

Univerzitet u Beogradu
Matematički fakultet

Master rad

**Brzina udarnog talasa u
neradijativnim i radijativnim
filamentima ostatka supernove
Petlja u Labudu**

Nikolina Milanović

Beograd, 2019.

Mentor:

dr Milica Vučetić

naučni saradnik, Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Članovi komisije:

doc. dr Dušan Onić

docent, Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu

prof. dr Dejan Urošević

redovni profesor, Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Zahvalnica

Autorka rada zahvaljuje se dr Milici Vučetić i doc. dr Dušanu Oniću, koji su ispratili celokupan tok ovog rada, aktivno ga usmeravali svojim savetima i pružali podršku tokom cele prethodne godine. Takođe im se zahvaljuje na prilici da poster sa rezultatima iz ovog rada bude prikazan na konferenciji pod nazivom *Supernova Remnants II: An Odyssey in Space after Stellar death*, održanoj na Kritu u junu ove godine. Veliku zahvalnost autorka duguje dr Džonu Rejmondu sa Univerziteta Harvard, na obezbeđenim posmatranjima ostatka Petlja u Labudu iz 1993. godine, bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć, kao i Nacionalnoj astronomskoj opservatoriji Rožen u Bugarskoj, gde je ostatak posmatran 2018. godine. Autorka se zahvaljuje i prof. dr Dejanu Uroševiću, na finalnim korekcijama teksta rada, kao i Lazaru Živadinoviću, na savetima pri obradi posmatranja i merenjima.

Sažetak

U ovom radu određena je brzina udarnog talasa u Galaktičkom ostatku supernove Petlja u Labudu, na osnovu merenja sopstvenih kretanja filamenata u ostatku. Sopstvena kretanja filamenata određena su poređenjem snimaka ostatka u $H\alpha$ emisiji iz dve različite epohe: 1993. (posmatranja sa Nacionalne opservatorije Kit Pik u Arizoni) i 2018. (posmatranja sa Nacionalne astronomske opservatorije Rožen u Bugarskoj). Nakon toga su, na osnovu najnovije procene udaljenosti do ostatka (735 ± 25 pc; Fesen et al. 2018), izračunate brzine filamenata, odnosno udarnog talasa. Analizirano je ukupno 36 filamenata, od čega je njih 13 isključeno iz daljeg razmatranja, zbog nezadovoljavajućeg kvaliteta merenja. Među preostala 23 filamena, na osnovu vidljivosti u $[S II]$ emisiji u drugoj epohi, prepoznata su dva radijativna filamena. Za neradijativne filamente dobijene su brzine u opsegu od 180–590 km/s, sa neodređenošću od ± 60 km/s, što se u većini slučajeva slaže sa vrednostima iz prethodnih studija. Za oba radijativna filamena dobijena je brzina od 110 ± 60 km/s, značajno niža od brzina neradijativnih filamenata. To je i očekivano za „evolutivno starije” filamente, i ujedno potvrđuje da se posmatranjima u $[S II]$ emisiji mogu izdvojiti ostaci supernovih u radijativnoj fazi evolucije.

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Nastanak i evolucija ostataka supernovih	1
1.2	Zračenje ostataka supernovih	3
1.3	Ostatak supernove Petlja u Labudu	4
2	Optička posmatranja ostataka supernovih	5
2.1	Zračenje ostataka supernovih u optičkom delu spektra	5
2.2	Optička posmatranja korišćena u ovom radu	6
3	Određivanje brzina filamenata i osnovni rezultati	9
3.1	Merenje sopstvenih kretanja filamenata	9
3.2	Brzine filamenata	12
4	Diskusija rezultata	14
4.1	Selekcija merenja	14
4.2	Poređenje rezultata sa prethodnim radovima	17
5	Zaključak	19
	Literatura	25

1 Uvod

1.1 Nastanak i evolucija ostataka supernovih

Supernova je pojava koja predstavlja eksploziju zvezde, za koju se pretpostavlja da može nastati na dva načina. Jedan scenario podrazumeva gravitacioni kolaps masivne zvezde (čija je masa na glavnom nizu bila veća od $8 M_{\odot}$), nakon koga dolazi do takozvane kolapsirajuće supernove. Drugi način je eksplozija belog patuljka, čija bi masa, pretakanjem materije sa pratioca u tesnom dvojnemu, premašila Čandrasekarovu granicu stabilnosti. Ovakva supernova naziva se termonuklearna, pošto do eksplozije belog patuljka dolazi nakon otpočinjanja nekontrolisanih termonuklearnih reakcija. U oba slučaja se pri eksploziji oslobodi kinetička energija reda veličine 10^{51} erga¹. Prema klasifikaciji na osnovu optičkih spektara, supernove se dele na tip I (nemaju linije vodonika H I²) i tip II (imaju linije H I), koji sadrže nekoliko podtipova. Termonuklearne supernove spadaju u podtip Ia (imaju jake linije silicijuma Si II) i zbog stabilnog sjaja u maksimumu koriste se kao standardne sveće. Kolapsirajuće supernove su supernove podtipa Ib (imaju linije helijuma He I) i Ic (nemaju linije He I), kao i sve supernove tipa II. Više detalja o klasifikaciji supernovih može se naći u preglednom članku Vinka (Vink 2011).

Zvezdani materijal odbačen u eksploziji supernove interaguje sa retkom međuzvezdanom ili okozvezdanom materijom. U toj interakciji, pre svega protona sa magnetnim poljem, dolazi do formiranja bezsudarnog udarnog talasa³, koji se prostire brzinom i do nekoliko hiljada kilometara u sekundi. Šireći se, udarni talas dovodi do zagrevanja, jonizacije i sažimanja okolne međuzvezdane materije, čime nastaje sudarno jonizovana emisiona maglina koju nazivamo ostatak supernove. Kako talas u interakciji sa međuzvezdanom materijom gubi energiju, tokom perioda od nekoliko desetina hiljada godina, njegova brzina opada do nekoliko stotina kilometara u sekundi. Na evoluciju ostatka supernove, osim inicijalnih parametara eksplozije supernove (kinetičke energije), bitno utiče i sredina kroz koju se ostatak prostire. Pošto odbačena zvezdana i okolna međuzvezdana materija mogu sadržati značajne nehomogenosti, praktično svaki ostatak evoluira na jedinstven način, i da bi se realistično opisao neophodne su numeričke simulacije. Međutim, veliki broj približno sferno-simetričnih, mladih ostataka supernovih govori u prilog tome da se, razmatranjem sferno-simetričnih analitičkih modela, može dobiti barem okvirna slika o evoluciji ostataka supernovih (Reynolds 2008).

Pri analitičkom opisivanju, evolucija sferno-simetričnog ostatka u retkoj sredini deli se na četiri faze (Urošević & Milogradov-Turin 2007). Prva faza predstavlja takozvano slobodno širenje, kada na dinamiku utiče samo energija oslobođena u sâmoj eksploziji roditeljske zvezde, a okolne čestice međuzvezdane materije ne uspevaju da uspore širenje ostatka. Ova faza kratko traje i u njoj se ostatak širi približno konstantnom brzinom. U realnosti, ostatak supernove se slobodno širi svega nekoliko dana, dok se, pored već postojećeg vodećeg udarnog talasa, ne pojavi i takozvani povratni udarni

¹1 erg = 10^{-7} J

²Rimsko I uz simbol hemijskog elementa označava neutralni element, dok veći brojevi (II, III...) označavaju redom viša stanja jonizacije elementa.

³Za udarni talas se kaže da je bezsudarni onda kada disipativni procesi nisu uzrokovani binarnom interakcijom čestica, odnosno sudarima (za detalje videti npr. rad Baloga i Trojmana (Balogh & Treumann 2013)).

talas (za detalje videti npr. Onić 2013). Povratni udarni talas iščezava posle nekoliko hiljada godina, a značajan je zbog zagrevanja zvezdanog materijala i stvaranja vrela sredine koja zrači u X-području.

Kada vodeći udarni front pri širenju prebriše masu međuzvezdane materije koja je veća od mase odbačene materije, nastupa sledeća, Sedov-Tejlorova faza. Procesi u njoj su približno adijabatski, pa se iza udarnog talasa stvara vrela sredina u kojoj je temperatura $T \sim 10^6$ K i elektronska koncentracija $n_e \sim 10^{-3}$ cm⁻³. Ukoliko se pretpostavi nerelativistički stacionarni udarni talas, sa ravnim frontom, koji se bez gubitaka energije na zračenje (adijabatski) prostire konstantnom brzinom v_s kroz sredinu sa zanemarljivim magnetnim poljem, opisanu jednačinom stanja idealnog gasa, iz Rankin-Igonioovih jednačina⁴ može se dobiti relacija (za detalje videti Vučetić 2017):

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)M_0^2}{2 + (\gamma - 1)M_0^2} . \quad (1)$$

Prethodna relacija predstavlja skok gustine sredine na udarnom talasu, gde je ρ_0 gustina ispred, a ρ iza udarnog talasa. Sa γ je označen adijabatski indeks gasa. Veličina $M_0 = \frac{v_s}{c_s}$ je Mahov broj, gde je $c_s = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}}$ adijabatska brzina zvuka, a P_0 pritisak u sredini ispred udarnog talasa. Takođe se može dobiti relacija zavisnosti temperature sredine T , neposredno iza udarnog talasa, od brzine udarnog talasa (Urošević & Milogradov-Turin 2007):

$$T = \frac{\mu m_H}{k} \frac{2(\gamma - 1)}{(\gamma + 1)^2} v_s^2 , \quad (2)$$

gde je μ srednja molekulska masa totalno jonizovanog gasa, m_H atomska jedinica mase, a k Bolcmanova konstanta. Iz prethodne dve jednačine možemo uvideti važnost poznavanja brzina udarnih talasa u ostacima supernovih, na osnovu kojih se, uz određene pretpostavke, mogu odrediti parametri sredine.

Faza Sedov-Tejlora traje najduže i zajedno sa slobodnim širenjem spada u takozvane neradijativne faze, jer tada energija koja se izgubi zračenjem ne utiče značajno na dinamiku ostatka. U najjednostavnijem modelu, kada se izrači otprilike polovina energije dostupne u eksploziji, ostatak ulazi u treću, radijativnu fazu. Ova faza se još naziva i faza održanja impulsa, jer se udarni talas širi tako da se ukupni impuls ostatka održava, a sva energija koju talas predaje međuzvezdanoj sredini biva izračena (Urošević & Milogradov-Turin 2007). U realnosti, kada temperatura iza udarnog talasa padne ispod $T \approx 5 \cdot 10^5$ K, gubici na zračenje postaju značajni i ostatak prvo ulazi u međufazu, čije trajanje nije zanemarljivo. Nakon nekog vremena formira se tanka i gusta ljuska, koja se širi zbog pritiska vrelijeg gasa u unutrašnjosti, pa ostatak tada ulazi u takozvanu fazu guralice za sneg (eng. *pressure-driven snowplow phase*). Granični slučaj ove faze, koji se dostiže retko i pred sâm kraj života ostatka, predstavlja upravo prethodno pomenuta faza održanja impulsa (Onić 2013).

Kada brzina udarnog talasa padne ispod brzine zvuka za sredinu u kojoj se talas širi (~ 10 km/s), ostatak se, u krajnjoj fazi rasipanja, polako stapa sa okolnom sredinom. Kako se ostatak često širi u sredini koja nije homogena ni izotropna, neki njegovi delovi (filamenti), koji nailaze na gušću okolnu materiju, mogu evoluirati brže i postati

⁴Rankin-Igonioove jednačine proizilaze iz zakona održanja mase, impulsa, energije i zamrznutosti magnetnog polja u potpuno jonizovanoj plazmi i povezuju parametre sredine ispred i iza udarnog talasa (videti Vučetić 2017).

radijativni pre drugih delova. Kao primer ostatka čija je komplikovana struktura odraz sredine u kojoj se nalazi, može se navesti upravo Petlja u Labudu (eng. *Cygnus Loop*), o čemu će biti više reči u odeljku 1.3.

1.2 Zračenje ostataka supernovih

Ostatke supernovih možemo prepoznati kao rasprostrte izvore netermalnog radio-zračenja, gde se zavisnost gustine fluksa u radio-području S_ν od frekvencije ν može opisati stepenim zakonom, oblika $S_\nu \propto \nu^{-\alpha}$. Spektralni indeks α za posmatrane ostatke kreće se između 0.3 i 0.8, sa srednjom vrednošću od oko 0.5 (Green 2019). Za ovakav spektar odgovoran je sinhrotronski mehanizam zračenja, pre svega ultrarelativističkih elektrona, u magnetnom polju. Fizički procesi koji stvaraju ovaj tip zračenja govore nam da će ansambl elektrona sa energetsom raspodelom oblika $N(E) \propto E^{-s}$ zračiti sinhrotronski spektar sa spektralnim indeksom $\alpha = (s - 1)/2$. Za vrednosti $\alpha \sim 0.5$ posmatrane kod ostataka supernovih dobija se $s \sim 2$, što je blisko posmatranoj vrednosti $s \approx 2.7$ za kosmičke zrake energija većih od 1 GeV detektovane na Zemlji (Reynolds 2008).

