

UNIVERZITET U BEOGRADU
MATEMATIČKI FAKULTET



Jasmina Horvat

SPEKTROSKOPIJA RADIJATIVNIH I
NERADIJATIVNIH FILAMENATA OSTATKA
SUPERNOVE PETLJA U LABUDU U
X-PODRUČJU

master rad

Beograd, 2024.

Mentor:

dr Dušan ONIĆ, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

Članovi komisije:

dr Dejan UROŠEVIĆ, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

dr Milica ANĐELIĆ, naučni saradnik
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

Datum odbrane: _____

Naslov master rada: Spektroskopija radijativnih i neradijativnih filamenata ostatka supernove Petlja u Labudu u X-području

Rezime: Petlja u Labudu je evolutivno stariji Galaktički ostatak supernove koji se širi kroz veoma složenu sredinu. U ovom radu je predstavljena analiza spektara nekoliko optičkih filamenata u X-području. Konkretno, razmatrani su pojedini regioni asocirani sa radijativnim i neradijativnim filamenatima severoistočne oblasti ostatka uz pomoć posmatranja sa svemirske opservatorije *XMM-Newton*. Rezultati potvrđuju da se naizgled povećane zastupljenosti elemenata u slučaju određenog broja filamenata mogu objasniti time što se prilikom opisa spektara koristi neadekvatan model emisije. Naime, ukoliko se uključi i model emisije u linijama usled procesa razmene naelektrisanja, vrednosti zastupljenosti većine elemenata opadaju i teže očekivanim. Do neslaganja dolazi jedino kod silicijuma i sumpora, najverovatnije usled pojednostavljenog modela koji je korišćen u ovom radu. Ipak, može se reći da su rezultati predstavljeni u ovom radu u skladu sa analizom posmatranja veće spektralne rezolucije, ostvarenih pomoću svemirske opservatorije *Suzaku*, koja su pak znatno lošije prostorne rezolucije. Takođe diskutovane su vrednosti elektronske temperature i jonizacione starosti za svaku razmatranu oblast. Jonizaciona starost većine regiona ukazuje da plazma nije u jonizaciono-rekombinacionoj ravnoteži, odnosno da kinetičke temperature elektrona i protona nisu jednake.

Zahvalnica

Autorka ovog rada posebnu zahvalnost duguje mentoru Dušanu Oniću koji je zaslužan za pre svega postojanje ovog master rada, od ideje do realizacije. Koji je ispratio tok ovog rada i bio podrška u prethodne dve godine. Posebnu zahvalnost duguje na prilici da uz njegovu pomoć kao i prof. dr Dejana Uroševića, dr Milice Anđelić i prof. dr Bojana Arbutine prezentuje glavne rezultate ovog rada na konferenciji pod nazivom „Supernova Remnants an odyssey in space after stellar death III ”, koja je održana ove godine na Kritu, Grčka. Takođe zahvaljuje se članovima komisije na izdvojenom vremenu za čitanje ovog malo obimnijeg master rada.

Na kraju dugujem zahvalnost i svom dečku, prijateljima i porodici koji su mi bili velika podrška tokom školovanja.

Biografija autora

Jasmina Horvat - rođena u Kragujevcu 27. maja 1998. godine. Osnovnu školu završila 2013. godine. Pritom sedmi i osmi razred završila u Prvoj kragujevačkoj gimnaziji, kao učenik „Odeljenja obdarenih učenika matematičke gimnazije”. Dalje školovanje nastavlja takođe kao učenik Prve kragujevačke gimnazije „Odeljenja obdarenih učenika matematičke gimnazije”. Po završetku srednje škole 2017. godine upisuje Matematički fakultet Univerziteta u Beogradu, smer astronomija i astrofizika, modul astrofizika, iste godine. Osnovne studije završava 2022. godine sa prosekom 8.55. Nakon završetka osnovnih studija upisuje master studije 2022. na Matematičkom fakultetu, smer astrofizika.

Na trećoj godini studija učestvovala na letnjoj praksi organizovanoj na Astronomskoj opservatoriji u Beogradu u saradnji sa Katedrom za astronomiju Matematičkog fakulteta u Beogradu obrađujući temu „Deep photometry of spiral galaxy NGC 941”, pod mentorstvom Ane Vudragović. Na XIX Srpskoj astronomskoj konferenciji u Beogradu 2020. u okviru poster sesije imala je izlaganje u vidu petominutne prezentacije na temu „Deep photometry of spiral galaxy NGC 941”.

U junu 2024. učestvovala na konferenciji „Supernova Remnants an odyssey in space after stellar death III ” na Kritu, Grčka, gde je imala izlaganje u vidu postera uz kratku jednominutnu prezentaciju, na temu „An XMM-Newton study of several nonradiative filaments in the northeastern rim of the Cygnus Loop ” koja je ujedno prikazivala glavne rezultate dobijene u ovom master radu.

SADRŽAJ

Motivacija za rad	2
1 Posmatranja u X-području	4
1.1 Kolektori X-zračenja	5
1.2 CCD detektori u X-astronomiji	7
1.2.1 Poluprovodnici	7
1.2.2 Koncept rada CCD prijemnika	10
1.3 Obrada posmatranja u X-području	15
1.3.1 Podaci iz arhiva posmatranja	15
1.3.2 Spektri	17
1.3.3 Slike	22
1.4 Analiza posmatranja u X-području	24
1.4.1 Značaj astrostatistike u X-astronomiji	24
1.4.2 Pozadina u X-posmatranjima	31
1.5 Modeli zračenja ostataka supernovih u X-području	35
2 Galaktički ostatak supernove Petlja u Labudu	46
3 Analiza spektara neradijativnih i radijativnih filamenata u X-području	54
3.1 Svemirska opservatorija XMM-Njutn	54
3.1.1 Instrumenti	54
3.1.2 Podaci i softverski alati	58
3.2 Izbor oblasti za analizu	59
3.3 Obrada posmatranja	64
3.3.1 Posmatranje P7 oblasti	64
3.3.2 Posmatranje Pos-1 oblasti	70
3.4 Analiza spektara izabranih regiona iz P7 oblasti	72
3.4.1 Izbor regiona	72

3.4.2	Rezultati i diskusija	75
3.5	Preliminarna analiza spektara izabranih regiona iz Pos-1 oblasti	92
	Zaključak	98
	Planovi za budući rad	99
	Literatura	100

Motivacija za rad

Spektroskopija ostataka supernovih u X-području je veoma važna i aktivna oblast naučnog istraživanja. U slučaju mladih ostataka se pruža mogućnost detaljnog ispitivanja zastupljenosti različitih elemenata u materiji koja je odbačena tokom eksplozije supernove, te tako i provere teorijskih modela nukleosinteze. Kod starijih ostataka mogu se analizirati zastupljenosti elemenata u međuzvezdanoj materiji kroz koju je prošao udarni talas. Naravno, u oba slučaja spektroskopija u X-području omogućava procenu elektronske temperature i koncentracije, te uopšte ispitivanje velikog broja relevantnih fizičkih karakteristika duž konkretne plazme.

Galaktički ostatak supernove Petlja u Labudu je evolutivno stariji ostatak koji se prostire kroz veoma kompleksnu sredinu. Kako bi se odredile vrednosti brzina udarnih talasa u ostatku Petlja u Labudu, nedavno su korišćena merenja sopstvenih kretanja pojedinih filamenata sa severoistočnog dela ostatka, uz najnoviju procenu udaljenosti [43, 69]. Merene su i upoređivane brzine neradijativnih i radijativnih filamenata.

Proučavanje pomenutih filamenata je od velikog značaja pri istraživanju fizike bezsudarnih udarnih talasa. U tom smislu je u ovom radu osnovna zamisao bila da se dodatno analiziraju filamenati razmatrani u [43, 69]. Konkretno, želja je bila da se diskutuju njihovi spektri u X-području, na osnovu posmatranja ostvarenih pomoću svemirske opservatorije XMM-Njutn.

Dodatno, pored naučnog dela ovog rada, ideja je bila da se na jednom mestu, svi zainteresovani mogu upoznati sa problematikom redukcije i analize astronomskih posmatranja u X-području. Po cenu većeg obima, bila je želja da ovaj rad sadrži i uvod u posmatračku X-astronomiju (poglavlje 1), jer nedostaje literatura o toj tematici na našem jeziku.

Glava 1

Posmatranja u X-području

Zemljina atmosfera je potpuno neprozračna za X-zračenje iz Vasiona, odnosno uspešno ga apsorbuje. Iz tog razloga je neophodna upotreba svemirskih opservatorija, za astronomska posmatranja u X-području. Za razliku od detektora koji se koriste prilikom proučavanja npr. vidljive svetlosti, prijemnici u X-području podrazumevaju merenje veoma malog odbroja (eng. counts) pojedinačnih fotona (eng. photon-counting), pa su slični instrumentima koji se koriste u nuklearnoj fizici. Na visokim energijama najviše dolazi do izražaja čestična priroda elektromagnetnog zračenja. U X-astronomiji je tako uobičajeno da se, umesto talasnih dužina i frekvencija, koriste energije fotona, uglavnom izražene u elektronvoltima (važi da je $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$). Jednom nanometru talasne dužine fotona odgovara energija od oko 1.24 keV . U zavisnosti od energije može se govoriti o mekom i tvrdom X-zračenju. Pod mekim ili slabim X-zračenjem se podrazumevaju fotoni energija, veoma grubo između $0.1 - 1 \text{ keV}$, dok više energije između $10 - 100 \text{ keV}$ odgovaraju tvrdom X-zračenju.

Osnovni podaci koji slede iz posmatranja su obeležja registrovanih fotona (energija E , vreme prijema t , pravac na nebu (x, y) , bilo u koordinatnom sistemu vezanom za sam detektor ili u astronomskim koordinatnim sistemima). Sami podaci se tako mogu tretirati kao tačke u četvorodimenzionom prostoru (E, t, x, y) . Nakon specifične redukcije posmatranja, moguće je projektovati takav $4D$ prostor na $1D$ ili $2D$ podprostore, grupisati (binovati) podatke i tako dobiti spektre, krive sjaja (vremenske serije) ili slike. Dakle, istaknimo još jednom da posmatranjima u X-području beležimo informacije o energiji, vremenu prijema i pravaca iz kojih stižu fotoni, a sa liste svih ostvarenih detekcija (eng. *event list*). Kao što je rečeno, iz takve liste se npr. mogu

izvući informacije o prostornoj raspodeli $N(x, y)$ - slike, $N(t)$ - krivi sjaja, te $N(E)$ - spektru. Svaka od pomenutih procedura podrazumeva konkretnu kalibraciju, te informacije o odzivu čitavog raspoloživog instrumentarijuma. U tom smislu, pored samih podataka o fotonima poreklom sa razmatranog izvora, potrebni su dodatni, kalibracioni podaci, o čemu će biti više reči kasnije.

1.1 Kolektori X-zračenja

Zbog veoma visokih energija fotona u X-području, neophodno je koristiti drugačije kolektore nego u npr. vidljivom području. Naime, kolektori, pre svega za meko X-područje koriste refleksiju pod malim uglom (eng. *grazing incidence*). Precizno oblikovane površine ogledala se postavljaju skoro paralelno upadnim zracima. Upadni i reflektovani zrak bi trebalo da zaklapaju ugao sa normalom na veoma glatku površinu koji je veći ili jednak 89 stepeni (zgodno je napraviti analogiju sa zarivanjem metka u zid, sa jedne, te rikošetom sa druge strane). Ovakav vid reflektora daje dobre rezultate za tvrde X-zrake do oko približno 10 – 15 keV. Uglavnom se koriste materijali kao što je zlato, platina i iridijum, zbog dobre sposobnosti refleksije fotona u X-području.

Pojasnimo gore navedeno, malo formalnije. Indeks prelamanja se obično može predstaviti u sledećem obliku:

$$n = 1 - \delta + i\beta, \quad (1.1)$$

pri čemu realni deo, δ , prethodnog izraza opisuje proces refrakcije, odnosno prelamanja, dok imaginarni deo izraza, β , apsorpciju u materijalnoj sredini. Za fotone iz X-područja oba člana imaju veoma male vrednosti. Po tzv. Sneljusovom¹ zakonu prelamanja (refrakcije), za upadni zrak, određen uglom α_{up} u odnosu na normalu na graničnu površ između dve sredine sa različitim optičkim svojstvima, te indeksima prelamanja n_1 i n_2 i za tzv. prelomljeni zrak, određen uglom α_{pr} u odnosu na normalu na pomenutu graničnu površ, važi:

$$\frac{\sin \alpha_{\text{up}}}{\sin \alpha_{\text{pr}}} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1.2)$$

Dakle, podrazumeva se skokovita promena u indeksu prelamanja. Neka je prva sredina vakuum sa $n_1 = 1$, a druga, materijalna sredina instrumenta

¹hol. *Willebrord Snell van Royen (Snellius)*, 1580 – 1626.

se opisuje pomoću n_2 koje je blisko jedinici. Za totalnu refleksiju je onda neophodno da $\alpha_{\text{pr}} > 90^\circ$, pa uz definiciju tzv. kritičnog ugla $\theta_{\text{kr}} = 90^\circ - \alpha_{\text{up}}$ sledi relacija $\cos \theta_{\text{kr}} = n_2$. Dakle, refleksija X-zraka je moguća samo za velike upadne uglove (male u odnosu na graničnu površinu). Ispostavlja se da je:

$$\theta_{\text{kr}} \propto \sqrt{\rho}/E, \quad (1.3)$$

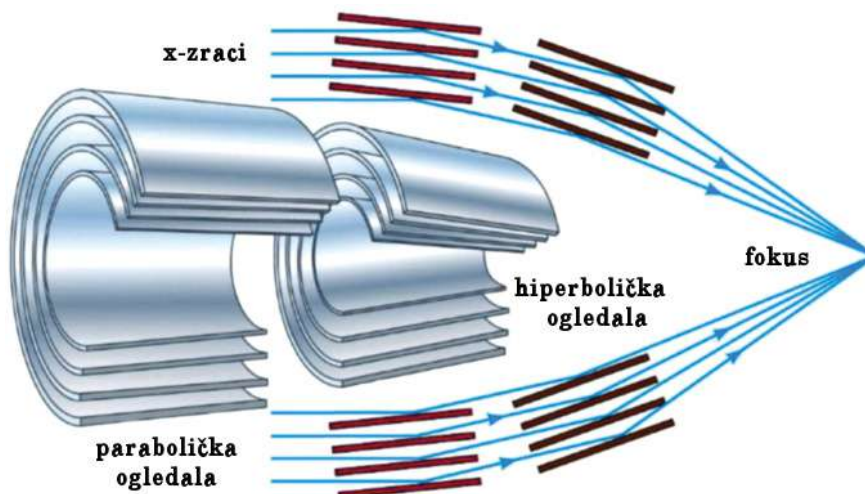
gde je ρ gustina materijalne sredine, a E energija fotona [19]. Kada je reč o energijama X-fotona do nekoliko stotina kiloelektronvolta, dominantna interakcija elektromagnetnog zračenja sa materijom je putem fotoelektrične apsorpcije. Efikasni presek (verovatnoća) za tu vrstu procesa je:

$$\sigma_{\text{fa}} \propto Z^n/E^3, \quad (1.4)$$

gde je Z redni broj atoma, a $n = 4 - 5$ [19].

