

Nastavno-naučnom veću
Matematičkog fakulteta
Univerziteta u Beogradu

Na 362. sednici Nastavno-naučnog veća Matematičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, održanoj 17. maja 2019. godine, imenovani smo za članove komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije „Uloga elektromagnetnih mikronestabilnosti u (re)formiranju kvaziparalelnih udarnih talasa i ubrzavanju čestica u kosmičkoj plazmi” kandidata Vladimira Zekovića. Na osnovu uvida u sadržaj disertacije podnosimo Nastavno-naučnom veću sledeći

IZVEŠTAJ

Biografski podaci kandidata

Vladimir Zeković rođen je 12. jula 1982. godine u Beogradu. Osnovnu školu i gimnaziju završio je u Beogradu. Školske 2001/02. godine upisao je osnovne strukovne studije na Višoj elektrotehničkoj školi, smer Elektronika i telekomunikacije, gde je diplomirao sa prosečnom ocenom 7.86. Školske 2007/08. godine upisao je osnovne akademske studije na Matematičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Astrofizika. Diplomirao je sa prosečnom ocenom 9.18 i u oktobru 2011. godine je na istom fakultetu upisao master akademske studije. Master rad sa temom „*Uticaj visokoenergetskih procesa na modulaciju MHD talasa tokom erupcija na Suncu*“ odbranio je 4. jula 2012. godine i time završio master akademske studije sa prosečnom ocenom 10.00. U novembru školske 2012/13. godine upisuje doktorske akademske studije na modulu Astronomija i astrofizika.

Radni odnos je zasnovao u novembru 2012. godine na Matematičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, u zvanju istraživač-pripravnik na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije „*Emisione magline: struktura i evolucija*“, pod rukovodstvom prof. dr Dejana Uroševića. U zvanje istraživač-saradnik prvi put je izabran u oktobru 2015. godine, a ponovo izabran u isto zvanje u januaru 2019. godine.

Naučno-istraživački rad kandidata

Naučno-istraživački rad kandidata se odvija u oblasti izučavanja fizike bezsudarnih udarnih talasa u kosmičkoj plazmi, primenjene na ostatke supernovih. Rad uključuje teorijsku analizu procesa nastanka i reformiranja udara i mehanizama ubrzavanja čestica, kao i numeričke kinetičke simulacije i simulacije kretanja probnih naelektrisanja u elektromagnetnom polju.

Teorijska analiza zasniva se na primeni linearne teorije pri rešavanju fluidnih jednačina višekomponentne plazme spregnutih sa Maksvelovim jednačinama elektromagnetnog polja.

Dobijene relacije disperzije koristi za analizu talasnih modova koji se mogu pobuditi i postati nestabilni pri sudaru dve hladne, jonsko-elektronske plazme uporedivih gustina koje se kreću kvaziparalelno u odnosu na linije sile pozadinskog magnetnog polja. Za ispitivanje interakcije plazme i nastalih nestabilnosti kandidat sprovodi nelinearnu analizu iterativnim rešavanjem diferencijalnih jednačina višekomponentnog fluida spregnutih sa Maksvelovim jednačinama. Pri tome koristi i metod za dobijanje približnog analitičkog rešenja složenih integrala, kalibrisanih tako da se slažu sa numerički dobijenim rešenjima. Primenom paralelizovanog autorskog koda *APS*, kandidat analizira kretanje čestica u polju nestabilnosti kako bi odredio tačnu ulogu svake komponente nestabilnosti koje stvaraju i reformiraju udar, kako u termalizaciji i predubrzanju, tako i u kasnijem ubrzanju jona i elektrona mehanizmom difuznog ubrzanja na udaru, do energija kosmičkog zračenja. Kao empirijsku potvrdu, kandidat koristi rezultate dobijene u kinetičkim simulacijama koje izvršava javno dostupnim paralelizovanim kodom *TRISTAN-MP*. Ovim simulacijama kandidat takođe dobija spektre čestica i njihovu evoluciju na osnovu kojih modeluje upliv jona i elektrona u proces difuznog ubrzanja. Oba tipa numeričkih simulacija, kandidat realizuje na klasterima *JASON* i *SUPERAST* Matematičkog fakulteta u Beogradu, kao i na superračunaru *PARADOX* Instituta za fiziku u Beogradu.

Kandidat je autor, odnosno koautor, 2 rada objavljena u međunarodnim naučnim časopisima sa recenzijom i 9 radova prikazanih na naučnim skupovima u zemlji i inostranstvu.