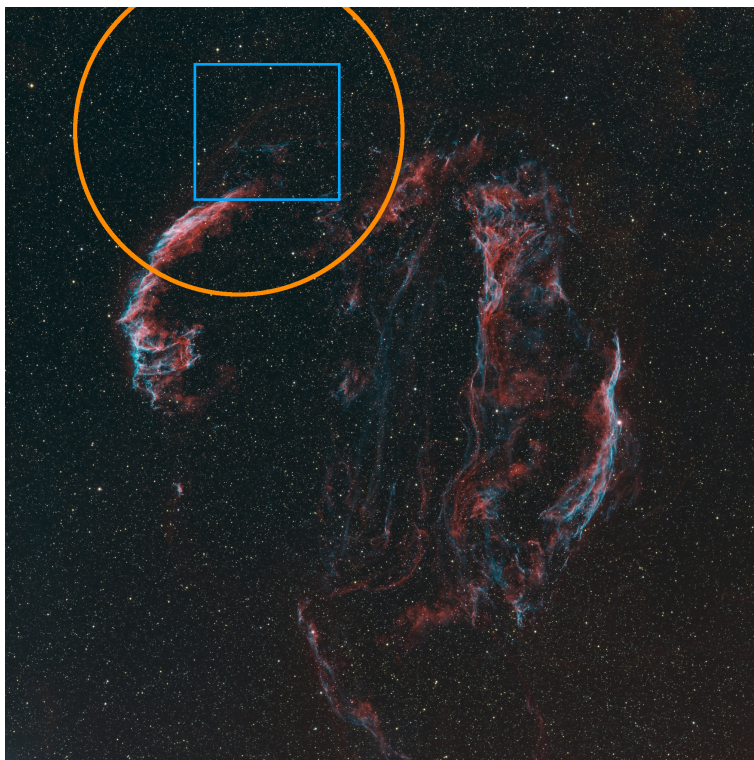
Za postojanje sinhrotronskog zračenja neophodno je da naelektrisane čestice na neki način budu prethodno ubrzane do ultrarelativističkih energija. U ostacima supernovih to se postiže mehanizmom difuznog ubrzavanja čestica na udarnim talasima (eng. *diffusive shock acceleration*), gde udarni talas predaje određeni procenat svoje energije naelektrisanim česticama, koje ubrzava i do energija od 100 TeV. Zato je proučavanje udarnih talasa u ostacima supernovih od izuzetnog značaja za proučavanje nastanka kosmičkih zraka. Naelektrisane čestice (prevashodno protoni i elektroni) dostižu visoke energije prolazeći više puta napred-nazad kroz udarni front. Uspostavlja se stepena raspodela čestica po energijama, što ne bi bilo moguće da udarni talas nije bezsudarni, jer bi se posredstvom sudara brzo uspostavila termalna Maksvelova raspodela (Salvesen et al. 2009).

Neprekidni spektar ostatka čini i termalno zakočno zračenje vrele plazme u X-području, kao što je pomenuto u odeljku 1.1. Ono je uglavnom obuhvaćeno ljuskom koja zrači sinhrotronski u radio-području. Pored termalnog X-zračenja, kod nekih mladih ostataka posmatrano je i sinhrotronsko zračenje u X-području, koje potiče od elektrona najviših energija. U γ -području, elektroni najviših energija proizvode neprekidno zračenje putem inverznog Komptonovog rasejanja fotona iz kosmičkog mikrotalasnog pozadinskog zračenja, kao i putem zakočnog zračenja u polju jona. Ova dva mehanizma spadaju u takozvani leptonski scenario. Zračenje u γ -području može nastati i putem hadronskog scenarija. On podrazumeva proces u kome visokoenergetski nukleoni iz ostatka, u sudarima sa nukleonima iz međuzvezdane materije, stvaraju neutralne pione, čijim raspadom nastaje γ -zračenje. Hadronski scenario bi mogao opisati γ -zračenje ostataka koji interaguju sa molekulskim oblacima (za detalje videti Onić 2013).

U spektrima ostataka supernovih vidljive su i emisije linije u infracrvenom, optičkom i ultraljubičastom delu spektra. Linije u infracrvenom delu su značajne za određivanje elektronske temperature i koncentracije, a u optičkom i ultraljubičastom delu za određivanje karakteristika samog udarnog talasa. Međuzvezdana ekstinkcija značajno utiče na posmatranje Galaktičkih ostataka u optičkom i ultraljubičastom delu spektra. O optičkim linijama će biti više reči u odeljku 2.1.

1.3 Ostatak supernove Petlja u Labudu

Petlja u Labudu je Galaktički ostatak supernove, udaljen 735 ± 25 pc od nas, što je nova procena na osnovu merenih paralaksi zvezda iz podataka misije *Gaia* (Fesen et al. 2018). Udaljenost do Galaktičkih ostataka nije jednostavno odrediti, i jedan od načina na koji je to moguće proceniti je na osnovu udaljenosti do zvezda koje se nalaze ispred, odnosno iza ostatka. Zvezde koje se nalaze iza ostatka mogu se prepoznati po apsorpciji u spektru, koja nastaje zbog toga što zračenje sa zvezde, na putu do nas, prolazi kroz gas koji čini ostatak supernove. Jedna od prethodnih procena za udaljenost do Petlje u Labudu iznosila je 576 ± 61 pc (Blair et al. 2009). Površinski sjaj i veličina na nebu od oko 3° omogućavaju detaljno izučavanje manjih struktura (filamenata) u ovoj maglini. Na Slici 1 prikazan je ostatak Petlja u Labudu u optičkom delu spektra. Ovaj ostatak srednje starosti (~ 10000 godina) okružen je gustim molekulskim oblacima i poseduje kako neradijativne, tako i radijativne filamente. Stoga je, uprkos njegovoj prividnoj sfernoj simetriji, jasno da ne prati jednostavan analitički model evolucije, opisan u odeljku 1.1 (Salvesen et al. 2009). Prema najnovijim rezultatima, morfologija ovog ostatka posledica je njegove lokacije daleko van Galaktičke ravni, gde se nalazi u retkoj sredini, okružen sa nekoliko gustih molekulskih oblaka (Fesen et al. 2018). Delovi koji su najsajjniji u optičkom području opisuju skoro sfernu ljusku u severnom delu magline, a njihovo zračenje objašnjava se interakcijom udarnog talasa sa okolnim molekulskim oblacima.



Slika 1: Ostatak supernove Petlja u Labudu u optičkom delu spektra (Autor: Martin Pugh). Crvenom bojom prikazan je snimak u $H\alpha$, plavom u $[OIII]$, a zelenom u $[SII]$ emisiji. Sever je gore, a istok levo. Narandžasti region označava položaj korišćenih podataka iz 1993. godine, a plavi region iz 2018. godine.

U dosadašnjim radovima su različitim metodama merene brzine neradijativnih fila-

menata, a samim tim i udarnog talasa, u ostatku Petlja u Labudu (videti npr. radove Salvesena sa saradnicima (Salvesen et al. 2009) i Medine sa saradnicima (Medina et al. 2014)). Cilj ovog rada bio je odrediti brzinu udarnog talasa u ostatku Petlja u Labudu, merenjem sopstvenih kretanja odgovarajućih filamenata, a podstaknuto novoodređenom udaljenošću do ostatka. Sopstvena kretanja su merena upoređivanjem snimaka ostatka u $H\alpha$ emisiji iz dve različite epohe - 1993. i 2018. godine. Brzina filamenata određena je na osnovu sopstvenih kretanja i udaljenosti do ostatka, pri čemu je korišćena prethodno pomenuta nova procena udaljenosti. Takođe, merene su i upoređene brzine neradijativnih i radijativnih filamenata, gde su radijativni filamenti prepoznati na osnovu vidljivosti u $[S II]$ emisiji⁵. Pritom je očekivano da radijativni filamenti imaju manje brzine, pošto su „evolutivno stariji”.

U poglavlju 2 će detaljnije biti opisano zračenje ostataka supernovih u optičkom delu spektra, kao i optička posmatranja korišćena u ovom radu i njihova obrada. Poglavlje 3 posvećeno je sâmom metodu korišćenom za merenje sopstvenih kretanja filamenata i uopšteno dobijenim rezultatima. Diskusija rezultata nalazi se u poglavlju 4, a zaključak i predlozi za dalji rad u poglavlju 5.

2 Optička posmatranja ostataka supernovih

2.1 Zračenje ostataka supernovih u optičkom delu spektra

Kod udarnih talasa u mladim ostacima supernovih, gde plazma nije potpuno jonizovana i postoji značajna koncentracija neutrala, u optičkom delu spektra izražene su Balmerove emisione linije $H I$ (eng. *Balmer-dominated shocks*), posebno linija $H\alpha$. Ove linije imaju usku i široku komponentu. Uska komponenta nastaje nakon sudarne ekscitacije neutrala vodonika, koji prođu udarni talas i sudare se sa elektronima ili jonima. Širina uske komponente, reda 10 km/s, oslikava temperaturu, odnosno raspodelu čestica po brzinama, u sredini ispred udarnog talasa. Široka komponenta nastaje u procesu izmene naelektrisanja neutrala vodonika koji prođu kroz udarni talas i jona vodonika iza udarnog talasa. Pritom prethodno sporiji neutrali postaju brži joni, a prethodno brži joni postaju pobuđeni sporiji neutrali. Deekscitacijom ovih sporijih neutrala nastaju Balmerove linije širine reda 1000 km/s, koje sada oslikavaju temperaturu u sredini iza udarnog talasa (Vučetić 2017).

U kasnijim, radijativnim fazama, pored Balmerovih linija, javljaju se i druge optičke linije. Posebno su značajne zabranjene linije, koje nastaju sudarnom ekscitacijom jona metala sa niskim potencijalom ekscitacije. Odnosi intenziteta nekih od ovih linija, na primer $[S II]/H\alpha$, korisni su za razlikovanje ostataka supernovih od drugih, fotojonizovanih, emisijih maglina. U fotojonizovanim maglinama, sumpor je uglavnom u dva puta jonizovanom stanju ($S III$), zbog prisustva ultraljubičastih fotona centralne zvezde, pa je odnos $[S II]/H\alpha$ niži nego u ostacima supernovih (Vučetić 2017). Postojanje linija $[S II]$ $\lambda 6717\text{\AA}$, $\lambda 6731\text{\AA}$ takođe nam govori o tome da je udarni talas ušao u radijativnu fazu, pa se na osnovu posmatranja ostatka u $[S II]$ emisiji mogu razdvojiti njegovi neradijativni i radijativni filamenti, što je korišćeno u ovom radu.

⁵Zračenje ostataka supernovih u emisijim linijama opisano je u odeljku 2.1.

2.2 Optička posmatranja korišćena u ovom radu

Sopstvena kretanja filamenata određena su upoređivanjem posmatranja ostatka u $H\alpha$ emisiji iz dve različite epohe, vremenski razmaknute približno 25 godina. Približan položaj posmatranja iz obe epohe označen je na Slici 1. Prvu epohu predstavlja posmatranje u $H\alpha$ emisiji iz 1993. godine, sa Barel Šmit teleskopa Nacionalne opservatorije Kit Pik⁶, prečnika 0.9 m. Posmatranja je izvršio dr Robert Fesen sa Dartmuskog koledža⁷, a podaci su dobijeni u privatnoj komunikaciji sa dr Džonom Rejmondom sa Univerziteta Harvard⁸. Prečnik vidnog polja je približno 0.7° , veličina jednog piksela je $2''.0268$, a ekspozicija 1500 s.

Drugu epohu čine posmatranja u $H\alpha$ emisiji iz 2018. godine, sa dvometarskog teleskopa Nacionalne astronomske opservatorije Rožen u Bugarskoj. Posmatranja je izvršila grupa sa Matematičkog fakulteta u Beogradu, koja se bavi istraživanjem ostataka supernovih, u okviru projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, kojim rukovodi prof. dr Dejan Urošević. Na Slici 2 prikazan je snimak iz prve epohe, gde je plavim pravougaonicima označeno devet regiona snimljenih u drugoj epohi. Veličina jednog piksela na snimcima iz druge epohe je $0''.176$. Ekspozicija pojedinačnih snimaka je 300 s, pri čemu je za svaki od označenih regiona načinjeno više snimaka (od pet do devet). Više pojedinačnih snimaka jednog regiona je sabrano, radi poboljšanja odnosa signala prema šumu, kako bi bilo moguće detektovati i filamente niskog sjaja. Za tri večeri tokom kojih je posmatrano, veličina turbulentnog lika (eng. *seeing*) iznosila je između $1''.2$ i $1''.8$. U drugoj epohi je, pored snimaka u $H\alpha$ emisiji, ostatak posmatran i u [S II] emisiji, ali su ti snimci korišćeni samo za identifikaciju radijativnih filamenata, ne i za merenje sopstvenih kretanja. Ostatak je takođe posmatran korišćenjem filtera za kontinuum, koji ne obuhvata ni jednu emisionu liniju, kako bi se sa snimaka u emisionim linijama moglo otkloniti zračenje u kontinuumu. To ovde takođe nije korišćeno, pošto je od interesa bilo merenje sopstvenih kretanja filamenata, pa kalibracija fluksa nije značajna.

