3.-4. nov. v Portorožu.
 V tem okviru je bilo tudi naše 18. slovensko vakuumsko posvetovanje
- izdali smo knjigo "Netesnost sistemov in naprav"
- januarja je bilo naše društvo vpisano v register RS - Upravna enota Ljubljana pod št. 836
- jeseni je DVTS pridobilo status ustanove, ki deluje v javnem interesu na področju znanosti in tehnologije
- izvedli smo tečaj iz retorike za naše člane, ker se zavedamo, da je za skupno dobro pomembno poleg stroke obvladati tudi govorne sposobnosti. Udeležilo se ga je 19 naših članov
- izdelana in urejevana je bila domača stran DVTS na internetu
- oddani so bili podatki o DVTS za domačo stran Mednarodne zveze za vakuumsko znanost, tehniko in uporabo (IUVSTA)
- popolnili smo seznam naslovov članstva DVTS s podrobnejšimi podatki (elektr. pošta)
- organizirali smo dva tečaja (tečaj za vzdrževalce v Trati-Danfoss, Ljubljana Stegne (14 udel.) in standardni tečaj Osnove vakuumske tehnike na IEVT (11 udel.))
- naši člani so aktivno sodelovali na večih znanstvenih konferencah v tujini
- nadaljevali smo sodelovanje z IUVSTA (v mednarodni zvezi je naša predstavnik M. Jenko aktivno delovala predvsem v odboru za napredek vak. tehnike v manj razvitih deželah)
- organizirali smo strokovno ekskurzijo v Bazovico pri Trstu, kjer smo si ogledali sinhrotron.

Še nekaj misli o naših prizadevanjih in smernicah za naprej. Zelo pomembna izkaznica za našo stroko v slovenski znanstveno-tehniški sferi je revija Vakuumist, ki povezuje naša strokovna področja in nas razveseli vsake 3 mesece. V podporo nam zelo prav prideta dotaciji MZT in MŠŠ, s katerima pa le delno pokrivamo stroške izdajanja. V bodoče želimo njen nivo še dvigniti. Zaželeno je, da bi aktivnejše sodelovalo več strokovnjakov pri pisanju člankov za promocijo vakuumske znanosti in tehnike.

Zaželena je vsaka pobuda ali predlog, ki bi pripomogel k nadaljnjemu razvoju naše panoge in k dvigu splošnega ali specialnega vakuumskega znanja v Sloveniji.

Da čas teče neusmiljeno nas občasno spomnijo tudi smrti bivših sodelavcev - v letošnjem letu: dr. Franceta Laha in Lojzeta Viranta. Število tečajev je v zadnjih letih zelo padlo, in za DVTS skoraj ni več dotoka sredstev iz tega naslova, kar je bilo še običajno pred 10-15 leti. Zato smo se usmerili na pridobivanje reklam in sponzorjev. Tudi tu so ideje in napotki zaželeni, saj je jasno, da na obseg dejavnosti lahko finance bistveno vplivajo.

In kakšni so načrti? Na sejah IO si stalno postavljamo najrazličnejše cilje v smislu izboljšanja naše dejavnosti in seveda tudi preverjamo, kaj še ni izvršeno. Tako ni težave sestaviti načrta za naslednje obdobje.

V letu 1999 poteka 40 let od ustanovitve našega društva. Bilo bi prav, da bi se vsi potrudili, da bi ta jubilej dostojno proslavili.

Za leto 1999 predlagamo naslednji načrt dejavnosti DVTS (na občnem zboru 17.12.98)

- izdali bomo štiri številke Vakuumista
- organizirali bomo naslednje tečaje (vsakega bomo razpisali 2-krat letno):
 - osnove vakuumske tehnike (OVT)
 - OVT za vzdrževalce
 - OVT za srednješolske predavatelje
 - netesnost sistemov in naprav
- izvedli bomo posebne tečaje v delovnih organizacijah
- pripravili bomo nove tečaje (npr.: o postopkih za analizo površin, o čistoči površin, čistih prostorih, tehnologijah in vakuumski higieni, o konstruiranju vakuumskih sistemov)
- natisnili bomo novo knjigo "Osnove vakuumske tehnike"
- zbrali material za učbenik o tankih plasteh
- sodelovali v organizaciji IUVSTA
- sodelovali z vakuumskimi društvi sosednjih držav
- nadaljevali urejanje laboratorija za vaje
- proslavili 40. obletnico ustanovitve DVTS
- organizirali 19. slovensko vakuumsko posvetovanje jeseni 1999 v Portorožu (v okviru 7. posvetovanja o materialih in tehnologijah, podobno kot v preteklih letih)
- organizirali 6. slovensko-hrvaško srečanje (verjetno združeno s konferenco v Portorožu)
- podpirali udeležbo članstva še na drugih konferencah
- organizirali strokovno ekskurzijo (možne ekskurzije so: Tungsram Madžarska, MG-Ruše, ACRONI-Jesenice, NE Krško, Bush-ZRN itd.)
- organizirali vsaj eno poljudno strokovno javno predavanje
- nadaljevali stike s fakultetami (ERI v Mariboru ter NFT, strojna in elektro fakulteta v Ljubljani)
- izdali prospekt in nov plakat oz. pano o društvu
- pripravili in sprejeli pravilnike o:
 - Kanskyjevi nagradi za mlade raziskovalce
 - uredniškem odboru Vakuumista in drugih publikacij
 - častnih in zaslužnih članih
- podpora aktivnostim za standardizacijo in ustanovitvi nacionalnega merilnega laboratorija za nizke tlake
- prizadevali si bomo pridobiti nove sponzorje in oglaševalce v Vakuumistu
- razširili zamenjavo Vakuumista za druge revije
- pritegnili mlajše in nove sodelavce v aktivnosti DVTS
- sodelovali pri pripravi razstave o zgodovini vakuumske tehnike, skupaj s Tehničnim muzejem Slovenije.

Na koncu se zahvaljujem za trud in sodelovanje vsem članom IO, pa tudi drugim, ki niso pomišljali spoprijeti se s pogosto suhoparnimi opravili in so za naše akcije žrtvovali marsikatero svojo prosto uro.

mag. Andrej Pregelj, predsednik DVTS