Hans Volter (nem. *Hans Wolter*, 1911 – 1978) je pedesetih godina dvadesetog veka razvio takve reflektorske sisteme (kolektore), koristeći obrtne površi konusnih preseka kao ogledala sa fokusom, tj. ogledala (kolektora) reflektorskog tipa. Dakle, kolektori su konstruisani kombinacijom ogledala koja su, uopšte segmenti paraboloida, hiperboloida i elipsoida. U zavisnosti koja se kombinacija ogledala koristi obično se izdvajaju tri tipa Volterovih kolektora. Fokusiranje X-zraka u žižu se postiže uzastopnim refleksijama. Kada je ugao koji zaklapa upadni X-zrak sa normalom na površinu blizu devedeset stepeni, refleksija zračenja sa glatke površine nekih materijala je relativno velika. Ugao između ogledala i zračenja mora da bude mali: manje od dva stepena za X-zrake od 1 keV, manje od 0.6 stepeni za X-zrake od 10 keV, odnosno manje od 0.1 stepen za X-zrake od 100 keV.

Radi povećanja efektivne površine prave se višestruka ogledala istih oblika ali različitih dimenzija koja se uklapaju u jednu celinu (eng. *nested mirrors*). U sredini takvog ogledalskog sistema nalazi se disk koji štiti detektor od nefokusiranih upadnih zraka. U okviru svemirske opservatorije XMM-Njutn (eng. *X-ray Multi-Mirror-Newton Observatory*) kolektor X-zračenja se npr. sastoji od 58 slojeva ogledala Volterovog prvog tipa. Reč je o kombinaciji dva ogledala koje čine prstenovi (segmenti) paraboloida i hiperboloida, tako da se lik nebeskog tela stvara u fokusu hiperboloida, odbijanjem zračenja sa unutrašnje strane segmenta (videti sliku 1.1). Iz tog razloga su ogledala Volterovog prvog tipa pogodna za konstrukciju višestrukih uklopljenih ogledalskih sistema (za više detalja videti npr. poglavlje 6 u [62]).



Slika 1.1: Skica uklopljenih ogledala Volterovog prvog tipa (prema [37]).

1.2 CCD detektori u X-astronomiji

Razumevanje osnovnih principa rada CCD prijelnika je veoma važno za valjanu interpretaciju posmatračkih podataka (za više detalja videti npr. [29]). U X-astronomiji CCD detektori se uglavnom koriste za meko X-zračenje i dizajn im je sličan onima koji se koriste u optičkoj astronomiji. Mnoge savremene svemirske opservatorije za posmatranja u X-području koriste CCD prijelnike.

1.2.1 Poluprovodnici

Za detekciju mekog X-zračenja se mogu koristiti različite varijante CCD (eng. *charge-coupled device*) prijelnika. Ovi uređaji su prevashodno konstruisani od poluprovodnika. U tom smislu ćemo se, najpre podsetiti nekih, najvažnijih rezultata fizike čvrstog stanja, koji su relevantni za razmatranje poluprovodničke elektronike.

Kod izolovanih atoma bilo je dovoljno da se razmatra raspodela elektrona po energijskim nivoima koji im stoje na raspolaganju u svojevrsnoj potencijalnoj jami konačne dubine, prouzrokovanoj privlačnim dejstvom pozitivno naelektrisanog jezgra. U slučaju čvrstog stanja, pozitivni joni su raspoređeni

u čvorovima kristalne rešetke, te formiraju periodičan potencijal u kojem se elektroni kreću². Dodatno, rastojanja između jona u čvorovima kristalne rešetke su reda veličine samih jona, pa međusobna interakcija jona nije zanemariva.

Pojednostavljeni prikaz energijskih nivoa kod izolovanog atoma se tako bitno komplikuje kod čvrstog stanja. Naime, pojavljuje se niz nivoa sa veoma bliskim vrednostima energije koji obrazuju tzv. energijske zone, različitih širina (u energijskim jedinicama). Ta širina, sa jedne strane zavisi o udaljenosti jona u kristalnoj rešetki, a i raste sa povećanjem udaljenosti od atomskog jezgra. Dakle, u čvrstom stanju elektronima su dostupni konkretni, dozvoljeni intervali energija, tzv. dozvoljene energijske zone. Između energijskih zona, koje se mogu popunjavati elektronima, nalaze se tzv. zabranjene zone. Zabranjene zone (tzv. energijski procepi) obuhvataju sve one vrednosti energije koje elektroni, u konkretnim vezanim stanjima, ne mogu imati. Veličina procepa između dozvoljenih zona, kao i popunjenost nižih zona elektronima utvrđuje da li je reč o provodnicima, poluprovodnicima ili izolatorima.

Analogno poslednjim, delimično popunjenim energijskim nivoima pojedinačnih atoma, tzv. valentnim nivoima, kod čvrstog stanja se govori o tzv. valentnim zonama. Iznad valentne zone postoji zona sastavljena od energijskih nivoa u kojima se elektroni mogu naći kada pređu u međuatomski prostor. To je provodna zona. Kako je valentni nivo u pojedinačnim atomima samo delimično popunjen (osim kod inertnih gasova), i valentna zona kristala je samo delimično popunjena elektronima. U provodnoj zoni, odnosno međuatomskom prostoru se nalaze samo oni elektroni koji su jonizovani. Da bi napustili svoje atome elektroni moraju da savladaju zabranjenu zonu između valentne i provodne zone, odnosno da dobiju energiju veću od širine zabranjene zone. Kod metala je širina zabranjene zone reda 0.1 eV, pa je jasno da npr. osvetljavanje vidljivim fotonima (koji imaju energije reda nekoliko elektronvolta) dovodi do toga da se u provodnoj zoni nađe veliki broj elektrona. Zato su metali dobri provodnici. Širina zabranjene zone kod poluprovodnika je reda 1 eV, a kod izolatora 10 eV. Uopšte, za elektrone u čvrstom stanju su svojstveni kako međuzonski, tako i unutarzonski prelazi.

Prilikom apsorpcije nekog fotona dolazi do stvaranja parova elektron-

²Inače, kvanti toplotnog oscilovanja jona u čvorovima kristalne rešetke nazivaju se fononi (energija oscilovanja je kvantovana), a može se reći da se elektroni kao de Brojjevi talasi rasejavaju na fononima, tj. da je električni otpor posledica elektron-fonon interakcije.

šupljina. Zapravo, na mestu koje je napustio elektron, koje se formalno naziva šupljina, preovladava pozitivno naelektrisanje jezgra (pozitivne kvazi-čestice). Kako je težnja atoma, koji je izgubio svoj valentni elektron, da ga vrati jako izražena, može se lako desiti da neki od valentnih elektrona iz nekog od susednih atoma pređe u tu šupljinu. Tako se šupljina premestila u taj susedni atom iz koga je elektron došao, što i šupljine kao pozitivne kvazi-čestice ubraja, zajedno sa slobodnim elektronima u slobodne nosioce struje u poluprovodniku.

Najčešće upotrebljavani poluprovodnici u elektronici su silicijum i germanijum. Širina zabranjene zone kod silicijuma je 1.1 eV, a kod germanijuma 0.72 eV. U čistom poluprovodniku broj slobodnih elektrona u provodnoj zoni je uvek jednak broju šupljina u valentnoj zoni. Ipak, postoje poluprovodnici sa viškom slobodnih elektrona u odnosu na broj šupljina. To je n-tip poluprovodnika. Tu su i poluprovodnici sa sa viškom šupljina u odnosu na broj slobodnih elektrona, odnosno p-tip poluprovodnika. To se veštački može postići tzv. procesom dopiranja, kada se u poluprovodnik unose odgovarajuće primese (nečistoće). Naime, provodnost poluprovodnika zavisi i od temperature i od prisustva tzv. nečistoća. Postupkom dopiranja je moguće veštački uneti nečistoće kako bi se promenile osobine poluprovodnika. Dakle, provodljivost poluprovodnika kao što su silicijum i germanijum (elementi grupe 14, sa četiri valentna elektrona, ugljenikova grupa IV, npr. ugljenik C, silicijum Si, germanijum Ge, kalaj Sn, olovo Pb) može se regulisati dodavanjem primesa, odnosno atoma 13. (Borova grupa III, sa tri valentna elektrona, npr. B, Al, Ga, In) i 15. grupe (Azotova grupa V, sa pet valentnih elektrona, npr. azot N, fosfor P, arsen As, antimon Sb). Dodavanjem petovalentnog elementa se povećava broj slobodnih elektrona u poluprovodniku. Razmotrimo primer silicijuma. Atom silicijuma ima četiri valentna elektrona, od kojih je u čvrstom stanju svaki vezan sa jednim od četiri valentna elektrona susednog atoma silicijuma. Ako se u kristalnu rešetku umesto nekog atoma silicijuma ugradi (dopira) atom sa pet valentnih elektrona, tada će pored četiri vezana sa elektronima drugog atoma, ostati jedan slobodni elektron koji lako prelazi u provodnu zonu. Ovako se dobijaju slobodni elektroni bez kreiranja šupljina, pa raste broj elektrona u odnosu na broj šupljina, te nastaju poluprovodnici n-tipa. Konkretnije, zamenom malog broja atoma silicijuma sa fosforom, doboja se n-tip poluprovodnika sa viškom slobodnih elektrona. Slično se može dobiti i p-tip poluprovodnika, sa viškom slobodnih šupljina. Dakle, dopiranje sa npr. borom dovešće do poluprovodnika p-tipa.

Kombinacijom n i p-tipa poluprovodnika mogu se praviti strukture koje

propuštaju struju u nekom pravcu u zavisnosti od polariteta primenjenog napona. Koncentracija slobodnih elektrona u poluprovodniku n-tipa je veća nego u poluprovodniku p-tipa, pa postoji težnja da se ona difuzijom izjednači sa obe strane spoja. Difuzijom slobodni elektroni napuštaju n-oblast, a slobodne šupljine difunduju iz p-oblasti. Između p i n-oblasti nastaje kontaktna razlika potencijala. Tako nastaje unutrašnje električno polje usmereno od n prema p-oblasti. To lokalno polje koči dalju difuziju kroz graničnu površinu. Primenom spoljašnjeg električnog polja mogu se menjati svojstva p-n spoja (u zavisnosti da li je p ili n-oblast priključena na pozitivan ili negativan pol električnog izvora; npr. ispravljačko dejstvo poluprovodničke diode).

1.2.2 Koncept rada CCD prijemnika

CCD detektori koriste specifična svojstva poluprovodnika. Veoma grubo rečeno, fotoni u X-području unutrašnjim fotoefektom oslobađaju elektrone koji se zatim, na odgovarajući način čuvaju, pa se tako dobija informacija o broju fotona. Dakle, princip rada CCD prijemnika se zasniva na fotoelektričnoj apsorpciji ili unutrašnjem fotoefektu X-fotona u poluprovodniku, najčešće sačinjenom od silicijuma³. Dok putuje kroz poluprovodnik, postoji konačna verovatnoća da X-foton bude apsorbovan, pa se može i govoriti o srednjoj dubini penetracije fotona u poluprovodnik, pre apsorpcije. Na osnovu toga je moguće odrediti optimalni interval energija X-fotona koji se mogu detektovati CCD prijemnicima (od nekoliko stotina elektronvolta, do reda deset kiloelektronvolta). Dok će fotoni manjih energija biti potpuno ili delimično apsorbovani u materijalu ispred aktivnog dela detektora, fotoni većih energija će proći kroz aktivnu oblast bez interakcije.

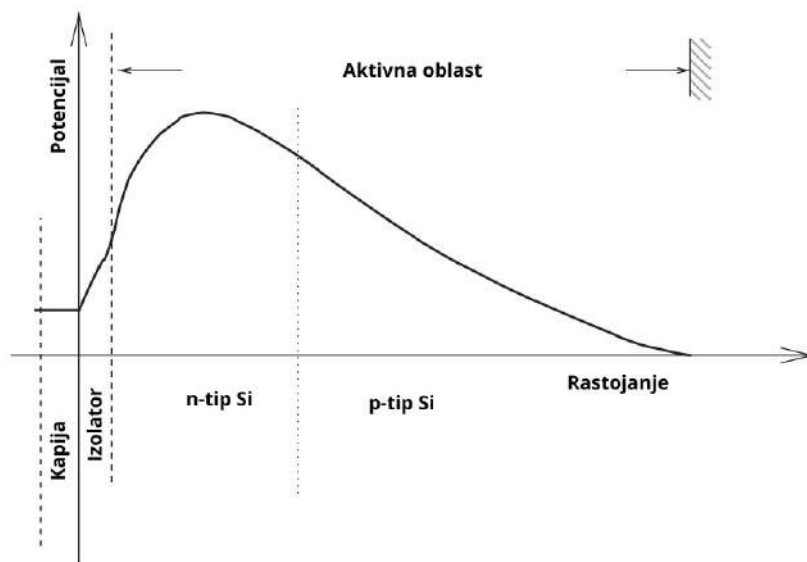
U srednjem, broj oslobođenih elektrona N_e je linearna funkcija energije upadnog fotona E :

$$N_e = \frac{E}{w},$$

gde je w energija jonizacije neophodna da se stvori par elektron-šupljina. Za silicijum na tipičnoj temperaturi CCD detektora u X-astronomiji, w je oko 3.7eV po elektronu, pa će jedan X-foton stvoriti, grubo između deset i hiljadu elektrona. Ovako stvoren oblak naelektrisanja difunduje kroz materijal i na kraju se spontano rekombinuje. Ipak, uz pomoć dodatnog električnog polja, naelektrisanja mogu driftovati u nekom pravcu.

³Neophodna su odgovarajuća hlađenja detektora kako bi se termalna ekscitacija elektrona svela na minimum.