Snimci iz prve epohe bili su prethodno obrađeni, dok je za drugu epohu bilo neophodno uraditi uobičajenu obradu posmatračkih podataka. Za obradu, kao i sve dalje proračune, korišćen je programski jezik Python 3⁹. Sva posmatranja iz druge epohe korigovana su prvo snimkom nulte ekspozicije (eng. *bias frame*), koji predstavlja nulti, „bazični” signal koji postoji na sâmom CCD čipu i mora se oduzeti od posmatranja. Snima se sa nultom (zapravo vrlo kratkom) ekspozicijom i zatvorenom (neosvetljenom) kamerom. Obično se snimi više ovakvih snimaka, u ovom slučaju bilo ih je 11, koji se usrednje¹⁰ u jedan snimak nulte ekspozicije. Taj usrednjeni snimak (eng. *master bias frame*) koristi se za dalju obradu posmatranja. Nakon korekcije snimkom nulte ekspozicije, potrebno je korigovati posmatranja snimkom ravnomerno osvetljenog polja (eng. *flatfield frame*), gde se kamera osvetli izvorom koji ravnomerno zrači (na primer nebo u zoru i sumrak). Ova korekcija, gde se posmatranje podeli snimkom ravnomerno

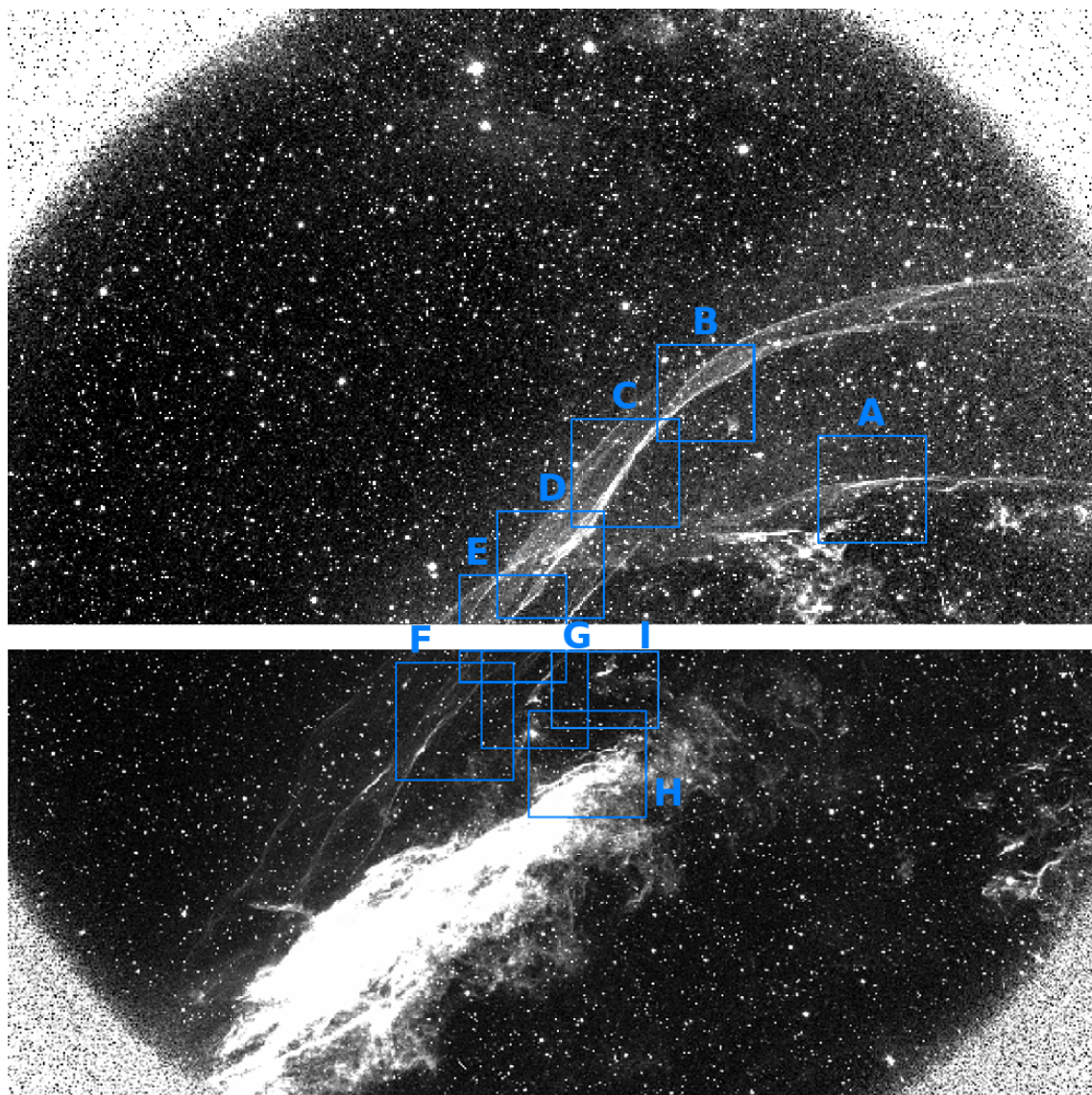
⁶Burrell Schmidt telescope, Kitt Peak National Observatory, Kitt Peak, Arizona, USA

⁷Dr. Robert Fesen, Physics-Astronomy Department, Dartmouth College, Hanover, USA

⁸Dr. John Raymond, Smithsonian Astrophysical Observatory, Harvard University, USA

⁹Pored standardnih biblioteka NumPy (Oliphant 2006), SciPy (Jones et al. 2001–) i Matplotlib (Hunter 2007), korišćene su i biblioteke Ccdproc (Craig et al. 2017), Astropy (Price-Whelan et al. 2018) i Scikit-image (van der Walt et al. 2014)

¹⁰Usrednjavanje se vrši sa odbacivanjem piksela čije je odstupanje od srednje vrednosti (za taj piksel) izvan nekog zadatog opsega (eng. *sigma-clipping*).



Slika 2: Snimak severoistočnog dela Petlje u Labudu u $H\alpha$ emisiji, iz 1993. godine (prva epoha). Rektascenzija i deklinacija centra vidnog polja u epohi J2000 su $313^{\circ}78$ i $32^{\circ}18$, redom. Devet plavih pravougaonika označavaju regione snimljene u $H\alpha$ emisiji 2018. godine (druga epoha). Regioni su označeni slovima od A do I. Duž bele „trake”, koja deli posmatranje iz prve epohe na severni i južni deo, ne postoje posmatranja u prvoj epohi. Region E je jedan region u posmatranjima iz druge epohe, ali kako kroz njega delom prolazi ova „traka”, podeljen je na severni i južni deo.

osvetljenog polja, neophodna je kako bi se otklonili efekti neravnomerne osetljivosti CCD čipa. Takođe se napravi nekoliko snimaka, ovde 5, koji se usrednjavaju¹¹ u jedan snimak ravnomerno osvetljenog polja (eng. *master flatfield frame*). Pre usrednjavanja, svaki pojedinačni snimak koriguje se usrednjenim snimkom nulte ekspozicije. Takođe treba napomenuti da se, za posmatranja u različitim filterima, moraju koristiti snimci ravnomerno osvetljenog izvora snimljeni uz upotrebu tog filtera. Algoritam za obradu jednog sirovog posmatranja, na primer u $H\alpha$ emisiji, može se prikazati na sledeći način:

¹¹Ponovo uz odbacivanje piksela čije je odstupanje od srednje vrednosti izvan nekog zadatog opsega.

$$\text{Obrađeni H}\alpha \text{ snimak} = \frac{\text{Sirovi H}\alpha \text{ snimak} - B_M}{F_M^{\text{H}\alpha} - B_M},$$

gde je sa B_M označen usrednjeni snimak nulte ekspozicije, a sa $F_M^{\text{H}\alpha}$ usrednjeni snimak ravnomerno osvetljenog polja snimljen korišćenjem $\text{H}\alpha$ filtera.

Nakon obrade, odgovarajući uzastopni snimci jednog regiona međusobno su poravnati na osnovu položaja zvezda, transliranjem snimaka duž obe ose¹², i na kraju sabrani. Kako se ovde radi o poravnavanju uzastopnih ekspozicija posmatranih istim instrumentom, samo translacije bile su dovoljne da se snimci poravnaju. Valjanost poravnavanja proverena je merenjem veličine likova nekoliko zvezda na snimcima pre i posle sabiranja, za koje se ispostavilo da se nisu značajno uvećali i da je stoga poravnavanje zadovoljavajuće. Pri sabiranju snimaka istog regiona odbacivani su pikseli koji značajno odstupaju od srednje vrednosti za taj piksel, kako bi se otklonilo dejstvo kosmičkih zraka na pojedine piksele. Ceo prethodno navedeni postupak obrade i poravnavanja rađen je automatski, tako što je napisan kôd koji na osnovu podataka iz *header*-a prepoznaje snimke u istom filteru, kao i snimke istog regiona, i na osnovu toga izvršava dalju obradu na opisani način.

Dalje je ideja bila preklopiti regione iz druge epohe sa njima odgovarajućim regionima iz prve epohe, u odnosu na nebeske koordinate, kako bi se moglo uočiti pomeranje filamenata, odnosno prostiranje udarnog talasa. Pošto je veličina piksela na snimcima iz prve i druge epohe različita, bilo je neophodno interpolirati starije snimke na koordinatnu mrežu čiji podeoci odgovaraju veličini piksela novijih snimaka ($0''.176$), da bi se snimci iz dve epohe mogli preklopiti. Stariji snimci su interpolirani korišćenjem linearne 2D-interpolacije. Zatim su odgovarajući snimci regiona iz prve i druge epohe međusobno poravnati. Ovde nije bilo moguće upotrebiti samo translacije, a ni translacije i rotacije snimaka kako bi se oni poravnali. Razlog za to je činjenica da su posmatranja višena sa dva različita instrumenta, tako da bi se za kvalitetno poravnavanje morala dozvoliti deformacija vidnog polja, odnosno snimka. Dodatne probleme unosi velika razlika u sâmom kvalitetu snimaka, gde su zvezde u prvoj epohi preeksponirane i uočljivo veće od zvezda u drugoj epohi, a takođe na snimcima iz prve epohe postoje svetle tačke, nalik na zvezde, koje nemaju svoje „parove” na snimcima iz druge epohe.

Stoga se moralo pribeći drugom načinu poravnavanja snimaka regiona iz dve epohe. Snimci su poravnati u odnosu na nebeske koordinate. Nebeske koordinate za svaki snimak dobijene su pomoću alata *Astrometry.net*¹³, koji koristi kataloge zvezda kako bi prepoznao zvezde na datom snimku, i na osnovu prepoznatih zvezda upisuje mrežu koordinata na snimak. Obzirom na to da se na snimku svakog regiona nalazi veliki broj zvezda, greške u određivanju položaja pojedinačnih zvezda (zbog preeksponiranosti, kao i zbog prisustva pomenutih svetlih tačaka) gube na značaju i mreža koordinata koja se pripisuje snimku je u srednjem dobro određena. Kvalitet poravnavanja proveren je vizuelno i problemi su uočeni samo kod južnog dela regiona E, koji zato dalje nije korišćen. Nakon poravnavanja snimaka iz dve epohe moglo se pristupiti odabiru filamenata i merenju sopstvenih kretanja istih. Iako vremenski razmak između dve epohe nije naročito veliki (~ 25 godina) i očekivano je sopstveno kretanje od svega

¹²Za to je korišćena funkcija *register_translation* iz biblioteke *Scikit-image*, koja poravnava dva snimka u odnosu na položaje zvezda kao maksimuma sjaja, translacijom snimaka duž obe ose.

¹³Alat je dostupan na web-stranici: <http://nova.astrometry.net/>.

nekoliko lučnih sekundi, nakon poravnavanja snimaka, na nekoliko mesta ono je ipak bilo uočljivo i pre samog merenja.

3 Određivanje brzina filamenata i osnovni rezultati

3.1 Merenje sopstvenih kretanja filamenata

Zbog specifičnosti metode koja je korišćena za merenje sopstvenih kretanja, za merenje su odabrani filamenti koji su pre svega približno linearni, a zatim i dovoljno sjajni u odnosu na pozadinu. Iz svakog od devet regiona označenih na Slici 2 izdvojeno je po nekoliko manjih podregiona (dimenzija oko $100'' \times 100''$), koji sadrže jedan ili više približno linearnih filamenata. Na osnovu astrometrije, parovi podregiona sa jednakim koordinatama isečeni su sa snimaka iz prve i druge epohe. Tako je izdvojeno ukupno 36 filamenata, za koje su merena sopstvena kretanja i računate brzine, metodom koja će dalje biti opisana. Neki od tih filamenata isključeni su iz razmatranja nakon merenja, o čemu će biti više reči u diskusiji rezultata u odeljku 4.1. Na Slici 3 prikazan je primer jednog približno linearnog filameta, isečenog iz regiona B, u prvoj i drugoj epohi.

Kako bi se opisao položaj filameta na isečenom podregionu iz prve i druge epohe, u svakom redu piksela u isečku, za tačku koja označava filament odabrana je tačka sa maksimalnim sjajem u tom redu. Time je filament u svakoj od epoha opisan jednim skupom tačaka, gde y koordinate označavaju redove, a x koordinate kolone piksela na isečku, što je ilustrovano u donjem redu na Slici 3. Kako bi ovakav način opisivanja filameta bio smislen, bilo je neophodno na neki način izostaviti zvezde, koje su sjajnije od filamenata, pa bi bile pogrešno identifikovane kao tačke koje pripadaju filamentima. Zato su za svaki filament u razmatranje uzeti samo delovi snimka u njegovoj bližoj okolini, koji su dovoljni da obuhvate sopstveno kretanje, a u kojima nema susednih filamenata i zvezda. Takvi delovi su označeni pravougaonicima u gornjem redu Slike 3.