Bibliografija kandidata

A) Naučni radovi objavljeni u časopisima međunarodnog značaja, iz disertacije:

1. Vladimir Zeković, 2019: “Resonant micro-instabilities at quasi-parallel collisionless shocks: cause or consequence of shock (re)formation”, *Phys. Plasmas*, 26, 032106. (M22)
2. V. Zeković, B. Arbutina, A. Dobardžić, M. Z. Pavlović, 2013: “Relativistic Non-Thermal Bremsstrahlung Radiation”, *Int. J. Mod. Phys. A*, 28, 1350141. (M23)

B) Naučna saopštenja na konferencijama štampana u celini, iz disertacije:

1. Vladimir Zeković, Bojan Arbutina, 2018: “Resonant Particle Backscattering of a Shock Wave”, *Nucl. Part. Phys. Proc.*, 297-299, pp. 53-57 (Proceedings of the conference: Cosmic Ray Origin - Beyond the Standard Models, 18 - 24 September 2016, San Vito di Cadore, Italy; Eds. O. Tibolla, R. Blandford, S. Kaufmann, M. Persic, K. Mannheim, H. Voelk, A. De Angelis).

C) Naučna saopštenja na konferencijama štampana u izvodu, iz disertacije:

1. V. Zeković, B. Arbutina, 2020: “Quasi-parallel collisionless shocks: revealing the nature of cosmic particle accelerators”, *Book of abstracts, XIX Serbian Astronomical Conference*, p. 110, 13-17 October 2020, Belgrade, Serbia (ISBN 978-86-7589-146-8).

2. B. Arbutina, V. Zeković, 2020: “On the Distribution Function of Particles at Quasi-parallel Collisionless Shocks”, Book of abstracts, X Serbian – Bulgarian Astronomical Conference, 25-29 September 2020, Sokobanja, Serbia.
3. V. Zeković, B. Arbutina, 2019: “Quasi-parallel collisionless shock (re)formation and particle acceleration by (non)resonant micro-instabilities”, Book of abstracts, Conference Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar Death II, 3-8 June 2019, Chania, Greece.
4. B. Arbutina, V. Zeković, 2019: “Non-linear diffusive shock acceleration: A recipe for electron injection”, Book of abstracts, Conference Supernova Remnants: An Odyssey in Space after Stellar Death II, 3-8 June 2019, Chania, Greece.
5. V. Zeković, 2018: “Non-linear Resonant Wave-plasma Interactions at Collisionless Shocks”, Book of abstracts, Vol. IX, Symposium Mathematics and Applications, p. 19, 30 November – 1 December 2018, Belgrade, Serbia (ISBN 978-86-7589-130-7).
6. V. Zeković, 2017: “Resonant Microinstability as a Trigger of Collisionless Shock Formation”, Book of abstracts, XVIII Serbian Astronomical Conference, p. 105, 17-21 October 2017, Belgrade, Serbia (ISBN 978-86-80019-85-7).

D) Ostala naučna saopštenja na konferencijama štampana u celini:

1. V. Zeković, S. Šegan, 2012: “Radio Interferometric Array – SCMA”, Publ. Astron. Obs. Belgrade, 91, pp. 61-67 (Proceedings of the XVI national conference of astronomers of Serbia, 10 – 12 October, 2011, Belgrade, Serbia; Eds. S. Jankov, N. Pejović and R. Pavlović).

E) Ostala naučna saopštenja na konferencijama štampana u izvodu:

1. M. Z. Pavlović, D. Urošević, B. Arbutina, A. Ćiprijanović, M. Vučetić, V. Zeković, D. Onić, 2016: “Radio Evolution of Supernova Remnants Including Non-Linear Particle Acceleration”, Book of abstracts, X Serbian – Bulgarian Astronomical Conference, 30 May - 3 June 2016, Belgrade, Serbia (ISBN 978-86-80019-73-4).

Kratak prikaz i struktura doktorske disertacije

Disertacija sadrži ukupno 88 stranica teksta i jednu stranicu sa biografijom autora. Isključujući Dodatak, disertacija sadrži 77 stranica teksta sa spisikom korišćene literature od 80 referenci, 43 slike i 1 tabelom. Struktura teksta je sledeća:

1. Uvod (1-4)
2. Besudarna plazma - teorija (5-30)

3. Udarni talasi u kosmičkoj plazmi (31-54)
4. Ubrzavanje čestica na kvaziparalelnim udarnim talasima (55-71)
5. Zaključak (72-75)
6. Literatura (76-77)
7. Dodatak (78-88)
8. Biografija (89)

