

2. ISTRAŽIVANJA OBLIKA SPEKTRALNIH LINIJA U JUGOSLAVIJI 1962–1985

S obzirom da se informacije o kosmosu van Sunčevog sistema dobijaju analizom zračenja, proučavanje i analiza astrofizičkih spektara ima veliki značaj. Istraživanje spektralnih linija je od važnosti za istraživačke programe specijalnih laboratorija i institucija osnovanih sa ciljem da obezbede osnovne fizičke podatke astronomima, kao na primer JILA (Joint Institute for Laboratory Astrophysics) u Boulderu. Proučavanje oblika spektralnih linija je takođe predmet rada komisije 14 za fundamentalne spektroskopske podatke, Međunarodne astronomske unije.

Tipični problemi za koje je važno proučavanje oblika linija mogu se podeliti na sledeće kategorije:

- 1) kvantitativno i kvalitativno proučavanje spektra iz laboratorijske i astrofizičke plazme;
- 2) dijagnostika laboratorijske i astrofizičke plazme;
- 3) istraživanja vezana za termonuklearnu fuziju i laserski proizvedenu plazmu;
- 4) određivanje zastupljenosti pojedinih elemenata u zvezdanim atmosferama na osnovu profila apsorpcionih linija;
- 5) ispitivanje profila rekombinacionih radiolinija u oblastima jonizovanog vodonika kao što je maglina u Orionu;
- 6) proučavanje transfera zračenja kroz stelarnu i laboratorijsku plazmu.

Prilikom analize zvezdanih spektara, podaci o obliku spektralnih linija ulaze u osnovnom na dva načina:

a) Izabrane linije pomoću kojih se mogu dobiti podaci o nekim pojavama i parametrima zvezdanih atmosfera, zahtevaju detaljnu analizu i pouzdanu teoriju oblika spektralnih linija.

b) Za veliki broj linija (10^6), kao i za manje doprinose glavnom mehanizmu širenja linija, dovoljno je poznavati parametre širenja sa manjom tačnošću. Oblici takvih linija zajednički određuju totalni koeficijent apsorpcije, i potrebno je samo poznavanje parametara širenja sa dobrom srednjom tačnošću, dok tačnost pojedinog podatka nije toliko važna.

Za proučavanje zvezdanih spektara potrebno je poznavanje atomskih parametara i parametara širenja spektralnih linija za izuzetno veliki broj prelaza u spektrima različitih atoma i jonizacionih stanja. S obzirom da hemijski sastav zvezdane atmosfere nije poznat a priori, teško je unapred reći koji su nam sve podaci potrebni, a postoji mnogo interesantnih grupa zvezda čiji hemijski sastav znatno odstupa od Sunčevog.

Interes za podatke o oblicima spektralnih linija stimulisan je takođe razvojem kosmičkih istraživanja. Koristeći kosmičku spektroskopiju, prikupljena je i prikuplja se velika količina spektroskopskih informacija u širokom spektralnom području, za kosmičke objekte različite vrste, što posebno podstiče istraživanja oblika spektralnih linija

*

Od prvog članka u ovoj oblasti (1), 68 jugoslovenskih naučnika je objavilo 371 rad o istraživanju oblika spektralnih linija, u periodu do avgusta 1985. godine. Broj publikacija, autora, diplomskih radova, magistarskih i doktorskih disertacija po godini dat je u Tabeli 1. Treba naglasiti da je od 371 objavljenih radova, 113 u međunarodnim časopisima kojih su 15 u *Astronomy and Astrophysics* a 1 u *Astrophysical Journal*. U

razmatranom periodu odbranjeno je 9 doktorskih i 15 magistarskih teza kao i 11 diplomskih radova.

U objavljenim radovima razmatrani su različiti problemi iz ove oblasti. Proučavanje Štarkovog širenja linija vodonika i vodoniku sličnih emitera ima veliki praktični značaj i kod nas je ovom problemu posvećena odgovarajuća pažnja (1, 4, 6, 71, 73, 78, 79, 86, 98, 110, 123, 128, 129, 142, 143, 151, 152, 154, 179, 216). Naši istraživači su eksperimentalno određivali profile Balmerovih linija (1, 4, 73, 151, 152), istraživali širenje na krilima D_{β} linije (6) kao i pomak linija neutralnog vodonika i jonizovanog helijuma (129, 154), pri čemu je naročita pažnja posvećena ispitivanju uticaja dinamike jona na pomak linija neutralnog vodonika (154). Takođe su izvedena i izračunavanja profila vodonikovih linija (143), kao i ispitivanje uticaja povratne sprege atoma vodonika koji zrači i perturbujućeg elektrona, na daleka krila vodonikovih linija (110, 123). Vršena su i istraživanja vodonikovog spektra kod granice jonizacije (86, 142, 216).

Ispitivan je takođe uticaj tipičnog hladnijeg graničnog sloja kod vodonične plazme u T cevi, na profile spektralnih linija (78, 79, 98, 179). Rezultati pokazuju da su širine linija veće kada se razmatrani efekat uzme u obzir, kao i da uticaj ovog efekta raste sa povećanjem temperature kao i sa udaljavanjem od centra linije.