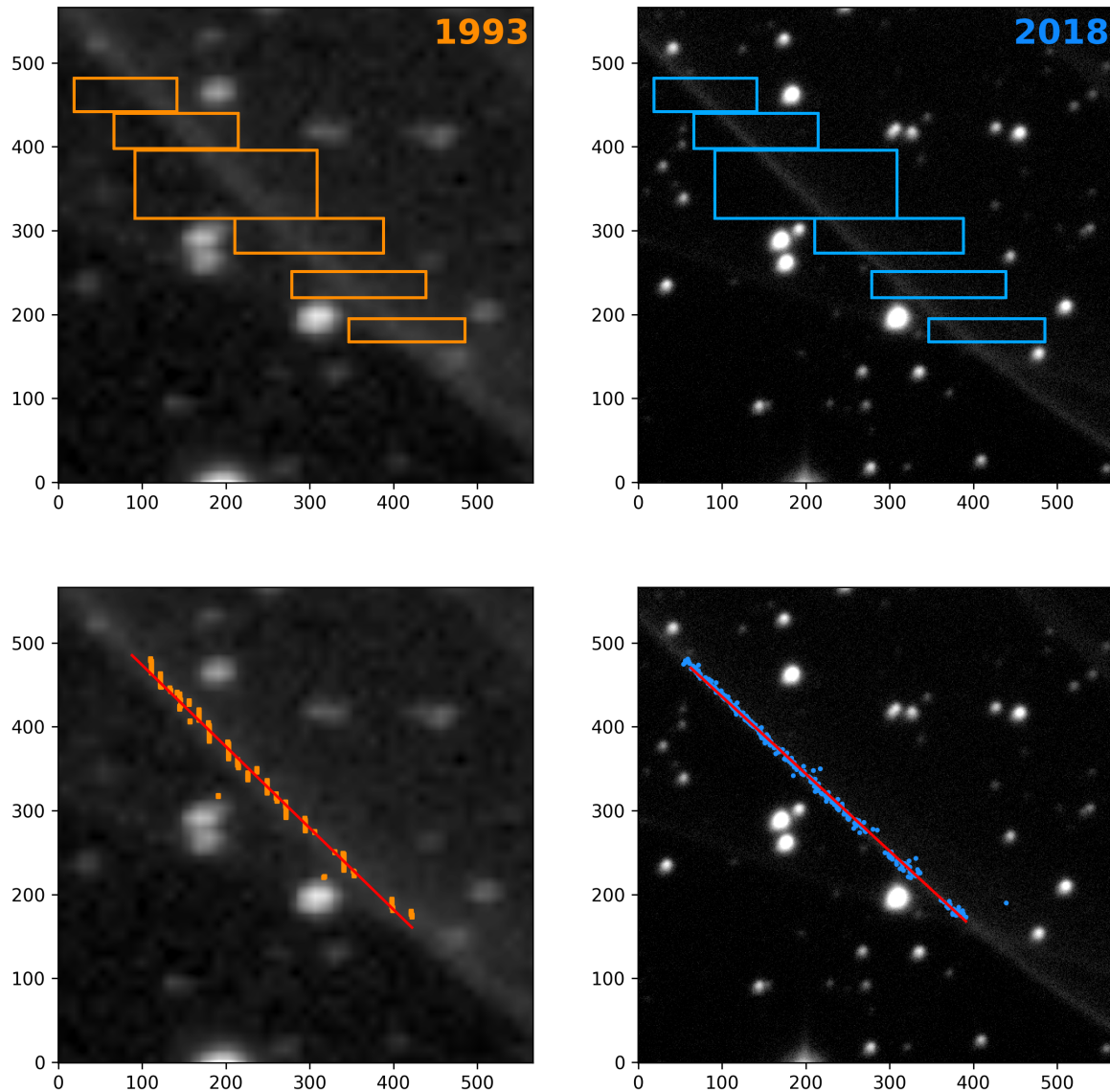
Uprkos tome što su za svaki filament ručno birani delovi pogodni za merenje, dešavalo se da se u odabranim delovima ipak nađu tačke koje pripadaju okolnim zvezdama, što čini da filament deluje razučeno. Tome je posebno doprinela činjenica da su, zbog različitog kvaliteta snimaka, likovi zvezda na starijim snimcima veći nego na novim, što otežava odabir pravougaonika za merenje. Bar dve takve tačke, koje dosta odstupaju od filameta, a posledica su susednih zvezda, mogu se videti gore levo na Slici 3. Takođe, filamenti koji su manje sjajni često su delovali razučenije nego sjajniji filamenti. Zato su tačke koje su odabrane kao reprezentacija filameta naknadno filtrirane. Za to je korišćena iterativna metoda (eng. *sigma-clipping*) koja je ponovljena tri puta. Na svaki od dva seta tačaka (filament u prvoj i u drugoj epohi) fitovana je prava, kao na Slici 3, nakon čega su odbacivane merene tačke čija y -koordinata odstupa za više od $\pm 2\chi$ od očekivane vrednosti nakon fitovanja prave¹⁴. Pritom su, zbog specifičnosti daljeg postupka merenja, sve tačke koje su odbačene iz jedne od epoha, automatski bile

¹⁴Veličina χ određena je jednačinom:

$$\chi^2 = \sum_1^N (y_i^o - y_i^m)^2 / (N - 2) ,$$

gde je sa y_i^m označena merena y koordinata i -te tačke, a sa y_i^o njena očekivana vrednost, na osnovu linearnog fita. Ukupan broj tačaka označen je sa N .

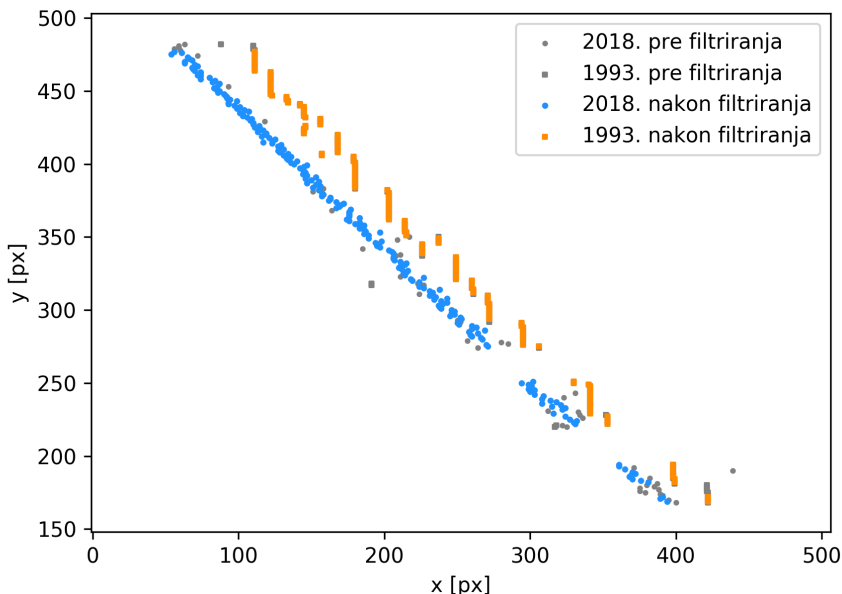
odbačene i iz druge. Ovakvo filtriranje uspevalo je da otkloni i krajeve filamenata koji su bili blago zakrivljeni, tačke koje pripadaju susednim (manje sjajnim) filamentima i slično. Na Slici 4 prikazan je primer filtriranja tačaka za filament sa Slike 3.



Slika 3: Primer jednog približno linearnog filameta, isečenog iz regiona B. Slike na levoj strani pripadaju prvoj (narandžaste oznake), a na desnoj drugoj epohi (plave oznake). Na slikama u gornjem redu označeni su pravougaonici u kojima su vršena merenja. Pritom su granice pravougaonika identične za obe epohe, za jedan filament. Na slikama u donjem redu prikazani su položaji maksimuma sjaja u svim razmatranim redovima, a crvene prave predstavljaju linearni fit za svaki od dva označena skupa tačaka.

Nakon što su odabrane i filtrirane tačke koje predstavljaju filament u prvoj i drugoj epohi, izračunato je sopstveno kretanje filameta duž x -ose, odnosno rastojanje između položaja filameta u prvoj i u drugoj epohi duž x -ose. Ovo rastojanje određeno je kao

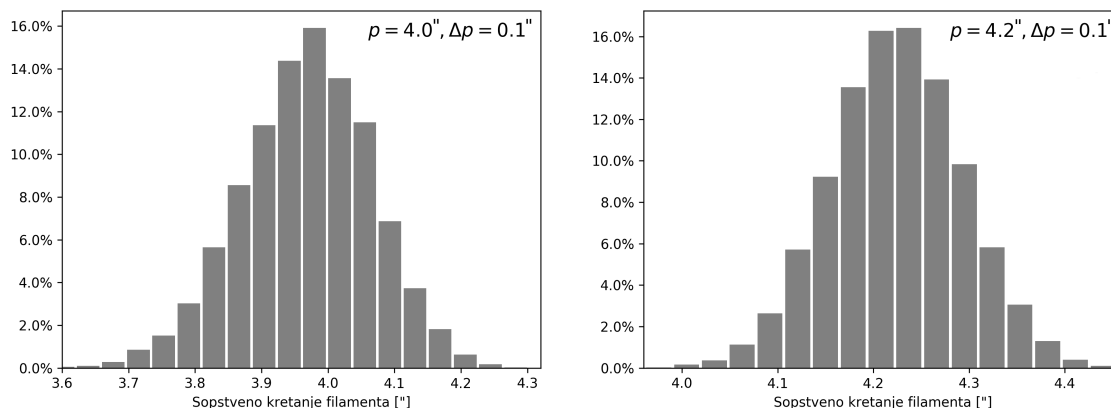
srednje rastojanje po redovima (rastojanje dve odabrane tačke u svakom razmatranom redu, usrednjeno po broju razmatranih redova). Zatim je kroz svaki od dva skupa tačaka fitovana prava. Prethodno dobijeno sopstveno kretanje duž x -ose projektovano je na pravac normalan na filament, za šta je korišćen usrednjeni nagib ove dve prave. Time je dobijeno sopstveno kretanje filameta duž pravca normalnog na filament.



Slika 4: Očitani maksimumi sjaja u odabranim redovima za filament sa Slike 3, za prvu i drugu epohu. Sivi simboli označavaju očitane tačke pre, a plavi i narandžasti nakon filtriranja.

Kako bi se procenila očekivana vrednost i neodređenost izmerenog sopstvenog kretanja filameta, postupak merenja, nakon filtriranja tačaka koje reprezentuju filament, ponovljen je 10000 puta. Pritom je u svakoj iteraciji, iz filtriranog skupa tačaka koje reprezentuju filament, iznova biran novi nasumični uzorak, veličine kao i početni uzorak, uz dozvoljena ponavljanja tačaka. Ova iterativna metoda je u engleskoj literaturi poznata kao *bootstrap* metoda. Nakon 10000 ponavljanja, dobijena je raspodela izmerenih sopstvenih kretanja. Kao krajnja vrednost sopstvenog kretanja filameta p korišćena je očekivana vrednost ove raspodele, a kao ocena neodređenosti Δp korišćena je njena disperzija, osim u slučaju da je disperzija manja od veličine piksela u drugoj epohi ($0''.176$). Tada je za neodređenost sopstvenog kretanja korišćena vrednost od $0''.176$. Na Slici 5 prikazan je primer raspodele merenih sopstvenih kretanja za filament sa Slike 3, sa i bez prethodnog filtriranja tačaka.

Celokupan proces merenja šematski je prikazan u Prilogu 1. Treba napomenuti i da su, zbog načina na koji su merena sopstvena kretanja filamenata (kao pomeraji duž x -ose), neki filamenta ručno zarotirani za određeni ugao pre samog merenja. Kod nekih filamenata je to urađeno kako bi se lakše izbegle okolne zvezde, gde rotacija čini filament „pristupačnijim”, tj. omogućava da se uzorkuje veći broj tačaka. Kod nekih filamenata koji su originalno bili približno paralelni x -osi, rotacija je bila neophodna, jer nije bilo moguće locirati maksimume sjaja u filamentu duž y -ose. O uticaju rotacije, odnosno pravca duž koga se „preseca” filament pri merenju sopstvenog kretanja, na dobijene vrednosti brzine, biće više reči u diskusiji u odeljku 4.1.



Slika 5: Raspodela merenih sopstvenih kretanja za filament sa Slike 3, levo bez, a desno sa prethodnim filtriranjem tačkaka. Prikazane su krajnje vrednosti sopstvenog kretanja u oba slučaja.

3.2 Brzine filamenata

Uz pretpostavku da se filament tokom perioda između dva posmatranja ostatka kretao konstantnom brzinom, brzina filameta računata je na osnovu sopstvenog kretanja p i udaljenosti do objekta D kao:

$$v = \frac{2D \cdot \operatorname{tg}(p/2)}{t}, \quad (3)$$

gde je t vreme proteklo između dva posmatranja ostatka, a p je izraženo u radijanima. Neodređenost brzine je, na osnovu neodređenosti sopstvenog kretanja Δp i neodređenosti udaljenosti ΔD , računata kao:

$$\Delta v = \frac{1}{t} \sqrt{4 \operatorname{tg}^2(p/2) (\Delta D)^2 + \left(\frac{D}{\cos(p/2)} \right)^2 (\Delta p)^2}, \quad (4)$$

gde su p i Δp izraženi u radijanima.