CCD čip se može opisati kao niz povezanih kondenzatora [3, 22]. Dakle, osnovni element CCD detektora je svojevrsni kondenzator koji praktično može biti različito realizovan. Najčešće su u upotrebi varijante metal-oksid-poluprovodnik (tzv. MOS) strukture (tzv. MOS CCD kamere) koje služe za sakupljanje i skladištenje naelektrisanja [62]. U slučaju MOS strukture, uglavnom je jedna provodna ploča (elektroda) kondenzatora poluprovodnička, a druga, metalna (npr. aluminijumska) ploča je odvojena slojem silicijum-dioksida (oksida; izolatora). Ta druga ploča (elektroda) se naziva kapija. Danas se umesto aluminijumske kapije uglavnom koristi sloj veoma dopirano silicijuma. Ipak, naziv MOS je ostao u upotrebi, a sreće se i termin MIS (eng. *metal-insulator-semiconductor*). Dakle, najjednostavnija MOS struktura se sastoji od metalne kapije odvojene od p-poluprovodnika izolatorom. Ako se primeni pozitivan napon na kapiju, dolazi do driftovanja slobodnih šupljina iz donjeg, p-sloja, te se stvara svojevrsna potencijalna jama u poluprovodniku. Ukoliko se u toj, aktivnoj oblasti (koju su napustile šupljine; eng. *depletion region*) stvori par elektron-šupljina usled unutrašnjeg fotoefekta, elektroni će moći da se sakupe u toj potencijalnoj jami. Ipak, obično se iz praktičnih razloga dodaje i sloj poluprovodnika n-tipa između p-tipa i oksida. Tako se zapravo postiže da se najdublja oblast potencijalne jame pomeri dalje od izolatora kako bi se elektroni mogli kvalitetnije sakupiti [3]. Zapravo, maksimum električnog potencijala se dostiže unutar n-sloja, i to je mesto gde se sakupljaju fotoelektroni (šematski prikaz dat je na slici 1.2). Neke od CCD kamera u okviru svemirske opservatorije XMM-Njutn su upravo MOS tipa, na primer tzv. EPIC MOS kamere (eng. *European Photon Imaging Camera*, EPIC).



Slika 1.2: Šematski prikaz elektrostatickog potencijala u CCD-u. X-zraci koji interaguju u aktivnoj oblasti stvaraju elektrone koji se prikupljaju u potencijalnoj jami, prema [3]).

Najčešće su u upotrebi tzv. trofazni CCD čipovi sa tri kapije koje definišu jednu dimenziju svakog pojedinačnog piksela (eng. *picture element*). Centralna kapija je dovedena na pozitivni potencijal, dok su ostale obično na nižem potencijalu, pa se ponašaju kao svojevrstne potencijalne barijere. Tako se ističe duboka potencijalna jama ispod centralne kapije unutar poluprovodnika, gde se sakupljaju svi (foto)elektroni, te se pravi paket naelektrisanja. Granica piksela je sa jedne strane određena graničnim elektrodama, a sa druge strane sa fizičkom granicom u vidu izolatora. CCD detektor tako predstavlja matricu piksela (fotoosetljivih elemenata).

Dakle, primenom električnog polja sakupljaju se nosioci naelektrisanja (obično elektroni) i čuvaju se u tzv. pikselima. Svaki piksel je povezan sa sledećim i moguće je izvršiti transfer naelektrisanja sa jednog na drugi, sve do pojačivača, dela elektronike zaslužne za očitavanje, odnosno analogno/digitalnu (A/D) konverziju. Tokom procesa očitavanja menja se napon na elektrodama tako da se omogući transfer naelektrisanja od piksela do piksela. Rezultat se predstavlja preko odbroja⁴ (eng. *counts*, *Data Numbers DN*,

⁴Krajnje pojednostavljeno rečeno, kuloni se najpre konvertuju u volte, pa volti u odbroj (ADU ili DN).

Analog-to-Digital Units ADUs).

Kvantna efikasnost predstavlja broj detektovanih prema broju upadnih fotona⁵. Frontalno (spreda, preko elektroda) osvetljeni CCD prijemnici se jednostavnije izrađuju i uopšte imaju manji nivo pozadine ali obično i relativno nisku kvantnu efikasnost. Sa druge strane, stanjeni pozadinski CCD detektori su osvetljeni sa zadnje strane i stanjeni da se umanjuje apsorpcija van aktivne oblasti detekcije, što je posebno značajno za posmatranje mekog X-zračenja. Takve kamere se teže izrađuju ali imaju veću kvantnu efikasnost i energijsku rezoluciju.

Pomenimo, samo ukratko, na ovom mestu da su u slučaju prijemnika X-zračenja u savremenoj upotrebi i različite praktične realizacije specijalnih p-n CCD kamera (za detalje videti poglavlje 7.3.1 iz [62]). Takav je slučaj sa npr. EPIC PN kamerom u okviru opservatorije XMM-Njutn ili kamere instrumenta eROSITA (eng. *extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array*) u okviru svemirske opservatorije SRG (eng. *Spectrum-Roentgen-Gamma, Spekttr-RG, SRG, SXG*). Pomenute kamere su zapravo, uglavnom pozadinski osvetljeni, trofazni CCD prijemnici, kod kojih se, originalnom kombinacijom poluprovodnika n i p-tipa postiže veoma široka (debela) aktivna oblast bez potrebe za stanjivanjem.

Recimo još, na ovom mestu i to da se savremeni CCD prijemnici u X-astronomiji uglavnom sastoje od jedne aktivne (fotoosetljive) oblasti u kojoj se sakupljaju fotoni (eng. *image section*) i jedne specijalne zone za skladištenje podataka (eng. *framestore section*), koja je zaštićena posebnim neprozračnim slojem (npr. od aluminijuma) kako bi se sprečila interakcija sa X-fotonima tokom procesa skladištenja i očitavanja (eng. *frame-transfer CCDs*). Ideja je da se prikupljeno naelektrisanje iz aktivne oblasti najpre, veoma brzo (reda milisekunde) prebaci u zonu za skladištenje, te da se zatim polako i efikasno očitava. Na taj način je omogućeno i da se prikupljaju fotoni tokom očitavanja naelektrisanja iz prethodne ekspozicije. Jedna mana ovakvog tipa kamera je to što je zbog postojanja zone skladištenja potrebna mnogo veća površina CCD čipa, od koje je samo oko pola aktivna oblast.

CCD uređaji se postavljaju u žižnu ravan teleskopa. Jedan CCD je uglavnom nedovoljan da pokrije celo vidno polje (eng. *field of view, FOV*), pa se u praksi prave složeniji sistemi od po nekoliko CCD detektora.

⁵Kvantna efikasnost se može predstaviti kao proizvod verovatnoće transmisije kroz neaktivne delove instrumentarijuma (kapije, izolatore, i sl) i verovatnoće apsorpcije X-fotona u aktivnoj oblasti.

Specifičan način detekcije nalaže da se CCD kamere moraju hladiti posebnim tehnikama do temperatura koje idu i do reda $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ [42]. U tom smislu su CCD uređaji najčešće najhladniji delovi svemirskih opservatorija. Kontaminacija kamere nagomilavanjem (kondenzacijom) različitog materijala (sitnih čestica) na hladnu površinu detektora stvara još jedan, neaktivni sloj. Tako su gubici signala povećani usled verovatnije apsorpcije X-zračenja u neaktivnim delovima kamere. To posebno dolazi do izražaja za energije manje od 1 keV. Skrenimo pažnju i na to da su mogući sudari svemirske opservatorije sa većim česticama međuplanetarne prašine (dimenzija reda mikrona) što u velikoj meri može otežati rad i/ili oštetiti instrumente.

Neefikasnost u transportu naelektrisanja je čest problem kod CCD uređaja. Naprosto, tokom transporta (očitanja) moguće je da naelektrisanje bude izgubljeno na određenim mestima u detektoru. To može biti posledica postojanja defekata tokom izrade materijala CCD prijemnika ali i usled oštećenja nepoželjnim zračenjem. U tom smislu se radi na tome da letelice koje nose instrumente za detekciju X-zračenja trpe što manje štetnog spoljašnjeg uticaja. Tako se tokom prolaza letelica kroz radijacione pojaseve planete Zemlje (za one na višim orbitama) zatvaraju i štite svi uređaji. Dodatno, instrumenti uglavnom sadrže senzore koji omogućavaju da se svemirska opservatorija na vreme zatvori prilikom neočekivanih, potencijalno opasnih pojava na Suncu. Čestice visokih energija mogu izazvati velike probleme u radu CCD uređaja. Ipak, posebno se ističu protoni nižih energija (reda stotina kiloelektronvolta) usled toga što se reflektuju u kolektorima X-zračenja na isti način kao X-fotoni, te daju doprinos signalu u fokalnoj ravni. Dodatno, ti protoni su zaslužni i za generisanje defekata unutar materijala detektora usled kojih može doći do gubitaka naelektrisanja tokom procesa transfera. Misije koje se realizuju na nižim orbitama nisu pod bitnim uticajem pomenutih protona niskih energija ali i dalje trpe štetan uticaj od čestica visokih energija, posebno tokom prolaska kroz Južnoatlantsku anomaliju⁶.

Oštećenja usled pojačanog zračenja u oblasti kroz koju se kreće letelica, kao i defekti usled proizvodnje detektora mogu dovesti do toga da pojedinačni ili kolone piksela imaju neuobičajeno visoku tamnu struju (eng. *dark current*). Tamna struja je izazvana slučajnim procesima stvaranja parova

⁶Južnoatlantska anomalija (eng. *South Atlantic Anomaly*) je posledica odstupanja Zemljinog magnetnog polja od idealnog, centriranog dipola. Reč je o oblasti gde se unutrašnji radijacioni pojas najviše približava površini planete, te spušta do visine reda 200 kilometara. To ima za posledicu povećani fluks čestica visokih energija, te je rad veštačkih satelita i instrumenata na njima znatno otežan.

elektron-šupljina u aktivnoj zoni prijemnika. U suštini, usled niskih temperatura i brzog očitavanja kod instrumenata u X-području tamna struja nije bitno izražena, osim u pomenutim, anomalnim, tzv. vrućim pikselima. To naravno može dvesti do lažnih detekcija (eng. *spurious detections*). Za određeni broj problema, kao što su npr. ekstremni slučajevi vrućih piksela, moguće je obaviti redukciju, odnosno filtriranje (isključiti ih iz podataka) u periodu pre slanja podataka o posmatranjima, te njihovog pohranjivanja u archive na Zemlji.

Konačno, istaknimo da su CCD uređaji osetljivi uopšte i na optičke, UV i infracrvene fotone. Kada je CCD uređaj namenjen za detekciju X-fotona, tada optički UV i infracrveni fotoni predstavljaju šum. Iz tog razloga se pri posmatranjima koriste odgovarajući filteri koji blokiraju to zračenje. Pomenuti filteri su uglavnom sačinjeni od tankih slojeva aluminijuma i plastike debljine od nekoliko stotina nanometara. Naravno, ovakvi filteri mogu apsorbovati i meke X-fotone.

1.3 Obrada posmatranja u X-području

1.3.1 Podaci iz arhiva posmatranja

Uobičajeno je da, posle određenog vremenskog perioda nakon realizovanih posmatranja, podaci postaju javno dostupni u okviru odgovarajućih arhiva konkretne svemirske opservatorije. Takođe, uz same podatke, uglavnom su besplatno, javno dostupni i specifični softverski alati za, bar osnovnu redukciju posmatranja i naučnu analizu.

Podatke uglavnom čine tzv. sirova posmatranja, odnosno osnovna lista detekcija, kao i pomoćni podaci neophodni za redukciju. Archive obično nude i automatski redukovana posmatranja, kao i slike, spektre, krive sjaja, te listu detektovanih tačkastih izvora, koja služe samo za preliminarnu analizu, odnosno brzi uvid u podatke.

Različiti podaci koji se dobijaju pomoću X-opservatorija čuvaju se u fajlovima FITS formata (eng. *flexible image transport system*). Osnovne informacije o posmatranju nalaze se u zaglavlju FITS fajla. Uspostavljen je jedinstven OGIP⁷-ov standard za FITS format u okviru celokupne zajednice astronoma koji izučavaju X-astronomiju [15].

⁷eng. *Office of Guest Investigator Programs*.

Kao što je već napomenuto, prijemnici u X-području detektuju pojedinačne fotone, a ne integralni fluks po jedinici površine detektora kao u optici. Zapravo, X-fotoni imaju visoke energije pa se mogu detektovati kao pojedinačni događaji, a uz to fluks im je obično veoma nizak pa se mogu brojati. Dakle, struktura osnovnih podataka je lista detekcija, a svaka pojedinačna detekcija je određena nizom atributa (pozicija na nebu detektovanog X-fotona, vreme prispeća, energija, polarizacija). Dodatno, postoje i pomoćni atributi koji npr. mogu služiti da se razdvoje valjani događaji detekcije od pozadine. Uopšte, moguće je selektovati posmatračke podatke po različitim kriterijumima, te ih koristiti u daljoj analizi.

Nakon izvršenog posmatranja raspolaže se samo informacijom o internom, tzv. sirovom položaju izvora na konkretnom detektoru, odnosno delu detektora. Krajnje pojednostavljeno, uglavnom je procedura takva da se najpre nalazi položaj u specifičnom koordinatnom sistemu koji je fiksiran u fokalnoj ravni. Za to je neophodno poznavanje veličine piksela i orijentacije svih delova detektora. To su tzv. detektorske koordinate (DETX, DETY). Zatim se odgovarajućom konverzijom nalaze tzv. nebeske koordinate (X, Y), za šta je neophodno da se zna pravac ka kojem je fokalna ravan bila usmerena za vreme detekcije signala. Takva informacija obično proizlazi iz upotrebe pomoćnog instrumenta (teleskopa) na letelici. Parametri konverzije iz detektorskih u nebeske koordinate se mogu menjati u vremenu. Zapravo, različite strukture unutar svemirske opservatorije se mogu savijati usled termičkog (termalnog) naprezanja (posledice gradijenta temperature), a u nekim slučajevima letelica može podrhtavati oko nominalnog pravca. Nebeske koordinate (X, Y) se računaju u odnosu na tangentnu ravan na nebesku sferu, pri čemu se ort normale na tu ravan identifikuje sa nominalnim pravcem konkretnog posmatranja (obično su ključne reči koje određuju taj pravac RA NOM i DEC NOM). U sirovim posmatranjima se (X, Y) uglavnom izražavaju u jedinicama piksela i dalje se mogu konvertovati u rektascenziju i deklinaciju uz pomoć odgovarajućih, pomoćnih kalibracionih informacija. Konačno, posebne oblasti (regioni) od interesa na slikama se mogu zadati u npr. tekstualnom formatu DS9/FUNTOOLS, uz pomoć programa SAOImage DS9. Mogu se koristiti tzv. fizičke koordinate, informacije iz liste detekcija ((X, Y) ili (DETX, DETY)) ili pak WCS koordinate (eng. *World Coordinate System*) koje predstavljaju rektascenziju i deklinaciju izvora.

Važno je skrenuti pažnju da se pod događajem detekcije zapravo podrazumeva piksel kome je pridruženo naelektrisanje iznad nekog konkretnog praga (što zavisi od pojedinačne opservatorije). U slučaju fotona visokih

energija pridružena naelektrisanja mogu biti pridružena različitim, susednim pikselima. Zapravo, u zavisnosti od odnosa dimenzije oblaka (prikupljenog) naelektrisanja i veličine piksela, naelektrisanje koje potiče od jednog događaja detekcije može se rasporediti u nekoliko susednih piksela. Za svaki događaj detekcije se tako beleže i vrednosti susednih piksela (3×3 ili 5×5 piksela zavisno od konkretnog instrumenta). Uvodi se i broj (eng. *grade, pattern*) koji opisuje specifični obrazac vrednosti bliskih piksela čija su naelektrisanja iznad neke utvrđene granice (da li je npr. reč o događaju detekcije samo sa jednim, centralnim pikselom, ili su u pitanju dva, tri i itd). Dok X-foton proizvodi fotoelektrone koji se zatim relativno brzo sakupljaju, naelektrisane čestice visokih energija koje prodiru u materijal detektora (što aktivni, što neaktivni) stvaraju parove elektron-šupljina duž celog svog puta kroz prijemnik. Uopšte, očekuje se manje rasipanje za prave detekcije X-fotona, pa je moguće vršiti i grubu identifikaciju detekcija kosmičkih zraka, te i automatsko odbacivanje takvih podataka, pre slanja na Zemlju [3].