Do danas je u svetu i kod nas izvršen obiman eksperimentalni posao na istraživanju Štarkovog širenja linija nevodoničnih emitera, u laboratorijskim plazmama gustine $2 \times 10^{13} - 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ i temperature $2 \times 10^3 - 6 \times 10^4 \text{ K}$. Na slikama 1—4 data je analiza postojanja pouzdanih eksperimentalnih podataka u ovoj oblasti prema kritičkoj analizi Konjevića i dr. (91, 92, 310, 311) (Radovi objavljeni do sredine 1982), kao i doprinos naših istraživača. Na šematskim prikazima dela periodnog sistema, naznačeni su samo oni nevodonični atomi i joni, za koje postoje pouzdani eksperimentalni podaci za Štarkove parametre najintenzivnijih linija. Na tačkastoj podlozi dati su elementi za koje su merenja izvršili samo inostrani istraživači dok je pola podloge šrafirano ako postoje podaci i naših autora. Na šrafiranoj podlozi dati su elementi za koje su svi rezultati dobijeni od naših istraživača. Na ovim slikama se vidi, da su Štarkovi parametri naročito dobro poznati kod lakših elemenata. Takođe se vidi da broj dostupnih podataka opada sa porastom stepena jonizacije, te kod atoma koji su jonizovani 4 i više puta, pouzdani eksperimentalni podaci za nevodonične slučajeve u vremenu objavljivanja preglednih članaka (310, 311) nisu postojali.

Eksperimentalni rad naših istraživača na određivanju štarkovih parametara nevodoničnih spektralnih linija do sredine 1985. godine, sumarno je prikazan u Tabeli 2. Od 1962. godine pa do avgusta 1985. godine, izvršen je obiman posao u toku koga su izmerene Štarkove širine 360 linija, za 38 elemenata odnosno 58 različitih vrsta emitera ako uzmemo u obzir i jonizaciona stanja. Izmereni su takođe i Štarkovi pomaci 187 linija za 31 element odnosno 33 različitih emitera, pri čemu je razrađena i nova eksperimentalna tehnika za merenje Štarkovih pomaka (44). Rezultati do kojih se došlo u eksperimentalnom ispitivanju Štarkovih parametara nevodoničnih emitera saopšteni su naučnoj javnosti u 98 radova.

Teorijska istraživanja vezana za problematiku Štarkovog širenja nevodoničnih elemenata odvijala su se u više pravaca. U okviru semiempirijskog prilaza problemu, vršena su ispitivanja primenljivosti postojeće teorije (14, 15, 27, 127, 150, 166, 167, 169) a formulisani su i novi prilazi (166, 167, 169, 199, 278, 302, 341) specijalno pogodni za brza proračunavanja velikog broja linija. Naročiti uspehi pokazao je Modifikovani semiempirijski prilaz (200, 305, 342). Ovakva istraživanja vršena su i u okviru semiempirijskog prilaza (32, 67, 87, 88, 163, 167, 168, 230, 234, 241, 265, 268, 271, 272,

274, 277, 295, 299, 304, 306, 307, 343–348) pri čemu je izvršeno poboljšanje teorije za višestruko jonizovane atome (145, 150, 169) i izračunati parametri širenja za veliki broj linija HeI (234, 271, 272, 274, 299, 306, 307, 345, 346), NaI (343, 344), K I (347) i drugih elemenata. Posebna pažnja posvećena je linijama teških nevodoničnih neutrala u plazmi (232, 268, 297, 304). Takođe je započet rad na jednom novom kvantno mehaničkom prilazu širenja linija neutralnog helijuma (149) i izveden prvi potpuni kvantno mehanički proračun za parametre Štarkovog širenja nevodoničnog neutrala (196, 197). Naročito se intenzivno odvijao rad na istraživanju Štarkovog širenja kod višestruko jonizovanih emitera. U ovoj oblasti, većina eksperimentalnih (2, 54, 55, 59, 68, 70, 80–84, 94, 102, 116, 117, 135, 158, 205, 312) i teorijskih (68, 80, 102, 116, 117, 123, 135, 146, 150, 158, 163–167, 178, 194, 198, 201, 233) rezultata objavljenih u razmatranom vremenskom periodu dobijena je u našoj zemlji. Istražen je i uticaj odstupanja putanje perturbirana od pravolinijske, usled povratnog dejstva neutralnog emitera (88, 89, 110, 123–126, 147, 148, 300, 301) na Štarkovo širenje spektralnih linija. Rezultati su pokazali da uticaj efekta raste sa smanjenjem temperature i sa povećanjem polarizabilnosti atoma. Da bi se efekat uzeo u obzir, izvršene su odgovarajuće modifikacije u okviru semiklasične (123, 126) i adijabatske teorije (147).

U nekoliko radova istraživane su neizolovane linije helijuma sa zabranjenim komponentama u laserski proizvedenoj plazmi (224, 333, 334, 335, 364, 371), uticaj Debajevog ekraniranja (242, 308), uticaj različitih sudarnih procesa na širenje linija (231, 267) kao i doprinos rezonanci (autojonizacija) Štarkovom širenju (230, 266).