U Tabeli 1 prikazane su vrednosti izmerenih sopstvenih kretanja, kao i izračunatih brzina, za svih 36 filamenata. Takođe su u poslednjoj koloni (Selekcija) označeni filamenti čija merenja nisu bila zadovoljavajućeg kvaliteta. Filamenti koji su bili vidljivi i na snimcima u [S II] emisiji, odnosno radijativni filamenti, jesu njih tri iz regiona H. Region I takođe je radijativni, ali u njemu ne postoje približno linearni filamenti pogodni za merenje.

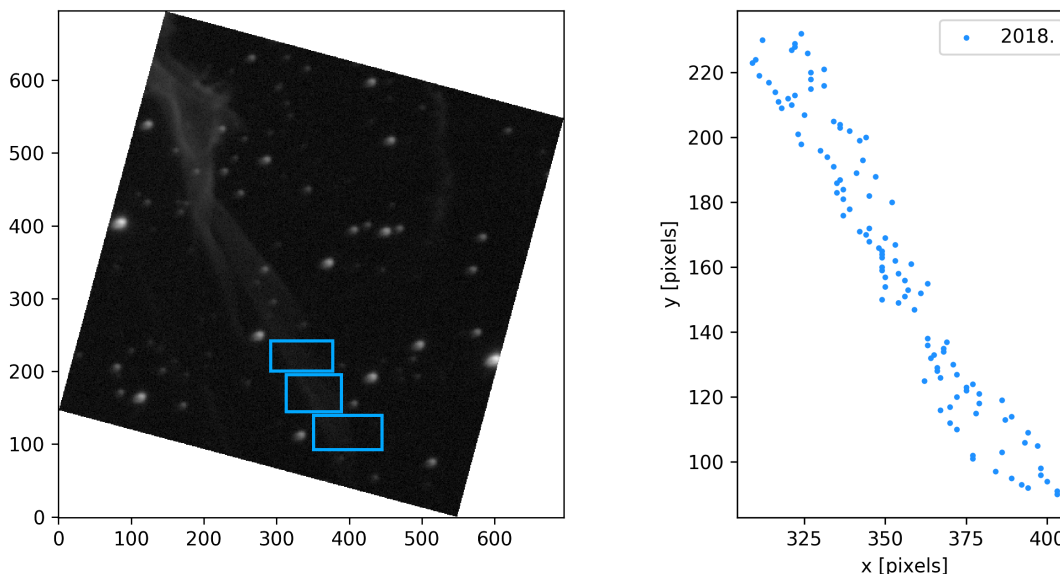
Tabela 1: Za svih 36 izmerenih filamenata prikazane su rektascenzija i deklinacija za epohu J2000, broj tačaka koje reprezentuju filament nakon filtriranja, izmereno sopstveno kretanje, izračunata brzina, kao i to da li je filament dalje razmatran ili ne (1 ili 0 u poslednjoj koloni). Za sve filamente, osim za D2, disperzija merenog sopstvenog kretanja bila je manja od veličine piksela u drugoj epohi, tako da je za neodređenost sopstvenog kretanja korišćena vrednost od $0''.176$, što je u tabeli zaokruženo na $0''.2$.

Fil.	RA [hh:mm:ss]	DEC [deg:min:sec]	Broj tačaka	p ["]	v [km/s]	Selekcija [0/1]
A1	20:53:40.38	32:14:14.53	171	2.5 ± 0.2	350 ± 30	1
A2	20:53:27.21	32:14:22.10	198	2.4 ± 0.2	330 ± 30	1
B1	20:54:28.36	32:20:13.47	133	3.9 ± 0.2	540 ± 30	1
B2	20:54:20.15	32:21:57.44	220	4.2 ± 0.2	590 ± 30	1
B3	20:54:13.65	32:22:25.90	189	3.5 ± 0.2	480 ± 30	0
B4	20:54:13.65	32:22:25.90	170	3.6 ± 0.2	500 ± 30	1
B5	20:54:27.90	32:19:30.25	146	2.5 ± 0.2	350 ± 30	1
B6	20:54:31.28	32:18:50.83	56	3.0 ± 0.2	420 ± 30	1
C1	20:54:51.03	32:17:21.87	386	3.4 ± 0.2	470 ± 30	1
C2	20:54:35.87	32:17:42.67	397	1.3 ± 0.2	180 ± 20	1
C3	20:54:35.87	32:17:42.67	215	2.1 ± 0.2	290 ± 30	1
C4	20:54:44.56	32:15:47.93	325	3.3 ± 0.2	460 ± 30	1
C5	20:54:51.33	32:14:11.08	294	3.3 ± 0.2	460 ± 30	1
D1	20:54:57.70	32:08:11.42	133	2.6 ± 0.2	360 ± 30	0
D2	20:55:01.25	32:11:26.01	137	2.8 ± 0.3	380 ± 40	0
D3	20:55:05.12	32:10:14.00	95	1.4 ± 0.2	190 ± 20	0
D4	20:55:05.12	32:10:14.00	64	0.1 ± 0.2	10 ± 20	0
D5	20:55:11.37	32:12:11.02	149	2.3 ± 0.2	320 ± 30	0
E1	20:55:28.73	32:07:55.05	217	2.3 ± 0.2	320 ± 30	1
E2	20:55:26.82	32:07:15.35	201	2.6 ± 0.2	350 ± 30	0
E3	20:55:19.61	32:06:56.97	215	2.0 ± 0.2	280 ± 30	1
E4	20:55:14.05	32:08:19.48	227	3.9 ± 0.2	540 ± 30	1
F1	20:55:34.62	32:01:44.56	174	2.0 ± 0.2	270 ± 30	1
F2	20:55:44.76	31:59:49.90	222	1.9 ± 0.2	260 ± 30	1
F3	20:55:42.79	32:02:13.79	177	3.5 ± 0.2	480 ± 30	1
G1	20:55:23.29	32:03:31.97	109	1.5 ± 0.2	200 ± 20	1
G2	20:55:15.11	32:03:31.53	139	2.2 ± 0.2	300 ± 30	1
G3	20:55:15.11	32:03:31.53	133	1.7 ± 0.2	230 ± 30	1
G4	20:55:19.70	32:02:37.78	128	1.9 ± 0.2	260 ± 30	0
G5	20:55:19.70	32:02:37.78	147	1.7 ± 0.2	230 ± 30	1
G6	20:55:18.53	32:00:38.91	159	1.6 ± 0.2	220 ± 20	0
G7	20:55:06.69	32:03:27.49	75	0.0 ± 0.2	0 ± 20	0
G8	20:55:06.69	32:03:27.49	112	3.2 ± 0.2	440 ± 30	0
H1	20:55:12.37	31:55:57.79	167	0.8 ± 0.2	110 ± 20	1
H2	20:54:53.09	31:57:59.17	73	0.9 ± 0.2	120 ± 20	0
H3	20:54:53.09	31:57:59.17	75	0.8 ± 0.2	110 ± 20	1

4 Diskusija rezultata

4.1 Selekcija merenja

Od 36 filamenata koji su prikazani u Tabeli 1, njih 13 je izuzeto iz daljeg razmatranja, zbog lošeg kvaliteta merenja. Kvalitet merenja proveravan je vizuelno, uvidom u grafike koji prikazuju tačke koje reprezentuju filamenat, kao grafik na Slici 4. Jedan od razloga zbog kojih bi filament bio izuzet jeste velika razuđenost tačaka na pomenutom grafiku, što je bio slučaj kod filamenata D3, D5, E2, G4, G7, B3, D4 i G8. Razuđeni filamenti su oni sa niskim sjajem, ili oni koji nisu deo „oštre” ljuske, već ljuske čiji sjaj sporije opada sa udaljavanjem od same ljuske¹⁵. Primer razuđenog filameta G8, koji je deo ljuske čiji sjaj sporije opada sa udaljenošću, prikazan je na Slici 6. Drugi razlog za izuzimanje filameta bilo je prisustvo tačaka koje pripadaju okolnim filamentima, a koje nije bilo moguće otkloniti filtriranjem. Susjedni filament je u slučaju D1 suviše blizu, a u slučaju D2 se prepliće sa filamentom od interesa, zbog čega se merenja ne mogu smatrati pouzdanim. Primer filameta D2 prikazan je na Slici 7.

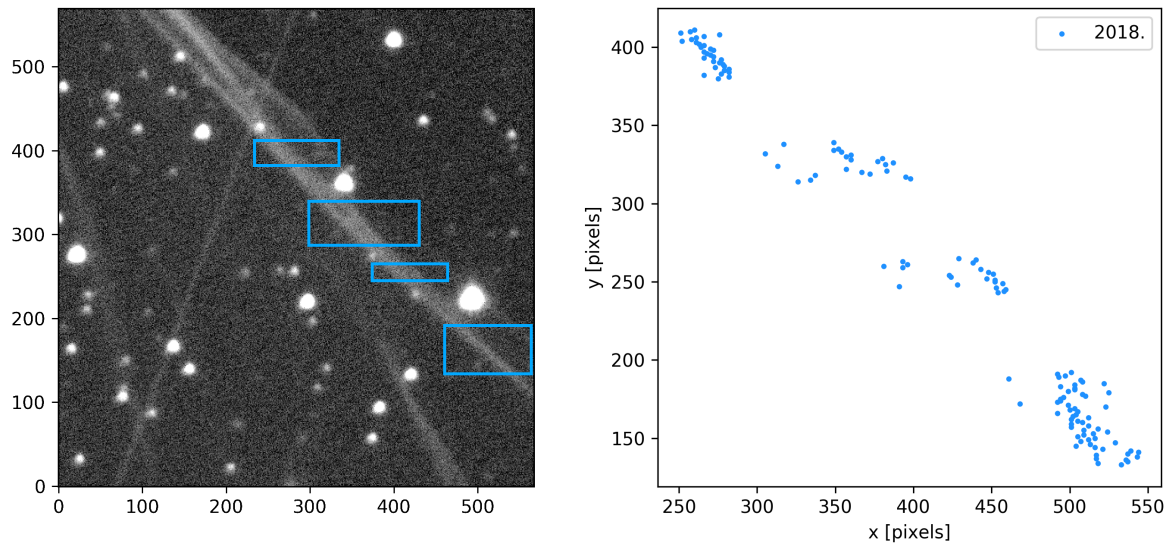


Slika 6: Primer filameta G8 (levo), koji je izuzet iz daljeg razmatranja zbog razuđenosti tačaka koje reprezentuju filament (desno).

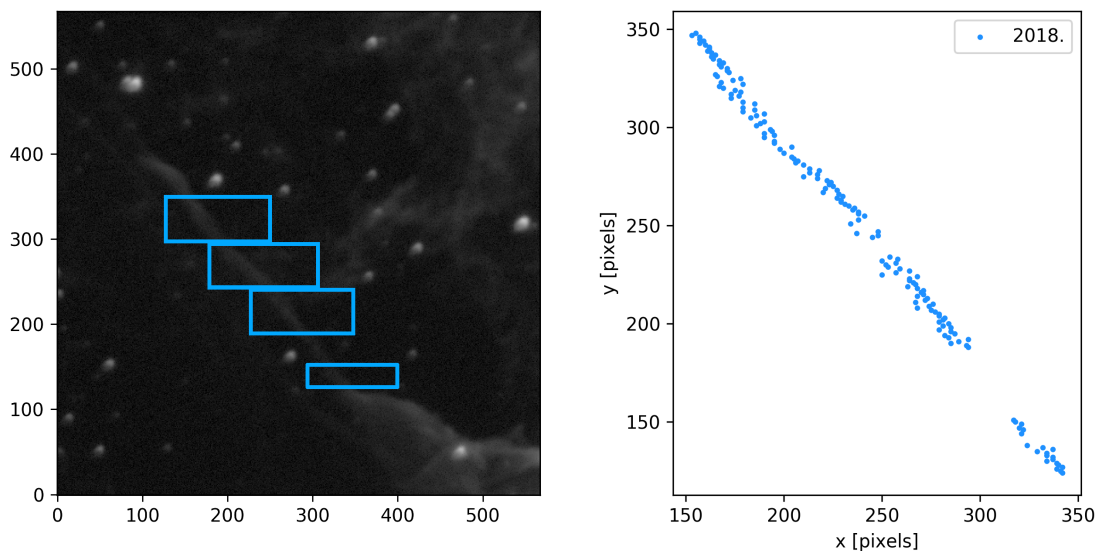
Još jedan razlog za izuzimanje filamenata, u slučaju G6 i H2, bilo je to što se nakon merenja ispostavilo da filamenti značajno odstupaju od linearnosti. Na Slici 8 prikazan je filament G6, čija reprezentacija ima blago talasast oblik. Na kraju, treba skrenuti pažnju i na filamente B6 i H3, koji nisu isključeni, ali za njih dobijene rezultate treba uzeti sa rezervom, pošto imaju značajno manji broj tačaka nego ostali filamenati. Slična situacija javlja se i kod filamenata D4, G7 i H2, međutim oni su svakako isključeni iz daljeg razmatranja zbog prethodno navedenih razloga. U ovom radu nije testirano kako broj tačaka utiče na dobijene rezultate, odnosno nije

¹⁵Ovakva pojava može ukazivati na postojanje takozvanog prekursora (eng. *cosmic-ray precursor*), odnosno kosmičkih zraka koji „beže” iz ostatka supernove i nalaze se ispred udarnog talasa, gde menjaju uslove u međuzvezdanoj sredini.

procenjeno koji bi najmanji broj tačaka bio potreban kako bi merenje sopstvenog kretanja filameta bilo pouzdano. Uticaj broja tačaka deluje kao nešto što je nezgodno testirati, pošto bi vrednosti sopstvenog kretanja verovatno zavisile i od kombinacije toga koliko je filament dobro definisan, i toga koji se delovi filameta „pokrivaju” pri izboru tačaka. Ukoliko se pri smanjenju broja tačaka izuzmu razudjeniji delovi filameta, to će verovatno uticati na mereno sopstveno kretanje, zbog sâmog metoda koja se koristi za merenje.