U okviru sirovih podataka obično se navodi lista koja sadrži informacije o tzv. lošim pikselima (usled različitih defekata), koji nisu uključeni u dalja razmatranja (npr. ekstenzija BADPIXnn kod posmatranja XMM-Njutnom).

Vremenski trenuci detekcija fotona beleže se automatski u odnosu na lokalni časovnik svake letelice. Zatim sledi odgovarajuća konverzija koja ima za cilj da se vremenski trenuci konačno predstave u sistemu modifikovanih Julijanskih dana MJD⁸. Vremenski intervali koji odgovaraju trenucima detekcija predstavljaju tzv. dobre vremenske intervale, GTI (eng. *good time intervals, GTIs*).

1.3.2 Spektri

Kao što je ranije već detaljno opisano, CCD kamere skladište naelektrisanja i količina naelektrisanja koja odgovara detekciji fotona se često, iz istorijskih razloga naziva PHA vrednost (eng. *pulse-height amplitude*) i izražava u odbrojima ili DN ili ADU jedinicama [22]. Konverzija u energiju uopšte nije linearna i može zavisiti od vremena i položaja na detektoru. Konkretno, za dati piksel u nekom konkretnom trenutku vremena, PHA je obično prosto proporcionalna energiji fotona, sa odgovarajućim faktorom proporcionalnosti (eng. *gain*). Taj faktor proporcionalnosti se može menjati tokom vremena i

⁸Julijanski dani se mere od podneva 1. 1. 4713. godine pre nove ere, a MJD se dobija kada se od Julijanskih dana oduzme 2400000.5.

duž samog detektora. Upravo tzv. PI celobrojni spektralni (instrumentalni) kanali (eng. *PHA invariant*) predstavljaju korigovane PHA vrednosti, te uzimaju u obzir pomenute varijacije (eng. *gain-corrected PHA value*). Konverzija između PI vrednosti i energije fotona omogućena je uz pomoć specifične matrice odziva instrumenta, o čemu će biti više reči kasnije.

Dakle, važno je naglasiti da upravo mogućnost određivanja energije svakog pojedinačnog fotona pomoću opisanih detektora X-zračenja omogućuje da se istovremeno kreiraju i slike i spektri, bez upotrebe specijalizovanih, disperzionih elemenata (koji se koriste u X-astronomiji za postizanje znatno više rezolucije). U tom smislu se za CCD prijemnike može reći da predstavljaju svojevrsne nedisperzione spektrometre koji pružaju uvid u spektre različitih izvora u X-području (eng. *imaging spectrometers*). Ipak, reč je o relativno niskoj energijskoj (spektralnoj) rezoluciji reda $R \equiv E/\Delta E \sim 10-50$ [15].

Skrenimo pažnju da se veoma mala ali opet značajna količina energije upadnog X-fotona transformiše u energiju oscilovanja kristalne rešetke (fononska interakcija). Proces stvaranja parova elektron-šupljina poprima probabilistički karakter, te postoji izvesna neodređenost u broju nastalih parova tokom interakcije X-fotona, koja je opisana tzv. Fanoovim⁹ faktorom F . Zapravo, ispostavlja se da Fanoov faktor opisuje donju granicu moguće energetske rezolucije razmatranih detektora. Dodatni uticaji elektronike samo pogoršavaju rezoluciju. Naravno, bez obzira što sami CCD prijemnici obezbeđuju dovoljno dobru energijsku rezoluciju, visoka energijska rezolucija se postiže spektrometrima sa difrakcionim rešetkama (npr. oko 650 linija po milimetru, što je oko deset puta bolja energijska rezolucija od CCD detektora).

Ako se naelektrisanje koje potiče od jednog događaja detekcije raspodeljuje u nekoliko susednih piksela, da bi se odredila originalna energija X-fotona, tada je neophodno sabrati doprinose naelektrisanja po svim pikselima po kojima je naelektrisanje možda rasuto. Naravno, važno je voditi računa da je u svakom sabranom pikselu uključen i odgovarajući šum. Događaji rasuti po više piksela tako trpe veći šum i uopšte imaju nižu energijsku rezoluciju.

Već je napomenuto da CCD detektori u X-astronomiji rade u režimu brojanja pojedinačnih fotona. Spektroskopija u takvom režimu podrazumeva da u toku jednog perioda akumulacije bude ne više od jedne interakcije fotona sa aktivnom oblašću detektora. Naime, fotoni u X-području imaju dovoljne

⁹it. *Ugo Fano*, 1912 – 2001.

energije da svaki pojedinačno oslobodi više elektrona. Čak i kada su veoma sjajni u X-području, nebeski izvori emituju svega nekoliko X-fotona u jedinici vremena. Tako, za veoma kratke ekspozicije svaki piksel nosi informaciju o jednom ili nijednom detektovanom fotonu. Dugačke ekspozicije, neophodne za analizu slabih izvora, se realizuju kroz veliki broj kraćih (eng. *frame time*), uz prateće očitavanje. Ako je samo jedan foton detektovan i pridružen nekom pikselu, onda naelektrisanje koje odgovara tom pikselu ukazuje na energiju fotona. Vreme prispeća fotona je određeno konkretnom kratkom ekspozicijom (reda sekunde ili kraće, do desetak mikrosekundi) unutar koje je taj foton detektovan [22]. Jasno je da opisani instrumenti za detekciju X-zračenja imaju ograničenja na vremensku rezoluciju (i prikupljanje naelektrisanja zahteva određeno vreme), pa se danas praktikuju različite metode poboljšavanja vremenske rezolucije u slučaju konkretnih instrumenata (npr. ograničavanjem aktivne oblasti nekog detektora pri konkretnom posmatranju; [3]). Zbog veoma kratkog vremena trajanja pojedinačne faze prikupljanja fotona, obično nije pogodno zatvarati CCD kameru tokom faze očitavanja. Dakle, i tokom faze očitavanja moguće je da X-fotoni dopru do CCD čipa (eng. *Out-of-Time events*, OoT).

U slučaju veoma sjajnih, tačkastih izvora X-zračenja, ponekad je moguće da više od jednog X-fotona proizvede oblak naelektrisanja pridružen jednom ili da se prelije i u obližnje piksele, tokom trajanja pojedinačne faze prikupljanja fotona (jedne kratke ekspozicije). Iz tog razloga se pri očitavanju dodatno naelektrisanje od većeg broja fotona može interpretirati kao naelektrisanje od jednog fotona veoma visoke energije (eng. *pile up*). To dovodi do pogrešnog zaključka o energijama fotona, te utiče na spektre. Dodatno, obrazac (eng. *pattern*) vrednosti bliskih piksela se takođe može bitno promeniti, te se mogu odbaciti konkretni događaji detekcije kao da su posledica npr. kosmičkih zraka (pozadine). Tako slika jednog svetlog izvora može sadržati prazninu (nulte vrednosti) u centru jer je informacija iz pogrešnog razloga automatski odbačena. Ovaj problem se, pre svega može sprečiti adekvatnom pripremom posmatranja (za detalje videti [3]).

Neka je npr. realizovano posmatranje određene ekspozicije. Izmereni odbroj $\mathcal{C}(x, y, \text{PI})$ odgovara jednom, konkretnom pikselu i PI instrumentalnom energijskom kanalu. Uz to, pretpostavimo da \mathcal{C} potiče od stvarnog fluksa sa nekog nebeskog izvora $\mathcal{F}(x', y', E, t)$. Onda je zapravo:

$$\mathcal{C}(x, y, \text{PI}) = \int \int \int \int \mathcal{R}(x, y, \text{PI}, x', y', E, t) \mathcal{F}(x', y', E, t) dx' dy' dE dt,$$

gde je \mathcal{R} tzv. instrumentalni odziv. Reč je o verovatnoći da foton energije E , koji dolazi iz pravca (x', y') na nebeskoj sferi, u trenutku t bude zabeležen kao odbroj \mathcal{C} koji odgovara pikselu (x, y) i konkretnoj PI vrednosti. Dakle, odbroj je zapravo sprega instrumentalnog odziva i fluksa zračenja nekog nebeskog izvora. U zavisnosti da li su npr. od interesa spektri ili recimo slike, moguće su različite kontrakcije matrice \mathcal{R} .

Pretpostavimo sada da se \mathcal{F} gotovo ne menja tokom vremena ekspozicije, kao i da se vrednost stvarnog fluksa sa nekog nebeskog izvora ne menja u okviru oblasti (regiona) od interesa. Za spektar te, zadate oblasti, važi:

$$\mathcal{C}(\text{PI}) = \int \left(\int \int \int \int \int \mathcal{R}(x, y, \text{PI}, x', y', E, t) dx' dy' dx dy dt \right) \mathcal{F}_{\text{sp}}(E) dE.$$

Uobičajeno je da se instrumentalni odziv podeli na dva člana, baš tako da važi:

$$\mathcal{C}(\text{PI}) = T \int \text{RMF}(\text{PI}, E) \text{ARF}(E) \mathcal{F}_{\text{sp}}(E) dE, \quad (1.5)$$

gde se $T = N\tau$ odnosi na dobre vremenske intervale (N događaja detekcije, kratke ekspozicije τ) koji su ušli u filtrirani skup podataka,

$$\text{RMF}(\text{PI}, E) = \int \int \int \mathcal{R}_{\text{RMF}}(x, y, \text{PI}, E, t) dx dy dt,$$

predstavlja jednu bezdimenzionu matricu¹⁰ (eng. *response matrix, redistribution matrix file*, RMF), a

$$\text{ARF}(E) = \int \int \int \int \int \mathcal{R}_{\text{ARF}}(x, y, x', y', E, t) dx' dy' dx dy dt,$$

čini jedan vektor (eng. *ancillary, auxiliary response file*, ARF) čije su vrednosti izražene u cm^2 . Ipak, u nekim slučajevima difuznih, rasprostrtih izvora, moguće je da se površinski sjaj (eng. *surface brightness*) objekta menja u okviru samog regiona od interesa, te je potrebno redefinisati RMF, uglavnom otežinjavanjem definicionog izraza funkcijom koja oslikava zavisnost fluksa izvora od položaja (videti [3]).

Matrica RMF zapravo predstavlja verovatnoću da foton konkretne energije bude zaista registrovan u određenom instrumentalnom PI kanalu. U idealnom slučaju bi to bila dijagonalna matrica. Ipak, u realnosti, deo X-fotona energije E može biti registrovan u jednom PI kanalu, dok deo može biti

¹⁰Obično normalizovanu tako da važi $\int \text{RMF}(\text{PI}, E) d\text{PI} = 1$.

detektovan sa nekim drugim PI vrednostima. Dakle, reč je o odzivu detektora na monohromatski signal (kao npr. instrumentalni profil ili aperturna funkcija u optičkoj spektrometriji).

Zavisnost efektivne površine (eng. *effective area*) čitavog instrumenta¹¹ od energije fotona opisana je u ARF-u. Naime, efektivna površina se uopšte može shvatiti kao proizvod geometrijske površine (kolektora), reflektivnosti¹² (efikasnosti ogledala; funkcija energije), vinjetiranja¹³ (funkcija je ugla udaljenja od optičke ose, kao i energije dolazećih fotona) i dr. Zapravo, može se reći da je geometrijska površina kolektora suštinski smanjena na tzv. efektivnu površinu usled različitih efekata (uticaja neidealne reflektivnosti, efekta vinjetiranja, različitih opstrukcija na putu fotona i dr). Drugim rečima, prilikom obračunavanja različitih fizičkih karakteristika nebeskih izvora, upravo se koristi efektivna površina, a ne geometrijska.

Uobičajeno je da ARF, pored informacija o efikasnosti kolektora (sistema ogledala), sadrži informacije i o efikasnosti filtera (ako se koriste za zaštitu od optičkih fotona), te i o kvantnoj efikasnosti (procenat fotona koji dospevaju do prijemnika koji su zaista registrovani). Kvantna efikasnost uopšte zavisi od energije i pozicije na detektoru.

Kada se astrofizički spektar pomnoži sa ARF-om dobija se raspodela odbroja koju bi registrovao prijemnik sa idealnom energijskom rezolucijom. Dalje množenje sa RMF-om je neophodno kako bi se reprodukovao posmatrani spektar.

Dodatno, istaknimo da ARF uopšte zavisi od položaja na detektoru, te je različit za svaki region. Usled podrhtavanja instrumenta, neophodno je odrediti usrednjeni ARF za svaki izvor (region), te je važna informacija o trenutnoj usmerenosti instrumenta (eng. *aspect history – pointing direction as a function of time*).

U spektroskopiji se ukupni odziv instrumenta uglavnom predstavlja preko podataka sadržanih upravo u RMF i ARF. Ipak, važno je skrenuti pažnju da se u zavisnosti od literature, odnosno konkretnog tima stručnjaka, mogu

¹¹Setimo se da se pojam senzitivnosti vezuje za meru minimalnog signala koji se može uočiti iznad prisutnog, slučajnog, pozadinskog šuma. To se može postići većom efektivnom površinom ili manjim doprinosom pozadine.

¹²Reflektivnost ogledala je određena odnosom broja reflektovanih prema broju upadnih fotona, odnosno govori o udelu fotona koji su reflektovani ogledalima.

¹³Sa udaljavanjem od optičke ose ispada da se sve manje upadnih X-fotona uspešno fokusira. Ta pojava se naziva vinjetiranje (eng. *vignetting*). Efektivna površina tako opada sa udaljavanjem od optičke ose. Dodatno, tvrdi X-fotoni se teže fokusiraju.

naći i drugačije definicije za RMF i ARF. Dodatno, ako su RMF i ARF kombinovani u jednu matricu, obično se koristi termin RSP (eng. *ReSPonse*).

1.3.3 Slike

Slike u celokupnom, detektabilnom intervalu energija se dobijaju sumiranjem po PI vrednostima:

$$\begin{aligned} \mathcal{C}(x, y) &= \sum_{\text{PI}} \mathcal{C}(x, y, \text{PI}) = \\ &= \int \int \int \int \mathcal{R}_{\text{sl}}(x, y, x', y', E, t) \mathcal{F}(x', y', E, t) dx' dy' dE dt, \end{aligned}$$

gde je:

$$\mathcal{R}_{\text{sl}}(x, y, x', y', E, t) = \sum_{\text{PI}} \mathcal{R}(x, y, \text{PI}, x', y', E, t).$$

Instrumentalni odziv se, u ovom slučaju, obično razdvaja na dva člana, tzv. PSF (eng. *point spread function*) i efektivnu površinu EA:

$$\mathcal{R}_{\text{sl}}(x, y, x', y', E, t) = \text{PSF}(r, \theta, x', y', E) \text{EA}(x', y', E, t),$$

gde je $r^2 = (x - x')^2 + (y - y')^2$ i $\theta = \arctan((y - y')/(x - x'))$.