U velikom broju radova proučavane su regularnosti i sistematski trendovi kod Štarkovih parametara spektralnih linija (53, 69, 104, 105, 108, 109, 113, 137, 138, 145, 153, 155, 159, 160, 165, 170–172, 175, 183–186, 193, 204, 206, 212, 215, 225, 229, 241, 243–247, 253, 256, 264, 279, 280, 286, 289, 290, 307, 308, 312, 313, 326). Proučavane su sličnosti kod Štarkovih parametara linija u okviru istog multiplleta i grupe supermultiplleta. Takođe su proučavani i sistematski trendovi kod Štarkovih parametara za isti tip prelaza u okviru jednog homolognog kao i izoelektronskog niza i spektralnih serija a izučavana je i zavisnost parametara Štarkovog širenja od jonizacionog potencijala (184, 185, 186, 213, 303, 325, 339, 340) što je kao rezultat dalo proste formule od značaja za astrofizička proučavanja (339, 340, 353, 360, 361). Takođe je razmatrana i zavisnost Štarkovih parametara od rednog broja elemenata (183, 207, 214, 253).

Prilikom proučavanja oblika spektralnih linija, pažnja je posvećena i astronomskim problemima. Razmatran je uticaj rotacionih kretanja na profile spektralnih linija u Sunčevim prominencijama i spikulama (121, 122, 141), Štarkovo širenje teških jona na Suncu (195, 226), eksperimentalno merljive posledice anomalnog crvenog pomaka na oblik simetričnih spektralnih linija (93) i uticaj različitih mehanizama širenja spektralnih linija na Limb efekat na Suncu (332, 368–370).

Izuzetno se često pominje i koristi u inostranoj literaturi kritički pregled eksperimentalnih podataka za Štarkove parametre neutralnih (91, 310) i jonizovanih (92, 311) emitera. U ovim pregledima sistematizovani su i kritički procenjeni dostupni eksperimentalni podaci iz razmatrane oblasti, što je omogućilo njihovu širu primenu u nekim oblastima astronomije i fizike.

U Institutu za fiziku sveučilišta u Zagrebu, razvijen je složeni eksperimentalni uređaj sa apsorpcijskim kivetama i toplovodnim pećima (heat-pipe), kombinovanim sa tinjajućim pražnjenjem, za spektroskopska proučavanja u emisiji i apsorpciji (vidi sl. 9). Na njemu je u nizu radova istraživano rezonantno širenje u parama alkalnih metala (64,

65, 76, 96, 97, 100, 111, 115, 131, 157, 176, 181, 182, 191, 209, 211, 218, 261) i rezonantno širenje linije 377,6 nm talijuma (132, 133). Pri tome je posebno proučavana asimetrija linija glavne serije Cs (52, 60, 61, 66, 67, 99, 156) i Rb (156) i ispitivana su daleka krila linija, te određivani potencijal interakcije i Van der Valsova konstanta, pomoću glavne serije Cs (62, 63, 77, 130) i Rb (130). Takođe je istraživana pekulijarna asimetrija krila rezonantnih linija Li i Na (292).

U većem broju radova vršena su istraživanja uticaja nerezonantne interakcije emitera (apsorbera) sa neutralnim atomima na profil spektralne linije. Proučavana je Van der Valsova interakcija u pobuđenim alkalnim dimerima (356). Ispitivana su krila linija (i to posebno asimetrija) natrijuma proširenih sudarima sa Cs, Rb i K (328, 329), zatim krila linija neutralnog kalijuma, proširenih sudarima sa Cs (187, 188, 217) i Ar (250), potencijal interakcije između K i Ar (235, 236, 275) i uticaj K–Rb sudara na linije K u sudarnoj aproksimaciji (260, 291, 297).

Razmatrani su i interferentni i difuzni kontinuumi u Rb_2 spektru (285, 318, 354), triplet–tripletni prelazi u gustim parama litijuma (330), tripletni sateliti u spektru homonuklearnih molekula alkalija (316, 367), sateliti u linijama alkalnih metala (144, 190, 221, 319), difuzne trake u absorpcionim i emisionim spektrima Li, Li_2 , Na, Na_2 , K, K_2 , i Rb (251, 252, 283, 284, 316, 317, 320, 321, 322, 354, 357, 365) i tripletne satelitske trake u krilima spektralnih linija alkalija (177, 189, 192, 210, 219, 262, 263, 293, 294, 331). Osim toga izučavan je i uticaj sudarnih procesa na oblik linije, u vezi sa problemom redistribucije i prenosa zračenja (140, 161, 180, 298).

Uvid u doprinos jugoslovenskih istraživača može se postići i analizom Bibliografija o oblicima i pomacima atomskih linija u periodu od prvog rada u ovoj oblasti objavljenog 1889. pa do 1978. (Fuhr et al. 1972, 1974, 1975, 1978 – potpune reference su date posle uvoda u drugi deo). Među 16 naučnika koji su u ovom periodu zastupljeni sa najvećim brojem referenci, nalaze se i 4 jugoslovenska istraživanja (vidi Tabelu 3).