Slika 7: Primer filameta D2 (levo), koji je izuzet iz daljeg razmatranja zbog prisustva tačaka susednog filameta u skupu tačaka koje reprezentuju filament od interesa (desno).



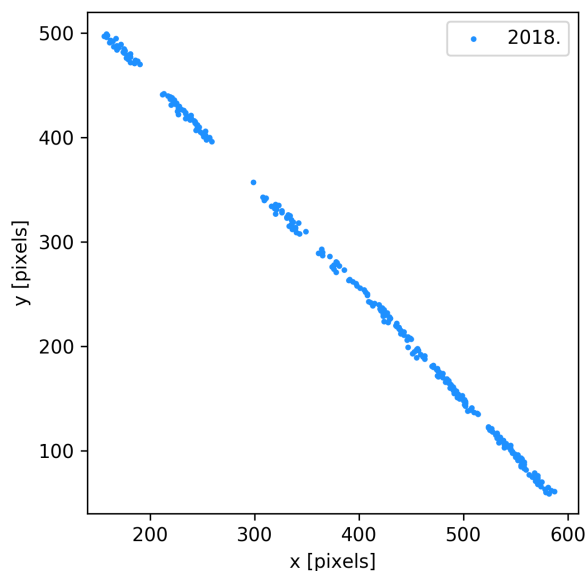
Slika 8: Primer filameta G6 (levo), koji je izuzet iz daljeg razmatranja zbog značajnog odstupanja od linearnosti grafika tačaka koje reprezentuju filament (desno).

Kao što je navedeno u odeljku 3.1, neki filamenti su pre samog merenja rotirani,

kao što je slučaj i sa primerom na Slici 6. Očekivano je da rotiranje snimaka iz obe epohe za isti ugao ne treba značajno da utiče na dobijeni rezultat. Kako bi ta tvrdnja bila proverena, izabran je jedan filament koji je skoro potpuno linearan i vrlo dobro definisan (mala razućdenost tačaka). To je filament C2, prikazan na Slici 9. Merenje sopstvenog kretanja sprovedeno je za osam različitih uglova rotacije i izračunate brzine prikazane su u Tabeli 2. Dobijene vrednosti se kreću u rasponu od 130 km/s do 190 km/s, svaka sa neodređenošću od 20 km/s izračunatom na osnovu neodređenosti sopstvenog kretanja od $0''.176$. Kako je opseg u kome se menjaju brzine veći od neodređenosti pojedinačnih vrednosti, ispostavilo se da pravac duž koga se „preseca” filament pri traženju maksimuma sjaja ipak utiče na dobijeni rezultat, odnosno da su neodređenosti brzina veće od onih dobijenih na osnovu *bootstrap* metode. Stoga je opseg neodređenosti brzine proširen na ± 60 km/s za sve filamente koji nisu isključeni iz daljeg razmatranja, a koji su posebno prikazani u Tabeli 3.

Tabela 2: Vrednosti brzine dobijene za različite uglove rotacije filameta C2 pre merenja sopstvenog kretanja, kao i broj tačaka kojima je filament bio reprezentovan za svaki ugao. Ugao od 40° nije razmatran, kako bi se izbeglo fitovanje prave na filament koji bi u tom slučaju bio skoro potpuno vertikalalan.

Ugao [$^\circ$]	Broj tačaka	v [km/s]	Ugao [$^\circ$]	Broj tačaka	v [km/s]
0	274	140 ± 20	50	451	170 ± 20
10	315	170 ± 20	60	383	160 ± 20
20	397	190 ± 20	70	387	160 ± 20
30	424	190 ± 20	80	304	130 ± 20



Slika 9: Reprezentacija filameta C2, na kome je testirano kako rotacija filameta pre merenja sopstvenog kretanja utiče na dobijenu vrednost brzine.

4.2 Poređenje rezultata sa prethodnim radovima

Dobijeni rezultati su upoređeni sa rezultatima iz radova Salvesena sa saradnicima (Salvesen et al. 2009) i Medine sa saradnicima (Medina et al. 2014). U Tabeli 3 prikazane su vrednosti brzina iz dva pomenuta rada, za dostupne filamente koji su po položaju bliski filamentima merenim u ovom radu. Na slikama u Prilogu 2 prikazani su položaji filamenata merenih u ovom radu, kao i položaji relevantnih filamenata merenih u dva prethodno navedena rada.

U radu Salvesena sa saradnicima izmerene su brzine 18 neradijativnih filamenata u severoistočnom delu ostatka Petlja u Labudu. Delovi filamenata koji su mereni su, pre izuzimanja zvezda, imali dužine od $100''$. Na slikama u Prilogu 2 prikazani su kao zeleni krugovi radijusa $50''$, gde mereni filament približno prolazi kroz centar kruga. Brzine filamenata su određene na osnovu merenja sopstvenih kretanja, poređenjem snimaka iz dve različite epohe, slično kao u ovom radu. Metoda se razlikuje po tome što su filament pre merenja rotirani tako da budu paralelni vertikalnoj osi, tj. da pravac prostiranja udarnog talasa bude paralelan horizontalnoj osi slike. Zatim su vrednosti piksela sabrane po kolonama, za svaku epohu pojedinačno, tako da se za jedan filament dobije po jedan red piksela paralelan horizontalnoj osi, za svaku od dve epohe. Maksimum sjaja u svakom od ova dva reda piksela odgovara položaju filameta duž horizontalne ose u toj epohi. Sopstveno kretanje se dobija na osnovu jednodimenzionalne kros-korelacije ova dva reda piksela, duž horizontalne ose¹⁶.

Opisana metoda isprobana je i u ovom radu, ali pomenuta kros-korelacija nije davala zadovoljavajuće rezultate. Razlog je verovatno to što se veličine piksela na snimcima iz prve i druge epohe značajno razlikuju, što rezultuje time da je profil sjaja filameta duž posmatranog reda piksela nekoliko puta širi u prvoj, u odnosu na drugu epohu. Poređenja radi, veličine piksela su u radu Salvesena sa saradnicima iznosile $1''.7$ i $1''.0$ za prvu i drugu epohu redom, dok su ovde iznosile $2''.0268$ i $0''.176$. U trećoj koloni Tabele 3 dat je naziv bliskog filameta, a u četvrtoj vrednost brzine iz rada Salvesena sa saradnicima. Treba napomenuti da je navedena brzina zapravo procena za gornju granicu brzine, dobijena kombinacijom gornje granice za sopstveno kretanje i gornje granice za udaljenost do ostatka, gde se za udaljenost koristila vrednost od 576 ± 61 pc¹⁷. Kako su u ovom radu brzine određene na osnovu srednje vrednosti sopstvenog kretanja i udaljenosti, gde je korišćena vrednost od 735 ± 25 pc, za potrebe poređenja, brzine iz četvrte kolone pomnožene su sa $735/637$ i na taj način skalirane na udaljenost od 735 pc, što je prikazano u petoj koloni Tabele 3.

U radu Medine sa saradnicima mereni su intenziteti, širine i centriodi uske i široke komponente $H\alpha$ linije¹⁸, za 22 različita položaja na neradijativnim filamentima u severoistočnom delu ostatka. Pri svakom pojedinačnom merenju, optičko vlakno koje pokriva $1''.5$, centrirano je na filametu. Radi poboljšanja odnosa signala prema šumu, za neke bliske položaje posmatranja su grupisana. Nakon poređenja posmatranja sa

¹⁶Neodređenost za sopstveno kretanje se, slično proceduri u ovom radu, dobija na osnovu raspodele sopstvenih kretanja nakon 1000 ponovljenih merenja. Procedura se, osim po broju iteracija, razlikuje i po tome što se, u radu Salvesena sa saradnicima, u svakoj iteraciji iz ukupnog skupa redova piksela nasumično uzorkuje polovina ukupnog broja redova (eng. *subsampling*).

¹⁷Takođe, u sâmom radu nisu navedene neodređenosti za dobijene brzine, pa stoga iste nisu navedene ni u četvrtoj koloni Tabele 3.

¹⁸Merenja su vršena na spektroskopskim posmatranjima sa MMT teleskopa, prečnika 6.5 m (*MMT Observatory, Mount Hopkins, Arizona, USA*)

modelom navedenim u radu, dobijene su brzine za 13 različitih pozicija (filamenata). Bitno je napomenuti da ovakva metoda određivanja brzine filameta ne zavisi od udaljenosti, za razliku od metode korišćene u radu Salvesena sa saradnicima, kao i u ovom radu. Na slikama u Prilogu 2 crvenim tačkama prikazani su položaji originalnih posmatranja pre grupisanja, dok su u šestoj i sedmoj koloni u Tabeli 3 navedeni nazivi i brzine grupisanih posmatranja po položaju bliskih filamentima iz ovog rada.

Tabela 3: Poređenje brzina filamenata odabranih za dalje razmatranje sa brzinama iz prethodnih radova. U drugoj koloni nalazi se izračunata brzina, a u narednim kolonama su, gde je to bilo dostupno, date brzine dobijene za isti ili blizak filament u prethodnim radovima. U trećoj koloni prikazan je naziv bliskog filameta iz rada Salvesena sa saradnicima (Salvesen et al. 2009), u četvrtoj brzina dobijena u tom radu (v_S), a u petoj ista brzina korigovana za novu procenu udaljenosti ($v_{S,kor}$). U šestoj koloni dat je naziv bliskog filameta iz rada Medine sa saradnicima (Medina et al. 2014), gde je u zagradama dat naziv originalnog pojedinačnog posmatranja pre grupisanja, a van zagrada je naziv grupisanog posmatranja. U sedmoj koloni nalazi se brzina koja je dobijna u tom radu nakon grupisanja posmatranja (v_M).

Fil.	v [km/s]	Salvesen et al. 2009			Medina et al. 2014	
		Oznaka filamenta	v_S [km/s]	$v_{S,kor}$ [km/s]	Oznaka filamenta	v_M [km/s]
A1	350 ± 60					
A2	330 ± 60				EWfil (EWfld)	380 ± 4
B1	540 ± 60					
B2	590 ± 60					
B4	500 ± 60				NFil (NFila)	429 ± 22
B5	350 ± 60	5	278	321	S5 (S5c)	376 ± 4
B6	420 ± 60				FUSEB (FUSE5)	414 ± 5
C1	470 ± 60					
C2	180 ± 60					
C3	290 ± 60				FUSEB (FUSE4)	414 ± 5
C4	460 ± 60	6	333	384	S6 (S6a), COS 1	$391 \pm 3, 405 \pm 8$
C5	460 ± 60					
E1	320 ± 60					
E3	280 ± 60	9	294	339	S89 (S9a)	$457 \pm 22, 382 \pm 6$
E4	540 ± 60					
F1	270 ± 60	10	279	322	S10	342 ± 46
F2	260 ± 60	11	254	293		
F3	480 ± 60					
G1	200 ± 60					
G2	300 ± 60					
G3	230 ± 60					
G5	230 ± 60					
H1	110 ± 60					
H3	110 ± 60					

Sa proširenim opsegom neodređenosti, veći deo brzina dobijenih u ovom radu slaže se sa vrednostima za bliske filamente iz prethodnih radova, pri čemu se za poređenje sa vrednostima iz rada Salvesena sa saradnicima koristi peta kolona iz Tabele 3. Neslaganje sa vrednošću iz rada Salvesena sa saradnicima postoji za filament C4. Sâm filament je dobro definisan, tako da se ne može pretpostaviti zbog čega dolazi do neslaganja, odnosno zbog čega je vrednost dobijena u ovom radu mnogo veća od poredbene vrednosti. Za C4 se u radu Medine sa saradnicima mogu naći dva po položaju podjednako bliska posmatranja (S6a i COS 1), čiji se opsezi neodređenosti brzina presecaju. Vrednost dobijena u ovom radu slaže se sa vrednošću za COS 1. Pritom se vrednosti u dva poredbena rada međusobno ne slažu. Neslaganje sa vrednostima dobijenim u radu Medine sa saradnicima javlja se i kod filamenata C3 i E3, koji su takođe dobro definisani, a u slučaju E3 ponovo se javlja neslaganje između dva poredbena rada. U radu Medine sa saradnicima pri merenju se obuhvata značajno manji deo filamena, nego pri merenju u radu Salvesena sa saradnicima, kao i pri merenju u ovom radu. To može biti uzrok većeg broja neslaganja sa vrednostima iz rada Medine sa saradnicima, kao i međusobnog neslaganja poredbenih radova, ukoliko se brzina filamena značajno menja duž posmatrane dužine.

U ovom radu analiziran je značajan broj filamenata, koji je, čak i kada se posmatraju samo selektovana 23 filamena, veći od broja filamenata analiziranih u poredbenim radovima. Od toga su, nažalost, izmerena samo dva radijativna filamena: H1 i H3. To su možda i najbolje definisani filamenti u celokupnom uzorku, što dodatno osigurava činjenicu da su njihove brzine značajno niže od brzina drugih, neradijativnih filamenata.