Kao što je poznato i u optičkoj astronomiji, lik tačkastog izvora nije tačka, već je reprezentovan odgovarajućom raspodelom koju opisuje tzv. PSF funkcija (verovatnoća da foton konkretne energije i iz određenog, dolazećeg pravca bude registrovan u nekom, konkretnom pikselu). Poznato je da PSF zavisi od energije fotona i udaljenosti od centra vidnog polja. Uglavnom se bitno pogoršava sa udaljavanjem od optičke ose. Skrenimo pažnju da PSF nije nužno azimutalno simetričan, a daleko od optičke ose je često nalik na elipsu. Obično su prisutne i svojevrzne radijalne linije (štrafte) u profilu PSF-a, koje su posledica rasejanja X-fotona o pomoćne delove kolektora, npr. držače ogledala¹⁴.

Važno je naglasiti da PSF raspodela određuje ugaonu (prostornu) rezoluciju celokupnog instrumentarijuma koji se koristi. Kao mera ugaone (prostorne) rezolucije može se tako koristiti FWHM (eng. *full width at half maximum*) parametar PSF raspodele. Većina softverskih alata za obradu i analizu

¹⁴Recimo, oblik PSF-a kod X-instrumenata u okviru svemirske opservatorije XMM-Njutn pod uticajem držača ugnježdenih (uklopljenih) Volterovih ogledala prvog tipa.

posmatranja u X-području nudi mogućnost da se odredi radijalni profil, koji opisuje kako se površinski sjaj menja sa udaljenosti od centra konkretnog izvora (uglavnom se meri u prstenovima oko izvora). Dodatno, od interesa je i da se razmotri kolika je snaga zračenja unutar različitih radijusa oko centra tačkastog izvora. Tako se za ocenu ugaone rezolucije definiše i tzv. HPD (eng. *half power diameter*), dijametar unutar kojeg je koncentrisano pedeset posto snage zračenja ili HEW (eng. *half energy radius*). Matematički se PSF može modelovati različitim funkcijama, kao što je npr. Kingova [19].

Konačno, naglasimo da je uglovna veličina difrakcionog lika kod teleskopa koji služe za sakupljanje fotona u X-području zanemarivo mala u odnosu na veličinu deformacije talasnog fronta koja je prouzrokovana neravninama na površini ogledala. Uglovna razdvojna moć je tako uglavnom ograničena tačnošću izrade površina ogledala, a ne toliko veličinom difrakcionog lika.

Uglavnom je opis osetljivosti (senzitivnosti; efektivne površine) instrumenta po vidnom polju¹⁵, u detektorskim koordinatama dat preko tzv. instrumentalne mape (slike). Tu je, po običaju uključena i informacija o kvantnoj efikasnosti prijemnika. Ako se još uključi i vremenska zavisnost usmerenosti teleskopa¹⁶, dobija se tzv. mapa ekspozicije (eng. *exposure map*). Pomenuta kalibraciona slika sadrži dodatno i informacije o prazninama između pojedinih CCD čipova unutar kamere, kao i o lošim pikselima. Može se iskoristiti analogija sa snimkom ravnomerno osvetljenog polja (eng. *flat-field*) u optičkoj astronomiji, kako se tek deljenjem originalne slike sa mapom ekspozicije dobija korigovana slika (eng. *exposure-corrected image*) koja se može koristiti u daljoj analizi.

Naglasimo, na ovom mestu samo još da (prostorno) izravnavanje slika (eng. *spatial smoothing*) podrazumeva konvoluciju slika (piksel po piksel) sa jezgrom za koje se uglavnom uzima Gausijan. To nam omogućava da poboljšamo kontrast, te bolje uočimo pojedinosti od interesa, posebno kod izvora slabog sjaja. Ipak, preterano izravnavanje npr. može dovesti do toga da se preceni veličina oblasti koju zauzima izvor zračenja. Adaptivno izravnavanje podrazumeva promene u veličini jezgra (kernela) kako bi se održao odnos signala prema šumu, a u praksi su razvijene različite procedure u

¹⁵Skrenimo još jednom pažnju da efektivna površina bitno opada sa udaljevanjem od centra vidnog polja.

¹⁶Posebno je važno biti obazriv kada je reč o signalima koji se registruju u blizini granice (ivice) detektora. Naime, usled podrhtavanja instrumenta, te malih promena u usmerenosti, signal može biti registrovan u nekim određenim vremenskim trenucima tokom ekspozicije, a u nekim ne.

konkretnim softverskim alatima namenjenim obradi X-posmatranja svemirskih opservatorija.

Prostorno regrupisanje (eng. *spatial binning*) podrazumeva kreiranje novih, većih piksela, kombinovanjem originalnih, susednih elemenata slike. Naravno, time se kviri prostorna rezolucija pa je potreban poseban oprez. Ipak, ukažimo, na ovom mestu i na to da je veličina piksela kod pojedinih kamera ponekad mnogo manja od prostorne (ugaone) rezolucije teleskopa. U tom slučaju je neophodno da se izvrši odgovarajuće regrupisanje (binovanje) piksela slike. Obično se za veličinu grupe (eng. *bin size*) uzima oko jedne trećine vrednosti FWHM konkretnog PSF-a, koja određuje prostornu rezoluciju [22].

1.4 Analiza posmatranja u X-području

1.4.1 Značaj astrostatistike u X-astronomiji

Važno je imati na umu da uglavnom raspoložemo samo uzorcima koji su ograničeni veoma malim brojem fotona, pa je analiza takvih podataka veoma zahtevna, bilo da je reč o slikovnim predstavama unutar vidnog polja, spektrima ili krivama sjaja. Emisija fotona je primer slučajnog procesa koji se može opisati pomoću Poasonove¹⁷ raspodele. U posmatračkoj X-astronomiji svaki pojedinačni foton je važan, jer ih detektujemo u malom broju. Broje se pojedinačni fotoni, pa je za interpretaciju rezultata potrebno dobro poznavanje matematičke statistike (videti [70]).

Za opisnu, Poasonovu raspodelu je parametar μ očekivana vrednost, a standardna devijacija (mera rasipanja) $\sqrt{\mu}$. Kao primer, možemo postaviti sledeće pitanje. Ako je srednji broj emitovanih fotona u jedinici vremena (eng. *count rate*) 1.25 fotona u sekundi, koliko je fotona emitovano u deset sekundi? Ako je, dakle, očekivana vrednost jednaka $\mu = 1.25$ fotona u sekundi, za deset sekundi posmatranja će zaista biti $t\mu = 12.5$ fotona, $t = 10$ s. Dakle, za veći broj fotona (svetlije izvore ili duže ekspozicije) udeo statističkog šuma u signalu je manji. Kako je verovatnoća p za detekciju N fotona sa očekivanom vrednošću $t\mu$ (za određenu ekspoziciju t) data preko izraza za Poasonovu raspodelu:

$$p(N) \equiv \mathcal{P}(N; t\mu) = \frac{(t\mu)^N e^{-t\mu}}{N!}, \quad (1.6)$$

¹⁷Poason ili Puason (fra. *Siméon Denis Poisson*, 1781 – 1840).

onda je jasno da je verovatnoća da ih se detektuje 12 baš $p(N = 12) = 0.113$, a njih 9, $p(N = 9) \approx 0.08$. Ako smatramo da su međusobna, pojedinačna posmatranja nezavisna, onda ako npr. napravimo 100 posmatranja ekspozicije od deset sekundi, konkretnog izvora, detektovaćemo npr. devet fotona u oko osam od pomenutih posmatranja (reč je o proizvodu verovatnoća, kako su posmatranja nezavisna). Inače, po Gausovoj¹⁸, normalnoj raspodeli, verovatnoća za detekciju N fotona sa očekivanom vrednošću $t\mu$ i standardnom devijacijom $t\sigma$, ima oblik:

$$p(N) \equiv \mathcal{N}(N; t\mu, t\sigma) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(N-t\mu)^2}{2(t\sigma)^2}}. \quad (1.7)$$

Neka se sada razmatra jedan detektor koji broji pojedinačne fotone koji dolaze sa izvora sa stopom s fotona u sekundi. Neka je pozadina takva da stiže b fotona pozadine u sekundi. Za vreme t , ukupan broj fotona je $N_{\text{tot}} = (s + b)t \pm \sqrt{(s + b)t}$. Ako se zanemaruju neodređenosti u pozadini, onda je ukupni broj fotona pozadine jednak $N_{\text{bg}} = bt$. Dakle, broj fotona sa izvora je onda $N_{\text{src}} = N_{\text{tot}} - N_{\text{bg}} = st \pm \sqrt{(s + b)t}$. Odnos signala prema šumu SNR se može definisati preko $s/\sqrt{(s + b)t}$ ili $N_{\text{src}}/\sqrt{N_{\text{tot}}}$ i određuje kvalitet posmatranja. Kada je SNR mali, reda npr. 3 onda je izvor na granici detekcije, dok je za $SNR = 100$ već reč o podacima koji su dobrog kvaliteta i koji omogućavaju detaljnu analizu. Neka je sada poznato da je npr. b upravo 1 foton po sekundi. Za 100 sekundi se detektuje 120 fotona. Koliki je odnos signala prema šumu? Kako je $N_{\text{tot}} = (s + b)t = 120$, $N_{\text{bg}} = bt = 100$, $s = 0.20 \pm 0.11$, a $SNR = 1.8$, da bi se moglo govoriti o jasnoj detekciji neophodno je realizovati posmatranje duže ekspozicije. Bitno je istaći da čak i kada je $s \ll b$, za dovoljno veliko t moguće je detektovati izvor.

Izraz (1.5) predstavlja jednu Fredholmovu¹⁹ integralnu jednačinu prvog tipa. Ispostavlja se da je direktno određivanje nepoznate $\mathcal{F}_{\text{sp}}(E)$ iz (1.5) skopčano sa više praktičnih problema [3, 7]. U tom smislu se, najpre bira fizički smislen, opisni model zračenja sa odgovarajućim početnim (probnim) vrednostima parametara, koje slede iz iskustva, odnosno prethodnog znanja o mehanizmima elektromagnetnog zračenja u X-području nebeskog tela od interesa. Zatim se taj probni model uparuje sa celokupnim instrumentalnim odzivom²⁰ kako bi se predvideo model za odbroj po instrumentalnom

¹⁸nem. *Johann Carl Friedrich Gauss*, 1777 – 1855.

¹⁹Po Fredholmu (šved. *Erik Ivar Fredholm*, 1866 – 1927).

²⁰Matematički je reč o konvoluciji.

kanalu (eng. *forward-folding approach*). Dakle, teorijski model mora da bude modifikovan (eng. *folded through*) odzivom instrumenta kako bi mogao da se poredi sa posmatračkim podacima. Može se reći da ARF menja oblik modela, a RMF kviri rezoluciju. Sada je moguće porediti posmatrani i modifikovani teorijski odbroj (eng. *expected number of counts*) izborom odgovarajuće statistike²¹ (eng. *fit statistic*). Konačno, vrši se optimizacija (eng. *forward-fitting*) kako bi se izračunale vrednosti parametara koje minimiziraju konkretnu statistiku. Kažemo da posmatrani spektar fitujemo teorijskim modelom. U upotrebi je više algoritama, odnosno iterativnih šema, kao što je najčešće implementirani tzv. Levenberg-Marquardtov algoritam (eng. *Levenberg-Marquardt²² algorithm*). Veoma je važno voditi računa o tome da se pravilnim izborom i ograničavanjem fizički mogućih vrednosti parametara modela ne upadne u lokalni minimum, već da se nađe globalni minimum konkretne statistike.

Svaki opisni model zračenja je određen skupom parametara. Prostor parametara je uopšte višedimenzioni. Dva različita modela mogu imati disjunktno prostore parametara. Kao primer, navedimo stepeni zakon (eng. *power law*) i model tzv. koronalne plazme (eng. *collisional ionization (coronal) equilibrium*, CIE). Sa druge strane, kod tzv. ugnježenih modela (eng. *nested models*) može se reći da je jednostavniji model svojevrsni podskup složenijeg modela. Takav je slučaj kod stepenog zakona i izlomljenog stepenog zakona (eng. *broken power law*). Skup parametara nekog teorijskog modela koji najbolje opisuju podatke (eng. *the best model parameters*) predstavljaju samo jednu tačku u prostoru parametara, te je njihovo određivanje skopčano sa mnogim praktičnim problemima [3]. Izbor modela se zasniva na poznavanju tipa nebeskog tela čije zračenje u X-području posmatramo.

Dakle, uopšteno se može govoriti o nekoliko različitih klasa problema koji se javljaju u X-astronomiji za koje se posebno zahtevaju znanja iz astrostatistike. Svakako, tu je prvo već pomenuta statistička ocena parametara, odnosno određivanje vrednosti, te intervala poverenja parametara teorijskog modela koji najbolje opisuju podatke, npr. spektar²³. Naravno, pod broj dva, testovi saglasnosti su neophodni da bi se moglo suditi o tome koliko verno

²¹Pod statistikom se podrazumevaju veličine koje se računaju iz uzorka. Kada se statistika koristi kako bi se procenila vrednost nekog parametra uzorka, onda se obično naziva estimator. Srednja vrednost je tako jedan primer statistike, konkretno estimatora.

²²eng. *Kenneth Levenberg*, 1919 – 1973; eng. *Donald W. Marquardt*, 1929 – 1997.

²³Pored samih vrednosti parametara, potrebno je, dakle, proceniti njihove neodređenosti.

neki model opisuje posmatračke podatke (eng. *goodness of fit*) i koji je model od skupa fizički mogućih, uopšte najprihvatljiviji (eng. *model selection*). Više o različitim statističkim tehnikama u X-astronomiji videti npr. u [7].

Neka je $\{x_i\}$, $i = 1, \dots, N$ skup nezavisnih posmatračkih podataka²⁴ za koje je opravdano reći da su uzorkovani iz određene raspodele verovatnoće. Dodatno, recimo da se razmatra jedan opisni (teorijski) model zračenja M koji je određen skupom parametara θ . Vrednosti M_i predstavljaju predviđanja konkretnog modela za svaki element posmatračkog skupa podataka x_i . Funkcija verodostojnosti (eng. *likelihood*) se može definisati preko:

$$\mathcal{L}(\{x_i\}) = p(x_1, x_2, \dots, x_N | \theta) = \prod_{i=1}^N p(x_i | M_i(\theta)), \quad (1.8)$$

gde je $p(x_i | M_i(\theta))$ zapravo verovatnoća da i -ti podatak iz posmatračkog skupa ima vrednost x_i ukoliko je valjan konkretan opisni model zračenja čija su predviđanja M_i izračunata za skup parametara θ . Pomenimo, na ovom mestu samo metodu maksimalne verodostojnosti (eng. *maximum likelihood*) koja podrazumeva da se odrede takvi parametri θ za koje funkcija \mathcal{L} ima maksimum. Pod pretpostavkom da je konkretni model zračenja valjan, uobičajeno je da se biraju one vrednosti parametara tog modela za koje verovatnoća da se posmatraju konkretni podaci ima maksimum.