U disertaciji je analizirana uloga elektromagnetnih mikronestabilnosti u (re)formiranju kvaziparalelnih bezsudarnih udarnih talasa u kosmičkoj plazmi i u procesima termalizacije, predubrzavanja i upliva čestica u mehanizam difuznog ubrzavanja na udarnom talasu. Obradi teme pristupljeno je teorijski i kroz numeričke simulacije. Disertacija je prirodno podeljena na tri celine: linearna i nelinearna teorija, kinetičke simulacije i primena na udarnim talasima, i ubrzavanje čestica. U disertaciji su najpre u uvodu ukratko predstavljeni osnovni fizički procesi koji dovode do nastanka udarnih talasa u kosmičkoj plazmi. Navedene su nestabilnosti koje nastaju u slučaju kvazinormalnih i slabo namagnetisanih kvaziparalelnih udara, kao i procesi predubrzavanja čestica na istim. U prvom delu disertacije, predstavljena je linearna teorija plazme u okviru koje su rešavane jednačine višekomponentnog fluida. Dobijena analitička rešenja kalibrisana su na osnovu rezultata simulacija kretanja probnih naelektrisanja u elektromagnetnom polju nestabilnosti. Time su određena svojstva rezonantne nestabilnosti koja biva pobuđena u sudaru dve hladne, jonsko-elektronske plazme uporedivih gustina, koje se kreću kvaziparalelno u odnosu na linije sile pozadinskog magnetnog polja. Zatim je iterativnim rešavanjem fluidnih jednačina višekomponentne plazme, spregnutih sa Maksvelovim jednačinama za elektromagnetno polje, dat model nelinearnog magnetoakustičkog solitona i predložen kao model reformiranja kvazinormalnih udara. U drugom delu disertacije, najpre su predstavljeni rezultati *PIC* (eng. *particle-in-cell*) simulacija kvazinormalnih udara, gde je model solitona primenjen na određivanje strukture udarnog talasa na skalama žiroradijusa jona i manjim. Objasnjena je povezanost procesa (re)formiranja i nelinearne solitonske strukture koja nastaje pri superalfenovskim tokovima plazme. Nakon toga, prikazani su rezultati *PIC* simulacija kvaziparalelnih udara u veoma ranim fazama nastanka, kada se talas pobuđen nestabilnošću još uvek može smatrati malom oscilacijom i modelovati linearnom teorijom. Objasnjena je veza kružno polarizovanih modova pobuđenih u oblasti sudara dve plazme u *PIC* simulaciji i rezonantnih modova dobijenih rešavanjem jednačina linearne teorije i pokazano njihovo slaganje. Izložen je model nastanka kvaziparalelnih udara, a zatim je u nelinearnoj fazi rasta talasa, kada dolazi do zaustavljanja tokova plazme, primenjeno nelinearno solitonsko rešenje dobijeno u prethodnom delu disertacije. Predstavljen je model (re)formiranja u slučaju kvaziparalelnih udara, čime je uspostavljena povezanost i određena uloga elektromagnetnih mikronestabilnosti u tom procesu. U trećem delu disertacije, predstavljena je analiza kretanja čestica plazme u polju nestabilnosti. Detaljno je analizirana uloga nestabilnosti ispred i na udaru, i predloženi su novi mehanizmi predubrzavanja jona i elektrona na kvaziparalelnim udarnim talasima. Takođe, *PIC* simulacijama je brojčano određen upliv jona i elektron, a dobijeni

rezultati su iskorišćeni u modelu nelinearnog difuznog ubrzavanja čestica na udaru, u okviru kojeg su dobijeni teorijskom spektri protona i elektrona, koji su potom upoređeni sa empirijskim spektrima dobijenim iz simulacija. U poslednjem odeljku ovog dela, termalna raspodela čestica modelovana je neravnotežnom κ -raspodelom i prikazana evolucija ove raspodele duž oblasti iza udara. U dodatku disertacije su dati detalji izvođenja jednačina linearne teorije. Na kraju disertacije dat je zaključak, pobrojani dobijeni rezultati i dati planovi za unapređenje teorijskih modela i implementaciju u simulacijama na astrofizičkim skalama.