5 Zaključak

Značaj udarnih talasa u ostacima supernovih ogleda se u mehanizmima za ubrzanje naelektrisanih čestica, čijim se proučavanjem može doprineti objašnjenju porekla kosmičkog zračenja. Sâma brzina udarnog talasa se, na osnovu teorijskih modela, može povezati sa fizičkim parametrima međuzvezdane sredine, koji se dalje mogu odrediti na osnovu poznate brzine, što je takođe značajan aspekt proučavanja ostataka supernovih.

U ovom radu određena je brzina udarnog talasa u Galaktičkom ostatku supernove Petlja u Labudu, na osnovu merenja sopstvenih kretanja filamenata u ostatku, a uz upotrebu nove procene za udaljenost do objekta. Sopstvena kretanja su izmerena poređenjem snimaka ostatka u $H\alpha$ emisiji iz dve različite epohe: 1993. i 2018. godine. Snimci pokrivaju severoistočne delove ostatka. U slučaju prve epohe u pitanju je jedan snimak koji je prethodno bio obrađen, dok se druga epoha sastoji od devet regiona čije je snimke bilo neophodno obraditi. Na kraju obrade snimljeni regioni iz druge epohe su na osnovu nebeskih koordinata poravnati sa odgovarajućim regionima iz prve epohe, nakon čega se moglo pristupiti merenjima sopstvenih kretanja filamenata.

Za merenje su, zbog specifičnosti metode koja je korišćena, odabrani približno linearni filamenti. Za svaki filament su, pre merenja, izdvojeni delovi snimka u kojima nema zvezda ili okolnih filamenata. U tim delovima snimka položaj filamena je, za svaku od dve epohe, reprezentovan skupom tačaka koje predstavljaju maksimume sjaja u svakom redu piksela. Reprezentacije filamenata su naknadno filtrirane iterativnom

metodom, kako bi se otklonile eventualne preostale tačke koje ne pripadaju filamentu i kako bi se dobili bolje definisani filament. Sopstveno kretanje filameta duž (horizontalne) x -ose slike izmereno je kao srednje rastojanje dve reprezentacije filameta. Reprezentacije su zatim fitovane linearnim funkcijama i, na osnovu njihovog srednjeg nagiba, izmereno sopstveno kretanje duž x -ose je projektovano na pravac normalan na filammet. Postupak je ponovljen 10000 puta, uz nasumično uzorkovanje iz skupa tačaka koje reprezentuju filament u svakoj od epoha, kako bi se procenila očekivana vrednost i neodređenost izmerenog sopstvenog kretanja. Analizirano je ukupno 36 filamenata, od čega je njih 13 isključeno iz daljeg razmatranja, na osnovu nekoliko karakteristika uočenih na grafiku reprezentacije filameta: velike razućenosti, nelinearnog oblika ili prisustva tačaka koje pripadaju susednim filamentima.

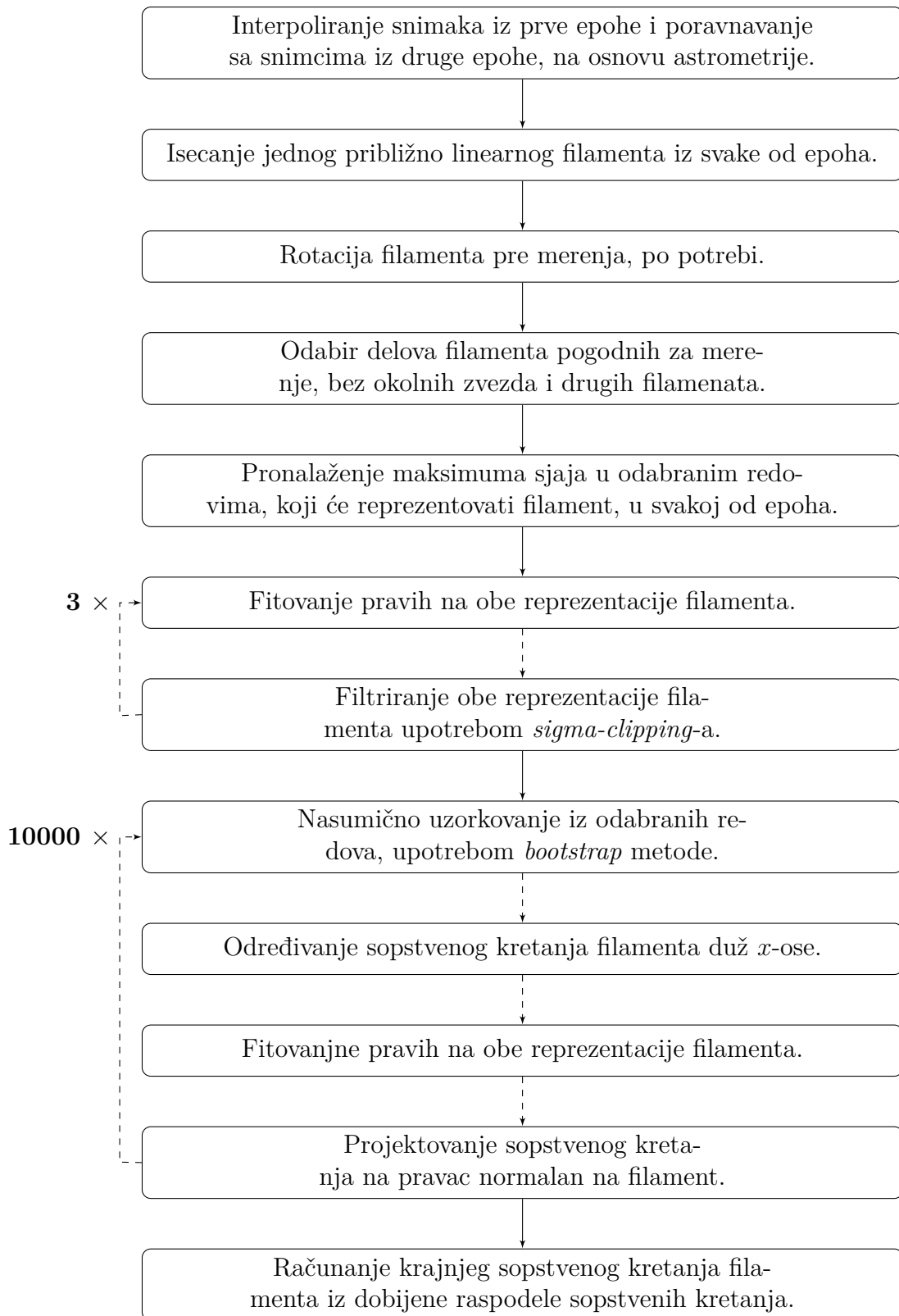
Sa poznatom novom procenom za udaljenost do posmatranog ostatka i izmerenim sopstvenim kretanjima određene su brzine filamenata, kao i njihove neodređenosti, koje su se kretale između 20 km/s i 40 km/s. Neki od filamenata su, radi lakšeg merenja, rotirani za različite uglove pre sâmog merenja. Nakon provere uticaja rotacije na dobijenu vrednost brzine za jedan reprezentativni filament, ispostavilo se da se vrednost brzine menja u opsegu od ± 60 km/s sa promenom orijentacije filameta na slici, odnosno sa promenom pravca duž koga se očitavaju maksimumi sjaja. Stoga su sve prethodno dobijene neodređenosti brzina proširene na ± 60 km/s. Dobijene vrednosti su upoređene sa vrednostima iz prethodnih radova, tamo gde je to bilo moguće, odnosno gde su postojala merenja za bliske položaje u ostatku. Većina njih je u skladu sa prethodnim merenjima, a postoje tri filameta za koja se vrednosti ne slažu, iako su sami filament i dobro definisani. U ovom radu su takođe, na osnovu vidljivosti u [S II] emisiji, prepoznati filament i njihove brzine su upoređene sa brzinama neradijativnih filamenata. Iako su neodređenosti brzina značajno proširene nakon provere uticaja rotacije, vrednosti brzina ova dva radijativna filamenta su uočljivo niže od brzina neradijativnih filamenata, što je u skladu sa očekivanjima.

Prvi korak za dalji rad mogla bi biti provera uticaja rotacije na bar još jednom filamentu, kako bi se neodređenosti dobijenih brzina pouzdanije odredile. U daljem planu je i uraditi još posmatranja filamenata u ostatku Petlja u Labudu, sa posebnim akcentom na radijativne filament, kako bi se dobila pouzdanija potvrda očekivanja da su njihove brzine niže od brzina neradijativnih filamenata. Bilo bi dobro i ispitati koliko se brzina filamenata menja duž posmatrane dužine filameta, na osnovu čega bi se stekao osećaj o tome kolike filamente ima smisla izdvajati za pojedinačna merenja, što je značajano i pri poredenju rezultata iz različitih radova.

U daljem planu je i da se, na osnovu modelovanja X-spektara filamenata za koje su određene brzine, odredi elektronska temperatura iza udarnog talasa. Ova temperatura se onda može uporediti sa vrednošću koja se dobija iz jednačine 2, gde se ne razlikuju elektroni i joni, pa ona predstavlja svojevrsnu srednju temperaturu elektrona i jona. Veliko razilaženje između dve pomenute vrednosti značilo bi da elektroni i joni nisu u temperaturnoj ravnoteži (Vink 2011). Pritom, treba imati u vidu to da se iz posmatranja u X-području neće moći razlučiti strukture veličine pojedinačnih filamenata iz ovog rada, tako da će se procenjene elektronske temperature odnositi na regione veće od pojedinačnih filamenata. Takođe, na osnovu temperatura i brzina može se odrediti odnos gasnog pritiska i pritiska kosmičkog zračenja iza udarnog talasa, što može dati uvid u količinu energije koju ostatak supernove predaje naelektrisanim česticama pri njihovom ubrzavanju (Salvesen et al. 2009).

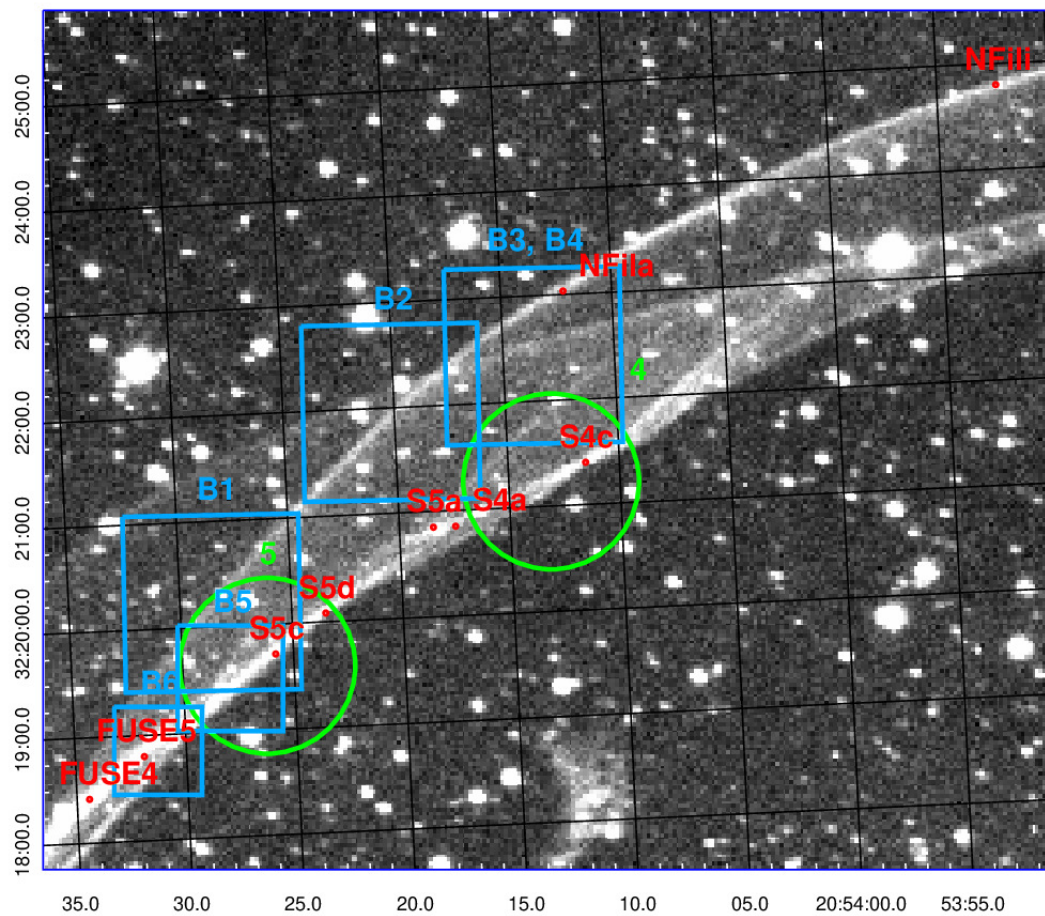
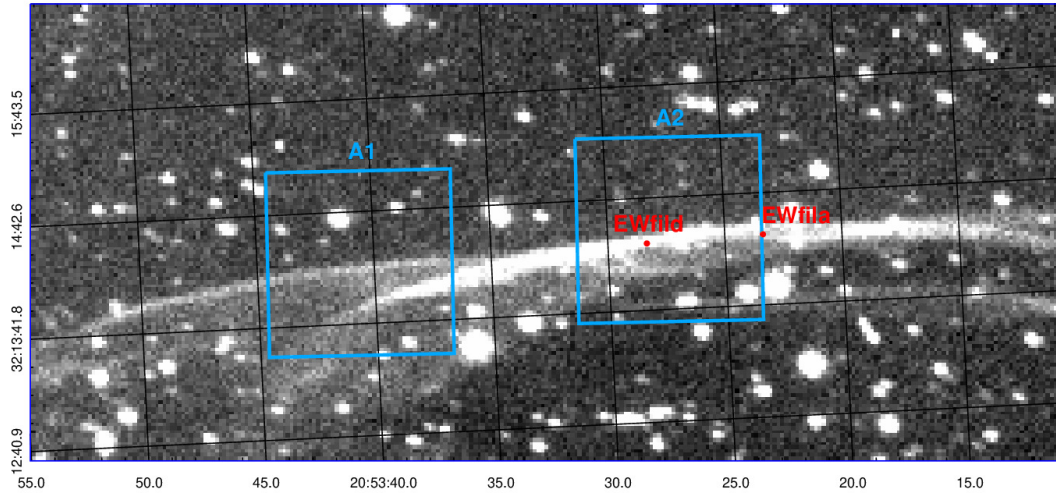
Prilog 1