Ako se vrednosti x_i uzorkuju iz Poasonove raspodele, sledi:

$$\mathcal{L}(\{x_i\}) = \prod_{i=1}^N \mathcal{P}(x_i; M_i(\theta)). \quad (1.9)$$

Kao primer, neka su x_i podaci za posmatrani spektar nekog izvora u X-području. Onda i označava instrumentalne energijske kanale. Pretpostavimo još da je naše saznanje o tipu posmatranog izvora takvo da je opravdani model X-zračenja baš stepeni zakon oblika $AE^{-\gamma}$, sa parametrima A i γ . Predviđanja modela M_i se nalaze pomoću izraza (1.5), odnosno preko:

$$M_i = T \int \text{RMF}(i, E) \text{ARF}(E) AE^{-\gamma} dE. \quad (1.10)$$

Ovaj intetgral se može rešiti²⁵ za konkretne vrednosti A i γ , te za odgovarajuće kalibracione podatke sadržane u RMF-u i ARF-u. Tako je onda moguće

²⁴To može npr. biti odbroj po instrumentalnom kanalu (spektar) ili po pikselu (slika).

²⁵Recimo, rešavanje ovog integrala je deo standardne procedure u XSPEC-u (eng. *XSPEC, An X-Ray Spectral Fitting Package*; za detelje videti [1]).

odrediti i samu funkciju verodostojnosti. Odrediti maksimalnu verodostojnost znači odrediti takav skup parametara A i γ da gore opisana, Poasonova verodostojnost bude maksimalna. Naime, \mathcal{L} se računa za veliki broj parova (A, γ) i onaj par koji daje maksimalnu verodostojnost se prihvata kao najverovatniji.

U praksi se obično koristi prirodni logaritam verodostojnosti:

$$\ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^N (x_i \ln M_i - M_i - \ln x_i!). \quad (1.11)$$

Pomenimo i tzv. C -statistiku $C \equiv -2 \ln \mathcal{L}$, koja se zapisuje u obliku²⁶ [23]:

$$C = 2 \sum_{i=1}^N (M_i - x_i + x_i \ln(x_i/M_i)), \quad (1.12)$$

a često se prikazuje i u formi [10]:

$$C = 2 \sum_{i=1}^N (M_i - x_i \ln M_i), \quad (1.13)$$

pošto je, zapravo $\ln x_i!$ nezavisno od modela, te se može ignorisati prilikom procesa optimizacije (nalaženja maksimuma/minimuma funkcije; [3]). Slično, za slučaj kada je reč o uzorkovanju iz Gausove raspodele i to sa poznatom σ je $\mathcal{L}(\{x_i\}) = \prod_{i=1}^N \mathcal{N}(x_i; M_i, \sigma_i)$, pa se definiše, često korišćena S^2 -statistika preko:

$$S^2 \equiv -2 \ln \mathcal{L} = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - M_i)^2}{\sigma_i^2}, \quad (1.14)$$

pošto dopunski član nije bitan prilikom optimizacije jer ne zavisi od modela²⁷.

Sa Bajesovskog²⁸ stajališta, verovatnoća konkretnog modela sa parametrima θ (tzv. posteriorna verovatnoća), $p(\theta|\{x_i\})$, nakon izvršenih posmatranja $\{x_i\}$ je upravo:

$$p(\theta|\{x_i\}) \propto p(\{x_i\}|\theta) p(\theta),$$

²⁶Ovde je iskorišćena Stirlingova (eng. *James Stirling*, 1692 – 1770) aproksimacija za faktorijel, $\ln x_i! = x_i \ln x_i - x_i$.

²⁷Naglasimo da S^2 prati tzv. χ^2 -raspodelu i da se S^2 -statistika često naziva i označava kao χ^2 (za detalje videti [70]).

²⁸Misli se na Tomasa Bejza ili u najčešćoj ali pogrešnoj transkripciji, Bajesa (eng. *Thomas Bayes*, 1701 – 1761).

gde je $p(\{x_i\}|\theta)$ funkcija verodostojnosti \mathcal{L} (verovatnoća da se ostvare posmatranja $\{x_i\}$ ako je valjan izabrani model sa parametrima θ), a $p(\theta)$ je tzv. apriorna verovatnoća. Reč je o verovatnoći samog modela sa parametrima θ u svetlu svih prethodnih saznanja o razmatranom izvoru zračenja²⁹.

U zavisnosti od karakteristika posmatračkih podataka koriste se različite statistike za optimizaciju. Već je naglašeno da posmatranja u X-području uglavnom imaju veoma mali broj odbroja po instrumentalnom kanalu. Ispostavlja se da za posmatranja kod kojih je raspodela odbroja za svaki instrumentalni kanal približno normalna, uglavnom je dozvoljeno da se koristiti S^2 -statistika. Dakle, S^2 -statistika je, u principu opravdana ako se za posmatranja može reći da su skoro pa uzorkovana iz Gausove raspodele³⁰. Praksa je da se spektri grupišu, tako da u svakom intervalu energija bude određeni, minimalni (optimalni) broj odbroja (pošto je inače u nekom broju instrumentalnih kanala vrednost nula). U praksi se pokazalo to je neophodno da grupe u spektru sadrže bar 25 odbroja da bi mogla da se uopšte koristi S^2 -statistika (mada ta vrednost varira u zavisnosti od literature). Naravno, preterano grupisanje dovodi do gubitaka informacija, npr. o finim detaljima u spektru. U velikom broju slučajeva u X-astronomiji je ipak podesnije koristiti C -statistiku (za detalje videti npr. [7]).

Prilikom uvođenja, ranije pomenutih statistika, prećuto je podrazumevano da su empirijski podaci isključivo porekla sa razmatranog astrofizičkog izvora (C se koristi za podatke uzorkovane iz Poasonove³¹, a S^2 za podatke uzorkovane iz Gausove raspodele³²). U realnosti uvek postoji doprinos pozadine (videti poglavlje 1.4.2). U tom smislu je jasno da podaci, pridruženi regionu koji zauzima astrofizički izvor, obuhvataju kako informacije o razmatranom nebeskom telu, tako i o pozadini. Ako se može reći da su podaci iz oblasti koju zauzima izvor, kao i podaci iz oblasti koja se koristi za procenu doprinosa pozadine, bar samo približno uzorkovani iz Gausove raspodele. Tada je moguće koristiti S^2 -statistiku i na podacima koji nastaju oduzimanjem pozadine [2]. Ako su pak oba tipa podataka uzorkovana iz Poasonove raspodele onda se mora voditi računa o tome da, za razliku od svojstva normalne raspodele, razlika dve Poasonove promenljive ne prati

²⁹Pod prethodnim saznanjima se misli na npr. izbor mehanizama zračenja koji su svojstveni tipu konkretnog objekta, zatim na intervale fizički smislenih vrednosti parametara i dr.

³⁰Poasonova raspodela teži Gausovoj za slučaj velikog odbroja.

³¹U XSPEC-u to odgovara opciji `statistic cstat`.

³²U XSPEC-u to odgovara opciji `statistic chi`.

Poasonovu raspodelu. Iz toga sledi da tada nije opravdano koristiti C -statistiku ako se oduzima pozadina. Ipak, ako se kombinuju posmatranja oblasti koju zauzima izvor i regiona za procenu pozadine, oba okarakterisana Poasonovom raspodelom, ponakada je moguće koristiti tzv. W -statistiku koja je implementirana npr. u XSPEC-u³³. Ako su posmatranja uzorkovana iz Poasonove raspodele, a pozadina opisana normalnom raspodelom, može se koristiti tzv. PG -statistika³⁴. Za više detalja o izboru različitih statistika prilikom optimizacije videti npr. u [2].

Za ocenu neodređenosti parametara, čije su vrednosti izračunate tokom procesa fitovanja podataka, mogu se koristiti različite metode. Dakle, da bi se odredio interval poverenja za neki parametar modela³⁵ najčešće se koristi jedna približna metoda³⁶ zasnovana na tome da se pronalaze sve vrednosti jednog, konkretnog parametra koje ispunjavaju da je:

$$S^2 = S_{\min}^2 + \Delta S^2,$$

gde je S_{\min}^2 minimum statistike dobijen optimizacijom, a npr. za interval sa stepenom poverenja od 90% je $\Delta S^2 = 2.706$. Za stepen poverenja od 99.7% (3σ), za jedan parametar je $\Delta S^2 = 9.0$. Ova metoda se koristi i za C -statistiku u velikom broju slučajeva predstavljenih u postojećoj literaturi. Naravno, mogu se koristiti i znatno modernije i fleksibilnije metode koje se zasnivaju na npr. MCMC tehnici³⁷ (eng. *Markov Chain Monte Carlo*, MCMC).

Različite, tzv. test statistike se mogu koristiti prilikom testiranja statističkih hipoteza (eng. *test statistics*) kada se proverava koliko verno neki model opisuje posmatračke podatke. Uobičajeno je da se sprovede odgovarajući test kako bi se odbacila početna hipoteza (eng. *null hypothesis*), da su posmatrani podaci uzorkovani iz raspodele koja je opisana izabranim modelom. Princip je da se računa vrednost statistike T iz posmatranja T_{obs} i proverava

³³Kada je to moguće, pozadina se može modelovati. Ako se, pored osnovnog regiona koji sadrži izvor, koristi i posmatranje oblasti za procenu pozadine, XSPEC primenjuje W -statistiku iako je formalno potrebno uneti komandu `statistic cstat`.

³⁴U XSPEC-u to odgovara opciji `statistic pgstat`.

³⁵Podaci koji se nakon fitovanja u XSPEC-u pružaju korisniku uz same vrednosti parametara predstavljaju procene tzv. 1σ neodređenosti. Reč je o korenu dijagonalnih elemenata kovarijanse, pa se tako ne vodi računa o korelacijama između parametara konkretnog modela.

³⁶U XSPEC-u je ova metoda implementirana kroz komandu `error`.

³⁷U XSPEC-u se, recimo koriste komande `chain` i `margin` zajedno sa komandom `error`.

da li važi $T_{\text{obs}} > T_c$, za vrednost T_c koja je određena za konkretan stepen poverenja. Ako je uslov ispunjen, odbacuje se hipoteza, odnosno model pri određenom stepenu poverenja. Idealno bi bilo da je T_c nezavisno od modela, pa je prilikom testiranja samo neophodno raspolagati vrednostima T_c za različite stepene poverenja. Takav je slučaj kada se kao statistika prilikom testiranja koristi S^2 . Ipak, uopšte to ne važi pa je neophodno najpre odrediti raspodelu koju prati statistika T za konkretan model, a zatim uporediti posmatranu vrednost T_{obs} sa tom raspodelom³⁸. Skrenimo pažnju da nam testovi saglasnosti samo omogućavaju da odbacimo neki model sa određenim stepenom poverenja.

Kada se primenjuje S^2 -statistika pri optimizaciji (određivanju vrednosti parametara modela), tada se najčešće koristi i pri ispitivanju koliko konkretan model verno opisuje posmatranja. Uobičajena je praksa da se tada definiše tzv. redukovana vrednost S^2 -statistike (često se naziva redukovani χ^2) kao količnik same statistike i broja stepeni slobode, koji je, u tom slučaju određen brojem posmatračkih podataka (npr. instrumentalnih kanala) umenjenim za broj parametara modela koji se koristi. Ispostavlja se da je pogodno da vrednost pomenute veličine bude bliska jedinici ukoliko model verno opisuje empirijske podatke (mada videti npr. [7], za više detalja).

1.4.2 Pozadina u X-posmatranjima

U jednačini (1.5) je prećutno izostavljen jedan važan član koji uključuje odbroj koji potiče od celokupne pozadine u X-području (svih signala koji nisu poreklom sa izvora). U praksi je imperativ da se doprinos pozadine dobro odredi, kako bi se kvalitetno izdvojio signal koji zaista potiče od razmatranog nebeskog izvora. Dakle, prilikom redukcije posmatranja, odnosno pripreme za naučnu analizu, neophodno je voditi računa o pozadini u X-području. Drugim rečima, da bi se ispravno opisalo zračenje nebeskih tela važno je na korektan način tretirati uticaj pozadine.

Pomenimo da se letelice koje nose instrumente namenjene razvoju astrofizike visokih energija, u praksi postavljaju na nekoliko tipova orbiti (za više detalja videti [8]). Niske orbite (eng. *Low Earth Orbits*, LEO) su uglavnom skoro pa kružne, ispod oko 2000 km visine, sa donjom granicom od oko 300 km. Primer su, recimo svemirska opservatorija Fermi, koja posmatra nebo u γ -području (eng. *Fermi Gamma-ray Space Telescope*), kao i Suzaku

³⁸U XSPEC-u se u tu svrhu koristi komanda *goodness*.

(eng. *Suzaku*) za posmatranja u X-području. Sa druge strane, po izraženo eliptičnim putanjama (eng. *Highly Elliptical Orbits*, HEO) se kreću npr. Čandra (eng. *Chandra X-ray Observatory*) i XMM-Njutn. Treća mogućnost koja se u praksi koristi su orbite oko Lagranžove³⁹ ravnotežne tačke (eng. *Lagrange points*) L_1 ili L_2 na oko 1.5 miliona kilometara od Zemlje (duž pravca Zemlja-Sunce). To je slučaj sa kosmičkom opservatorijom SRG.

Zajedničko za sve realizovane misije u posmatračkoj X-astronomiji jeste postojanje složene, nestacionarne pozadine o kojoj se mora voditi računa. Posmatrana pozadina u X-području se uglavnom može razvrstati u dve široke klase. Jedna je tzv. kosmička ili astrofizička (eng. *cosmic backgrounds*), a druga instrumentalna klasa pozadina (eng. *instrumental backgrounds*). Doprinosi konkretnih tipova pozadina zavise od slučaja do slučaja.

Astrofizička ili kosmička pozadina, u opštem slučaju obuhvata nekoliko različitih komponentata. Vangalaktička pozadina (eng. *extragalactic background*) je u intervalu između 0.1 keV i 10 keV skoro potpuno određena zračenjem aktivnih galaktičkih jezgara koja nisu razlučena, usled male ugaone rezolucije instrumenata koji se u praksi koriste⁴⁰. Za većinu realizovanih posmatranja, u intervalu energija između oko 0.1 keV i 7 keV je moguće opisati ovu komponentu jednim stepenim zakonom sa spektralnim indeksom 1.4 ili 1.45, koji je pomnožen sa odgovarajućim modelom apsorpcije X-zračenja u međuzvezdanoj materiji [3, 60]. Običaj je da se ovakav model naziva apsorbovani stepeni zakon (eng. *absorbed power law*).