Pregled važnijih naučnih rezultata disertacije

U ovoj disertaciji je predložen i detaljno objašnjen mehanizam nastanka kvaziparalelnih udarnih talasa. Rešavanjem jednačina linearne teorije dobijeno je da pri sudaru dve plazme uporedivih gustina nastaje rezonantna nestabilnost koja pobuđuje levo-kružno polarizovane plazmene talase koji se kreću duž linija sile pozadinskog magnetnog polja (Zeković 2019). Numeričkim simulacijama kretanja probnih naelektrisanja u polju nestabilnosti, pokazano je da ovi talasi usled jake rezonance mogu efikasno rasejavati jone i potpuno zaustaviti tok plazme (Zeković & Arbutina 2018). Iz uslova rezonance, dobijeno je da odnos gustina dve plazme koji odražava skok gustine dobijen na osnovu Rankin-Igonioovih uslova na udaru, prirodno proizlazi iz jednačina linearne teorije. Razmatranjem nelinearne interakcije tokova plazmi i elektromagnetnog polja, dobijen je model nelinearnog solitona. U rešavanju nelinearnih integro-diferencijalnih jednačina, primenjen je novi metod za dobijanje približnog analitičkog rešenja složenih integrala (Zeković et al. 2013). Metod je zasnovan na kombinovanju rešenja integraljenja aproksimativnih oblika podintegralne funkcije na osnovu teoreme o srednjoj vrednosti integrala i njihovim kombinovanjem radi dobijanja približnog analitičkog rešenja koje ima oblik podintegralne funkcije i sadrži sva relevantna svojstva tačnog rešenja duž celog opsega integraljenja. Dobijeno je da se model magnetoakustičnog solitona veoma dobro slaže sa profilima električnog i magnetnog polja, kao i izgledom faznih prostora čestica, dobijenim u *PIC* simulacijama normalnog i paralelnog udara. Time je pokazana univerzalnost predloženog teorijskog modela i njegov značaj u određivanju pojačanja električnog i magnetnog polja na udaru i dalje primene pri modelovanju procesa zagrevanja i ubrzavanja čestica, na udarima svih nagiba. Na osnovu rezultata numeričkih simulacija kretanja probnih čestica plazme i *PIC* simulacija, predložen je nov mehanizam predubrzavanja jona μ -*DSA* i objašnjeno na koji način mehanizam *SDA* u slučaju elektrona daje netermalni spektar oblika stepenog zakona i na najnižim impulsima koje su reda veličine termalnih ili tek nešto veći. Takođe, iz *PIC* simulacija su dobijeni parametri upliva jona i elektrona mehanizam difuznog ubrzavanja na udaru i na osnovu nelinearnog modela ubrzavanja, dobijeni teorijski spektri čestica za različite stepene modifikacije udara. Na kraju, pokazano je da κ -raspodela u celini dobro opisuje i termalni i suprathermalni deo spektra čestica, čime je dat nov način modelovanja spektra neravnotežne plazme koja nastaje usled procesa reformiranja udara. Dobijeno je da indeks κ raste sa udaljavanjem od udara, što ukazuje da plazma postaje ravnotežna u oblasti daleko od udara.

Zaključak i predlog komisije

Doktorska disertacija Vladimira Zekovića pod nazivom „*Uloga elektromagnetnih mikronestabilnosti u (re)formiranju kvaziparalelnih udarnih talasa i ubrzavanju čestica u kosmičkoj plazmi*“ celovito je naučno delo koje pregledno razmatra nekoliko tema vezanih za (re)formiranje udarnih talasa u kosmičkoj plazmi i ubrzavanje čestica, primarno kod kvaziparalelnih udara. Kandidat je stekao i demonstrirao visok nivo znanja i razumevanja teorije i numeričkih metoda, sposobnost kritičkog razmišljanja i izvođenja sopstvenih zaključaka, kao i sposobnost i samostalnost u teorijskom modelovanju i rešavanju praktičnih programerskih zadataka vezanih za numeričke simulacije udarnih talasa. Rezultati disertacije vezani za ulogu rezonantnih nestabilnosti i njihove nelinearne solitonske strukture u (re)formiranju udara i (pred)ubrzavanju čestica predstavljaju originalan naučni doprinos. Kandidat je dao nov model reformiranja udarnih talasa, kao i modele ubrzavanja jona i elektrona na kvaziparalelnim udarima, i napisao i paralelizovao vlastiti programski kod, te ova disertacija ima poseban značaj, kako za razvoj teorijske astrofizike, tako i za razvoj astrofizičkih numeričkih simulacija u našoj zemlji. Iz naučne oblasti kojom se bavi, kandidat je objavio, samostalno i kao prvi autor, dva rada u međunarodnim časopisima i imao je veći broj saopštenja na naučnim konferencijama.

Stoga, predlažemo Nastavno-naučnom veću Matematičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu da prihvati ovaj izveštaj i pozitivnu ocenu doktorske disertacije „*Uloga elektromagnetnih mikronestabilnosti u (re)formiranju kvaziparalelnih udarnih talasa i ubrzavanju čestica u kosmičkoj plazmi*“ kandidata Vladimira Zekovića i odredi komisiju za njenu odbranu.

U Beogradu, 16. novembra 2020. godine,

Komisija za pregled i ocenu:

prof. dr Bojan Arbutina,
vanredni profesor, mentor

prof. dr Dejan Urošević,
redovni profesor

prof. dr Anatoly Spitkovsky,
professor, Princeton University