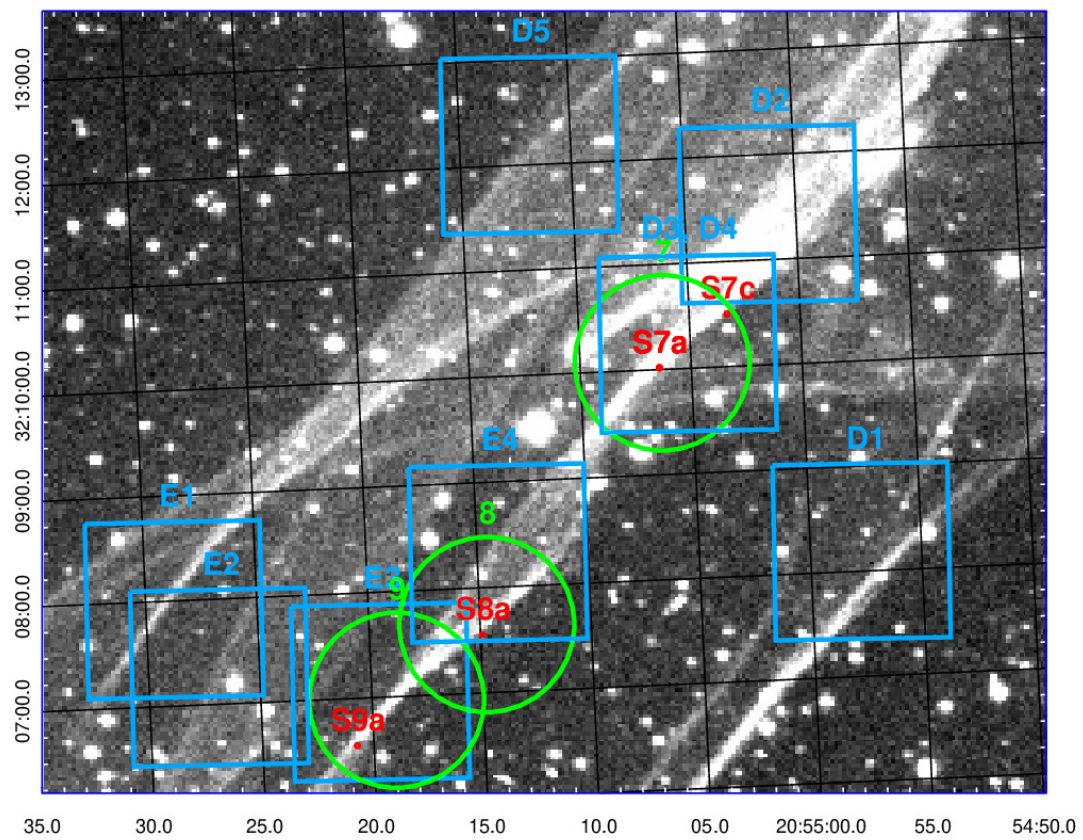
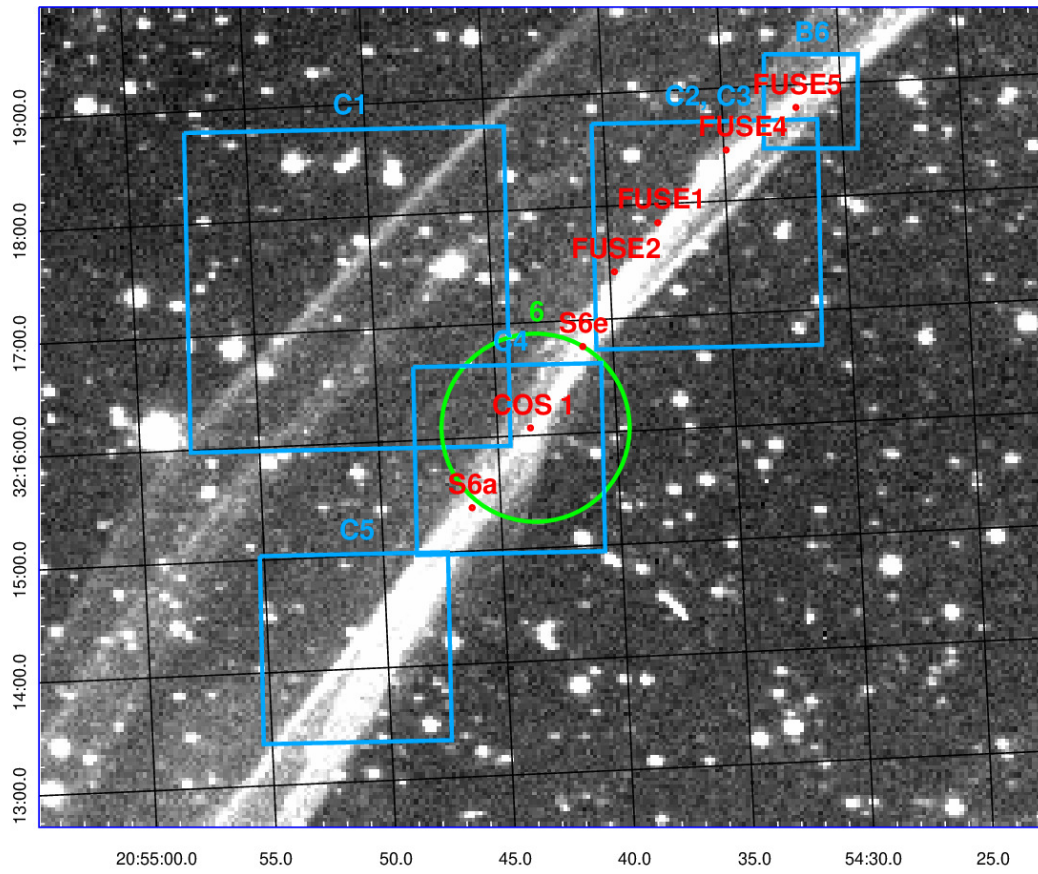
Pomoću naredne šeme prikazan je proces merenja sopstvenih kretanja filamenata.

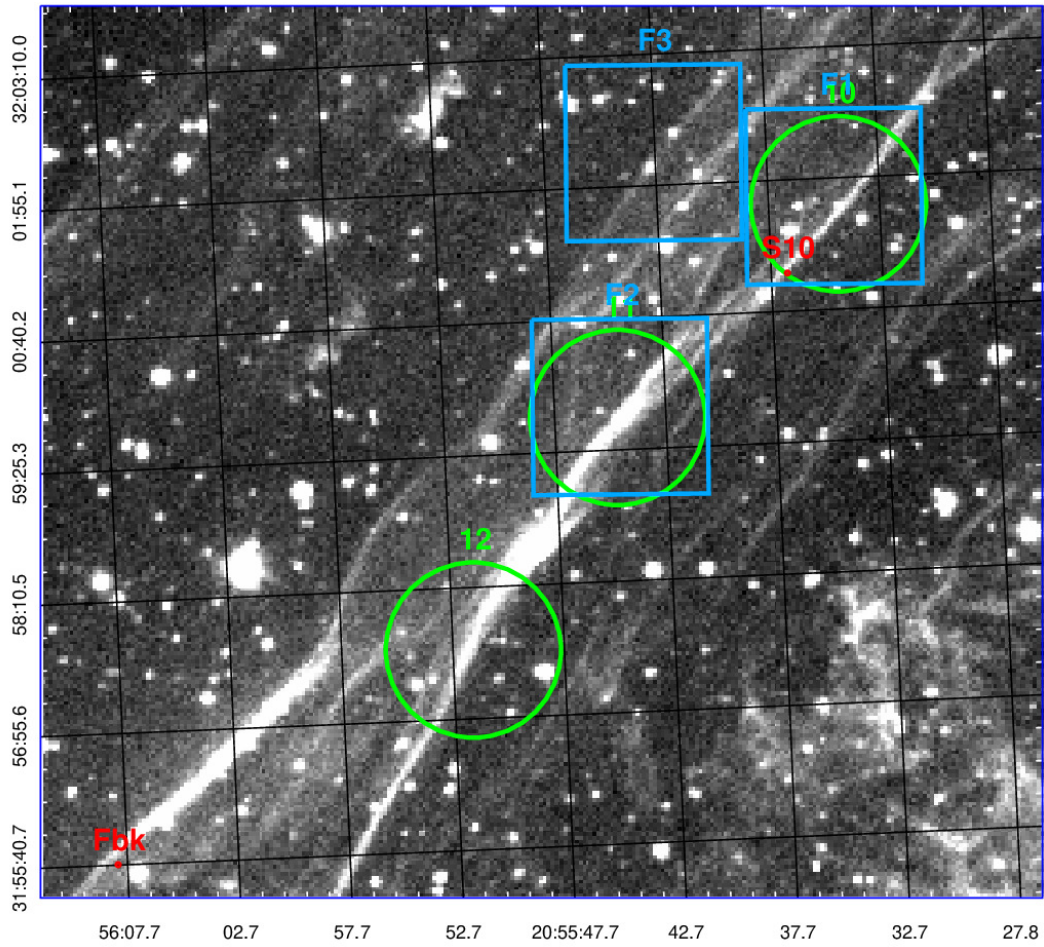


Prilog 2

Na narednim slikama prikazani su položaji merenih filamenata iz ovog rada (plavi kvadrati, najčešće dimenzija $100'' \times 100''$), kao i iz rada Salvesena sa saradnicima (zeleni krugovi radijusa $50''$) i Medine sa saradnicima (crvene tačke). Na x -osi je rektascenzija u časovima, a na y -osi deklinacija u stepenima za epohu J2000.







Literatura

- Balogh A. Treumann R. A. *Physics of Collisionless Shocks Space Plasma Shock Waves*. Springer New York, 2013.
- Blair W. P., Sankrit R., Torres S. I., Chayer P., Danforth C. W. Far ultraviolet spectroscopic explorer observations of kpd 2055 3111, a star behind the cygnus loop. *The Astrophysical Journal*, 692(1):335–345, 2009. doi: 10.1088/0004-637x/692/1/335.
- Craig M., Crawford S., Seifert M., Robitaille T., Sipócz B., Walawender J., Vinícius Z., Ninan J. P., Droettboom M. astropy/ccdproc: v1.3.0.post1, 2017.
- Fesen R. A., Weil K. E., Cisneros I. A., Blair W. P., Raymond J. C. The cygnus loop’s distance, properties, and environment driven morphology. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481(2):1786–1798, 2018. doi: 10.1093/mnras/sty2370.
- Green D. A. A revised catalogue of 294 galactic supernova remnants. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 40(4), 2019. doi: 10.1007/s12036-019-9601-6.
- Hunter J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3):90–95, 2007. doi: 10.1109/MCSE.2007.55.
- Jones E., Oliphant T. E., Peterson P. SciPy: Open source scientific tools for Python, 2001–. URL <http://www.scipy.org/>.
- Medina A. A., Raymond J. C., Edgar R. J., Caldwell N., Fesen R. A., Milisavljevic D. Electron-ion equilibrium and shock precursors in the northeast limb of the cygnus loop. *The Astrophysical Journal*, 791(1):30, 2014. doi: 10.1088/0004-637x/791/1/30.
- Oliphant T. E. *A guide to NumPy*, volume 1. Trelgol Publishing USA, 2006.
- Onić D. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, 2013.
- Price-Whelan A. M., Sipocz B. M., Günther H. M., Lim P. L., Crawford S. M., Conseil S., Shupe D. L., Craig M. W. The astropy project: Building an open-science project and status of the v2.0 core package. *Astronomical Journal*, 156:123, 2018. doi: 10.3847/1538-3881/aabc4f.
- Reynolds S. P. Supernova remnants at high energy. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 46(1):89–126, 2008. doi: 10.1146/annurev.astro.46.060407.145237.
- Salvesen G., Raymond J. C., Edgar R. J. Shock speed, cosmic ray pressure, and gas temperature in the cygnus loop. *The Astrophysical Journal*, 702(1):327–339, 2009. doi: 10.1088/0004-637x/702/1/327.
- Urošević D. Milogradov-Turin J. *Teorijske osnove radio-astronomije*. Matematički fakultet, Beograd, 2007.
- Walt van der S., Schönberger J. L., Nunez-Iglesias J., Boulogne F., Warner J. D., Yager N., Gouillart E., Yu T., contributors the scikit-image . scikit-image: image processing in python. *PeerJ*, 2:e453, 2014. doi: 10.7717/peerj.453.

Vink J. Supernova remnants: The x-ray perspective. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 20(1), 2011. doi: 10.1007/s00159-011-0049-1.

Vučetić M. Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, 2017.