Zračenje unutar Galaksije (eng. *Galactic emission/foreground*) takođe daje doprinos kosmičkoj pozadini i zavisi izrazito od galaktičke latitute. Reč je o emisiji iz Lokalnog vrelog mehura (eng. *Local Hot Bubble*, LHB), kao i Galaktičkog haloa i dr. Ovde ćemo pomenuti samo najdominantnije komponente i to krajnje pojednostavljeno. Lokalni vrela mehur predstavlja oblast nepravilnog oblika, dimenzija reda 100 – 200 pc koja okružuje Sunce. Temperatura T jonizovanog gasa/plazme unutar pomenutog regiona je reda 10^6 K, odnosno kT je oko 0.1 keV. Kada je reč o spektralnoj (energijskoj) rezoluciji CCD detektora u X-astronomiji, zračenje koje emituje LHB se može sasvim dobro opisati modelima koji podrazumevaju koronalnu plazmu (CIE). Ova komponenta nije primetno apsorbovana međuzvezdanom materijom duž vizure. Dodatno, zračenje, pre svega toplije komponente Galaktičkog haloa

³⁹eng. *Joseph-Louis Lagrange*, 1736 – 1813.

⁴⁰U pojedinoj literaturi se nekada naziva i kosmička pozadina u X-području (eng. *cosmic X-ray background*, CXB).

(temperature reda $0.25 - 0.7$ keV) je uglavnom apsorbovano neutralnim gasom iz diska Galaksije, a može se opisati modelima koji podrazumevaju CIE, te koji se množe sa odgovarajućim modelom apsorpcije X-zračenja u međuzvezdanoj materiji [60]. Za obe komponente je emisija uglavnom u linijama sa najvećim doprinosom ispod oko 1.5 keV [3].

Interakcija naelektrisanih čestica Sunčevog vetra sa neutralnom komponentom međuzvezdane materije koja protiče kroz Sunčev sistem (eng. *heliospheric emission*) ili sa neutralima u egzosferi⁴¹ Zemlje (eng. *geocoronal emission*) dovodi do emisije X-fotona usled procesa razmene (izmene) naelektrisanja (eng. *solar wind charge exchange*, SWCX). Emisija usled procesa razmene naelektrisanja se uglavnom sastoji samo od linija [60]. Najizraženije linije su od C VI, O VII, O VIII, Ne IX i Mg XI. Veliki je problem u tome što većina tih linija upravo nastaje i u vasijskim izvorima, te su od velikog značaja za spektralnu analizu zračenja brojnih nebeskih tela. Iz tog razloga je imperativ da se što preciznije odredi SWCX komponenta pozadine u posmatranim spektrima, kako bi se pravilno modelovalo zračenje samih kosmičkih izvora. SWCX emisija se obično modeluje linijama opisanim Gausovim profilom na specifičnim energijama. Ispostavlja se da su kratkotrajna pojačanja SWCX emisije (reda trajanja od nekoliko sati) obično korelisana sa velikim, naglim porastom fluksa protona iz Sunčevog vetra. Ipak, pokazalo se da ne važi obrnuto. Ako su npr. prisutne jake linije O VIII i Mg XI u spektru kosmičke pozadine to je uglavnom pokazatelj prisustva kontaminacije posmatranja SWCX emisijom. Dodatno, ako je posmatranje dovoljno duge ekspozicije (bar 5 ks), utvrđeno je da je moguće poređenjem krivih sjaja za dva intervala energija, $0.5 - 0.7$ keV ili $0.45 - 0.75$ keV (oblast dominantnih SWCX linija) i $2.0 - 8.0$ keV ili $2.5 - 5.0$ keV (oblast bez SWCX linija), primetiti prisustvo pojačane SWCX emisije u konkretnim posmatranjima [9]. Ako je kriva sjaja za niži interval energija uočljivo promenljiva, dok kriva sjaja za veće energije nije, to može da ukazuje da su posmatranja kontaminirana SWCX emisijom [60].

Instrumentalna pozadina nastaje usled interakcije različitih čestica sa materijalom koji čini kosmičku opservatoriju. Naprosto, tokom svoje putanje, svemirska opservatorija je neminovno pod stalnim udarom okolnih čestica različitih energija. Dakle, ovaj tip pozadine se javlja i kada instrument nije aktivan (kada ne prikuplja X-fotone sa nekog astrofizičkog izvora). Obično se pod tzv. čestičnom pozadinom (eng. *charged-particle background*) podrazumeva

⁴¹Reč je o najudaljenijem sloju atmosfere, koji se obično izdvaja i naziva egzosfera.

posledica interakcije naelektrisanih čestica visokih energija (kosmičkih zraka) ili direktno sa prijemnikom ili pak sa drugim, obližnjim delovima letelice. Spektar čestične pozadine je nestacionaran, a čine ga kontinuum i linije (linije nastaju usled fluorescencije, odnosno karakterističnog X-zračenja). Kako izostaje uobičajena interakcija sa kolektorom, te fokusiranje na prijemnik, model spektra ovog tipa pozadine se ne konvoluiru sa ARF-om.

Kada je reč o misijama na udaljenijim, izrazito eliptičnim orbitama, kao što je slučaj kosmičke opservatorije XMM-Njutn, može se napraviti i sledeća klasifikacija instrumentalne pozadine. Naime, kada je letelica van radijacionih pojaseva⁴², pozadina usled naelektrisanih čestica se može razvrstati na sporopromenljivu, tzv. mirnu pozadinu (eng. *quiescent background*, QPB) i kratke ali intenzivne događaje⁴³ (eng. *background flares*). Mirna pozadina je uglavnom posledica kosmičkih zraka i izraženija je tokom minimuma aktivnosti Sunca. Sa druge strane, intenzivna pojačanja pozadine su iznenadna i kratkotrajna (reda minuta i sata).

Naime, veoma nelagodna okolnost koja se javlja kod vasijskih opservatorija kao što su Čandra i XMM-Njutn jeste to što ogledala kolektora mogu da fokusiraju protone niskih energija (uglavnom reda 150 keV) na detektor. Na taj način dolazi do kontaminacije posmatranja signalima usled interakcije pomenutih protona niskih energija sa detektorom (eng. *soft-proton contamination*, SPC). Dakle, reč je o još jednom tipu instrumentalne pozadine. Pomenuti protoni niskih energija su obično koncentrisani u više lokalizovanih oblaka unutar magnetosfere Zemlje. Ova komponenta nije bitna za instrumente na LEO putanjama. Fluks protona niskih energija zavisi od vremena (brzo se menja na skalama od reda sekundi do reda časova), položaja letelice i pravca usmerenosti teleskopa. Protoni niskih energija unose dodatnu komponentu u spektar koja se može opisati, obično stepenim zakonom (spektralni indeks je uglavnom u intervalu 0.5 – 1.0, no ipak može varirati između 0.1 i 1.4) koji je značajan iznad oko 3 keV (ponekad je pogodnije koristiti izlomljeni stepeni zakon ili stepeni zakon sa naglim prekidom). Važno je voditi računa da prilikom modelovanja pomenutog tipa pozadine nije pogodno koristiti isti RSP kao za X-fotone. Naprosto, protoni neće interagovati na isti

⁴²Čandra i XMM-Njutn imaju izrazito eliptične putanje, te povremeno ulaze u oblast radijacionih pojaseva kada je neophodno da se zaustave sva posmatranja.

⁴³Svemirske opservatorije na udaljenijim, izrazito eliptičnim orbitama su više izložene naletima naelektrisanih čestica, kako većinu vremena nisu dovoljno zaštićene magnetosferom Zemlje. To se može uočiti u krivima sjaja kao povćani fluks u konkretnim vremenskim periodima.

način sa kolektorom i detektorom kao i X-fotoni.

Uopšte, kako bi se ocenio stepen doprinosa nestacionarne pozadine pogodno je koristiti krive sjaja emisije celokupnog vidnog polja, isključujući, naravno svetle, promenljive izvore. Periodi koji podrazumevaju pojačanu emisiju se uglavnom mogu isključiti (filtrirati). Naprosto, u krivama sjaja se jasno uočava nagli porast fluksa, odnosno mogu se utvrditi periodi sa ekstremno visokim nivoom pozadine (eng. *flaring particle background*). Kriva sjaja u npr. intervalu energija između 2.5 – 8.0 keV ili uopšte u intervalu gde SPC dolazi do izražaja u poređenju sa emisijom izvora i čestičnom pozadinom, je najpogodnija za analizu kontaminacije protonima niskih energija. Dakle, važno je ukloniti one događaje iz X-posmatranja koji su najviše pod uticajem protona niskih energija. Tako se selektuju tzv. dobri vremenski intervali GTI, koji se dalje koriste. Ipak, nije lako potpuno očistiti posmatranja od ove vrste pozadine. Ako se filtriranje posmatranja ne izvrši korektno, prisutna SPC može uticati na rezultate analize spektara.

Pozadina se u okviru jednog posmatranja definiše kao skup fotona iz neposredne okoline izvora. Obično, za svaku, konkretnu vasijsku opservatoriju postoje specifična uputstva vezana za izbor i tretiranje pozadine. Moguće je definisati i pozadinu iz posmatranja druge lokacije na nebu, bez X-izvora i to na istim detektorskim koordinatama kao izvor. Pozadina se ili oduzima ili simultano modeluje u zavisnosti od konkretne situacije. Važno je voditi računa da je u praksi jedino pogodno direktno oduzeti čestičnu pozadinu, dok je ostalu neophodno modelovati. Poseban problem prilikom tretiranja pozadine je slučaj kada rasprostrti izvor obuhvata celokupno (ili skoro celo) vidno polje [3].

1.5 Modeli zračenja ostataka supernovih u X-području

Javno dostupni softverski alati za analizu spektara u X-području, kao što su XSPEC ili SPEX (eng. *SPEX X-ray spectral fitting package*) sadrže veliki broj različitih modela elektromagnetnog zračenja raznovrsnih nebeskih tela. Naravno, pruža se i mogućnost da korisnik samostalno implementira i testira novi model. Uglavnom se konkretan, odabrani model sastoji od kombinacije više osnovnih, elementarnih modela zračenja. Neki elementarni modeli su aditivni, a neki multiplikativni i sl. Aditivni modeli predstavljaju mehanizme

emisije (npr. emisione linije sa Gausovim profilima, emisija apsolutno crnog tela (ravnotežnog zračenja), netermalno, sinhrotronsko zračenje opisano stepenim zakonom i dr), dok multiplikativni modeli, zavisno od energije modifikuju neprekidnu emisiju (npr. fotoelektrična apsorpcija, visokoenergijski prekid u neprekidnoj raspodeli i dr). U nastavku ćemo se osvrnuti samo na problematiku vezanu za modele zračenja ostataka supernovih (OSN) u X-području.

Da bi se u potpunosti mogli razumeti različiti mehanizmi proizvodnje (kako neprekidnog, tako i linijskog) elektromagnetnog zračenja, neophodno je poznavati osnove kvantne fizike. U kvantnoj mehanici, fizičkim veličinama odgovaraju konkretni, hermitski operatori koji deluju na funkcije stanja (talasne funkcije) ψ . Hamiltonijan⁴⁴ \hat{H} se uopšte može zapisati preko [55]:

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(r), \quad (1.15)$$

gde oblik $V(r)$ zavisi od tipa potencijalne energije. Za jednu slobodnu česticu je onda $V(r) = 0$. Sopstveni⁴⁵ problem Hamiltonijana predstavlja tzv. stacionarnu Šredingerovu⁴⁶ jednačinu, a odgovarajuće sopstvene vrednosti su dozvoljene vrednosti energije čestice. Za vezane sisteme (npr. elektron u polju, odnosno potencijalnoj jami atomskog jezgra) sopstvene vrednosti Hamiltonijana su diskretne, dok su za slobodne čestice kontinualne. Odličan pregled najvažnijih rezultata kvantne mehanike neophodnih za razumevanje astronomske spektroskopije (pre svega u X-području) može se naći u [25, 68]. Dodatno, kako X-spektroskopija visoke rezolucije nije u fokusu dalje diskusije, detalji vezani za formiranje i profile spektralnih linija neće biti izloženi.

Posmatrano elektromagnetno zračenje plazme je rezultat kolektivnog procesa koji uključuje veliki broj čestica. Ipak, zračenje kosmičke plazme se često može tretirati kao nekoherentan fenomen. To znači da se podrazumeva da do emisije fotona dolazi pri prelazu naelektrisane čestice iz jednog kvantnog stanja u drugo, pri čemu je ukupna emisija sistema onda specifična suma emisije pojedinačnih konstituenata. Dakle, uglavnom je opravdano da se pretpostavi da se svaka pojedinačna naelektrisana čestica koja emituje elektromagnetnu energiju može tretirati kao izolovana.

⁴⁴Prema Hamiltonu (eng. *William Rowan Hamilton*, 1805 – 1865).

⁴⁵Obično se u matematici koristi termin sopstveni problem, dok se u fizici više koristi naziv svojstveni problem.

⁴⁶nem. *Erwin Schrödinger*, 1887 – 1961.

Termalna emisija ostataka supernovih u X-području je kombinacija emisije u linijama (koja kod mladih OSN može čak i dominirati) i neprekidnog spektra⁴⁷. Neprekidno zračenje OSN je dominantno termalno zakočno zračenje nerelativističkih elektrona u polju jona (eng. *thermal bremsstrahlung*) usled visokih temperatura gasa/plazme. Naime, naelektrisana čestica, krećući se u polju druge naelektrisane čestice, skreće pod nekim uglom, pa samim tim menja i brzinu pod dejstvom Kulonove⁴⁸ sile koja se javlja među njima. Emisija fotona ide na račun kinetičke energije čestice zbog čega naelektrisanje usporava (koči). Pošto je elektron i pre i nakon emisije fotona u slobodnom stanju, reč je o slobodno-slobodnoj emisiji (eng. *free-free emission*). Spektar termalnog zakočnog zračenja je neprekidan i emisija je izotropna [68]. Drugi značajni mehanizmi termalnog neprekidnog zračenja OSN uključuju slobodno-vezanu emisiju⁴⁹ (eng. *free-bound emission*; radijativni rekombinacioni kontinuum), kao i tzv. dvofotonsku emisiju (eng. *two-photon continuum*; deekscitacija sa metastabilnog stanja putem emisije dva fotona; [68]).

Detekcija netermalnog sinhrotronskog zračenja ostataka supernovih u X-području uglavnom je vezana za identifikovane pulsarske magline⁵⁰ (plerione) čiji je značajan broj otkriven upravo posmatranjima u X-području. Relativno skoro, veliku pažnju naučne javnosti privuklo je otkriće sinhrotronskog zračenja (elektrona visokih energija reda TeV) u X-području iz ljuski nekoliko mladih OSN. Ta komponenta X-zračenja je tvrđa (veće energije) od termalne. Mladi ostaci supernovih zapravo efikasno ubrzavaju naelektrisane čestice (stvaraju kosmičke zrake do energija reda 10^{15-16} eV; [68]), te je kod njih vidljivo čak i sinhrotronsko zračenje elektrona u X-području koje, dakle nije porekla sa centralnog pulsara/pleriona. Posmatranja ove komponente neprekidnog zračenja omogućavaju da se provere predloženi mehanizmi ubrzavanja naelektrisanih čestica na udarnim talasima ostataka supernovih [67]. Istaknimo ovde i da emisija netermalnog zakočnog zračenja nije u potpunosti isključena kod mladih OSN, iznad nekoliko keV [68].

⁴⁷Termalni i netermalni karakter zračenja zavisi od osobine samog sistema čestica koji emituje elektromagnetno zračenje. Termalno zračenje podrazumeva da je skup čestica koje zrače termalizovan, odnosno da je uspostavljena Maksvelova raspodela.

⁴⁸fra. *Charles-Augustin de Coulomb*, 1736 – 1806.

⁴⁹Inače, radijativna rekombinacija uglavnom dovodi sistem u pobuđeno stanje što, pored radijativnog rekombinacionog kontinuumu dovodi i do rekombinacionih linija.

⁵⁰Pulsarske magline nastaju usled interakcije tzv. pulsarskog vetra (naelektrisanih čestica izrazito visokih energija) i okolne materije.

Ostaci supernovih predstavljaju sudarno jonizovane emisije magline⁵¹. Plazma je jonizovana i ekscitovana kroz veoma složenu interakciju bezsudarnog udarnog talasa i okolne MZM. Elementi su uglavnom višestruko jonizovani. U najvećem broju slučajeva, plazma ostataka supernovih u X-području se može smatrati optički retkom⁵². Kod ostataka supernovih, emisija u linijama uglavnom potiče od vodoniku ili helijumu sličnih jona elementa sa rednim brojevima između 8 (kiseonik) i 28 (nikl), i to, prevashodno od onih parnih. Naravno, ponekada su prisutne i linije ugljenika C i azota N. Najizraženije linije nastaju prelazima sa stanja okarakterisanim glavnim kvantnim brojevima $n \geq 2$ na $n = 1$ (eng. *K-shell transitions*). Inače, vrele plazme ostataka supernovih su prevashodno veoma male gustine, pa je moguće u potpunosti zanemariti procese sudarne deekscitacije, a i fotojonizacija uglavnom nije od značaja. Dodatno, opravdano je pretpostaviti i da će atomi/joni pretežno boraviti u osnovnom stanju. Nekoliko, različitih sudarnih procesa oblikuju emisijski linijski spektar OSN⁵³. To je, najpre sudarna ekscitacija⁵⁴, koju prati radijativna deekscitacija. Zatim, tu su procesi sudarne jonizacije, koja je praćena radijativnom rekombinacijom⁵⁵. Skrenimo još pažnju da sudarna jonizacija obuhvata i proces tzv. unutrašnje sudarne jonizacije (eng. *collisional inner-shell ionisation*). Zapravo, dolazi do (sudarne) jonizacije elektrona iz unutrašnjih ljuski višeelektronskih sistema. Unutrašnju jonizaciju može pratiti i popunjavanje praznine elektronima sa viših nivoa pri čemu se tada energija može osloboditi ne samo putem emisije fotona (karakteristično X-zračenje) već može doći i do (neradijativne) emisije novog (sekundarnog) elektrona sa viših ljuski (proces autojonizacije), tzv. Ožeevog⁵⁶ elektrona. Slično, dolazi i do procesa tzv. ekscitacione-autojonizacije, odnosno takve, specifične ekscitacije elektrona iz unutrašnje ljuske, koja je praćena brzom autojonizacijom⁵⁷. Konačno, bitno je pomenuti i

⁵¹Za razliku od fotojonizovanih maglina kao što su npr. H II regioni i planetarne magline.

⁵²Naravno, ovde je neophodan oprez jer za neke posmatrane emisije linije u X-spektru OSN visoke rezolucije to nije skroz opravdano [68].

⁵³Za detalje pogledati npr. [24] ili [68].

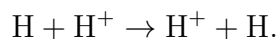
⁵⁴Ekscitacije i jonizacije kod OSN su prevashodno sudarne. Pri tome, pod sudarnom ekscitacijom i jonizacijom se u astrofizici uglavnom misli na neelastične sudare atoma/jona sa elektronima, tzv. elektronske udare.

⁵⁵Pored direktne ekscitacije na neko pobuđeno stanje, procesi rekombinacije i jonizacije takođe mogu dovesti novonastali sistem u pobuđeno stanje.

⁵⁶fra. *Pierre Auger*, 1899 – 1993.

⁵⁷Nakon sudarne ekscitacije, atom/ion dospeva u dvostruko pobuđeno, nestabilno stanje koje podrazumeva bar dva istovremeno pobuđena elektrona. Brzo nastupa neradijativna

dielektronsku rekombinaciju (eng. *dielectronic (dielectric) recombination*). Naime, prilikom ovog procesa rekombinacije, umesto emisije fotona, većina energije slobodnog elektrona se najpre troši na pobudu drugog (vezanog) unutrašnjeg elektrona. Tako se formira kratkoživeće i nestabilno dvostruko pobuđeno stanje koje se zatim može radijativno deekscitovati. Konačno, od interesa je i proces izmene (razmene) naelektrisanja (eng. *charge-exchange, charge-transfer*; videti poglavlje 1.4.2). Reč je o takvom sudarnom procesu (interakciji) dva atoma/jona, pri kojem dolazi do razmene elektrona. Pri tome, uglavnom je finalno stanje pobuđeno, te sledi radijativna deekscitacija. Kao primer, navedimo ukratko jedan slučaj do kojeg dolazi prilikom prostiranja udarnog talasa mladih OSN kroz delimično jonizovani gas. Tada je moguće da, pre same jonizacije, ipak bude prisutan određeni broj (neutralnih) atoma vodonika i u sredini preko koje je prešao udarni front. Takvi neutrali H mogu učestvovati u procesu razmene naelektrisanja sa jonima (protonima) visoke energije H^+ (eng. *shock-heated ions*), pre svega putem reakcije:



Dakle, u delu prostora odmah iza bezsudarnog udarnog fronta mogu postojati i populacije (hladnih) neutrala i (vrućih) jona visokih energija. Neutrali koji učestvuju u razmeni naelektrisanja postaju joni visoke energije, dok prvobitni joni postaju sporije neutralne čestice. Naravno, pored emisije u vidljivom i ultraljubičastom delu elektromagnetnog spektra [68], posmatrane su i različite emisione linije u X-području, poreklom sa OSN, koje upravo nastaju mehanizmom razmene naelektrisanja [13, 28, 54, 64]. Takav je slučaj sa npr. razmenom naelektrisanja između neutralnog vodonika i O VIII.

Spektroskopija ostataka supernovih u X-području pružila je pregršt informacija o ovim nebeskim telima. U slučaju mladih OSN, moguće je ispitivati zastupljenosti različitih elemenata u materiji koja je odbačena tokom eksplozije roditeljske supernove (eng. *ejecta*), ako se raspolože instrumentom dovoljno visoke prostorne i energijske rezolucije. Misli se, pre svega na zastupljenost glavnih proizvoda nukleosinteze tokom eksplozije supernove, na tzv. alfa elemente (jezgra najzastupljenijih izotopa tih elemenata se sastoje od celobrojnih umnožaka jezgara helijuma, tzv. α -čestica; O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca), kao i elemente tzv. grupe gvožđa (pre svega, Fe i Ni). Na temperaturama koje su svojstvene plazmi koju je prebrisao udarni talas ostatka

deekscitacija elektrona bližeg jezgru, uz oslobađanje elektrona koji je dalji od jezgra (autojonizacija).

supernove, obično između 0.2 – 5 keV ($> 10^6$ K), izražene su spektralne emisione linije u intervalu između 0.1 keV i 10 keV (granice su grubo 120 Å i 1 Å). To je upravo oblast energija koju pokrivaju svemirske opservatorije kao što je npr. XMM-Njutn. Dodatno, može se diskutovati i o karakteristikama same eksplozije roditeljske supernove (eng. *progenitor*), te proučavati prostorna raspodela i kinematika različitih hemijskih elemenata. Dakle, stvara se mogućnost provere postojećih teorijskih modela nukleosinteze i eksplozije supernove. U slučaju starijih OSN može se analizirati zastupljenost elemenata, udarnim talasom prebrisane međuzvezdane materije (MZM). Naravno, u oba slučaja spektroskopija u X-području omogućava procenu elektronske temperature i koncentracije, te uopšte analizu velikog broja relevantnih fizičkih karakteristika duž razmatrane plazme OSN.

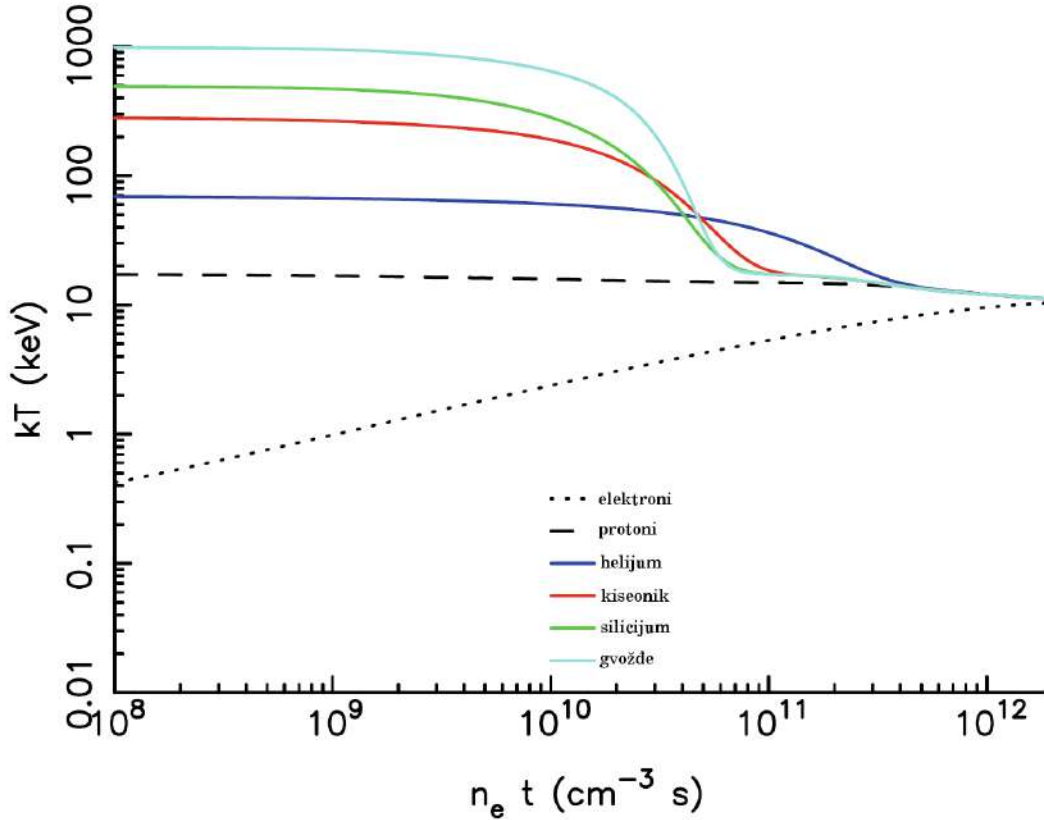
Bez ulaženja u detalje, istaknimo samo da je evolucija ostataka supernovih uslovljena, pre svega dinamikom vodećeg bezsudarnog udarnog talasa [68]. Specifična priroda retkih, bezsudarnih, zamagnetisanih plazmi OSN dovodi do toga da su uglavnom samo pojedinačno termalizovani različiti tipovi čestica⁵⁸. Dakle, ne dolazi do brzog izjednačavanja kinetičkih temperatura elektrona, protona i drugih jona, odmah nakon prolaska kroz udarni front. Da bi se izjednačile kinetičke temperature npr. elektrona i protona može proći i reda 10000 godina, što je duže od procenjene starosti pojedinih OSN. Elektronska temperatura T_e je uglavnom niža od kinetičke temperature protona T_p . Verodostojna merenja odnosa T_e/T_p su od velikog značaja za bolje razumevanje fizičkih procesa bezsudarnim udarnim talasima (za detaljnu diskusiju pogledati [50]). Zapravo, obično je $m_e/m_p \ll T_e/T_p < 1$, gde su m_e i m_p mase elektrona i protona, respektivno⁵⁹. Ako se izuzmu iz razmatranja efekti efikasnog ubrzavanja naelektrisanih čestica, kod mladih OSN (koji dovode do nižih temperatura), može se, grubo pisati da je u srednjem $\langle kT \rangle \propto \mu m_p V_{sh}^2$, gde je μ srednja molekulska masa (grubo oko 0.6 za potpuno jonizovanu plazmu sa zastupljenostima elemenata kao u Suncu, dok za plazme sa značajnim prisustvom neutrala može biti veća od jedinice), a V_{sh} brzina udarnog talasa. Naravno, slično važi i za slučaj kada se izjednače

⁵⁸Odvija se proces tzv. bezsudarnog zagrevanja plazme (eng. *collisionless shock heating*), koji je, prosto rečeno, vođen elektromagnetnim talasima i nestabilnostima u retkoj, zamagnetisanoj plazmi OSN. Reč je, zapravo o kolektivnim interakcijama između naelektrisanih čestica i prisutnih elektromagnetnih polja.

⁵⁹Mnogo je i dalje otvorenih pitanja vezanih za problematiku bezsudarnog zagrevanja. To se posebno odnosi na pitanje u kojoj meri su za izjednačavanje temperatura elektrona i jona zaslužni bezsudarni procesi, a u kojoj meri binarni, Kulonovi sudari.

temperature svih čestica. U suprotnom, ekstremnom slučaju kada se kinetičke temperature čestica najviše razlikuju, važi da je $kT_i \propto m_i V_{\text{sh}}^2$, gde indeks i označava različite čestice (elektrone, protone i dr). Ispostavlja se da je najvažniji parametar koji služi za procenu stepena izjednačavanja temperatura različitih čestica (eng. *temperature equilibration*) upravo tzv. (srednja) jonizaciona starost (eng. *ionization age*, *ionization timescale*, *ionization parameter*), $n_e t$, gde je n_e koncentracija elektrona iza udarnog fronta, a t starost OSN. Taj parametar se, zajedno sa temperaturom elektrona može odrediti analizom spektara OSN u X-području. Naime, istaknimo ovde da je najveći broj karakteristika termalne komponente emisijonog spektra OSN u X-području (npr. oblik kontinuuma termalnog zračnog zračenja) određen baš elektronskom temperaturom. Temperatura jona, pak igra važnu ulogu pri termalnom, Doplerovom⁶⁰ širenju spektralnih linija, što je, za razliku od spektroskopije u vidljivoj oblasti i dalje gotovo nedostupno preciznom merenju pomoću savremenih opservatorija za posmatranja u X-području. Kako se iz posmatranja u X-području može lako odrediti elektronska temperatura, važno je nezavisno poznavati odnos elektronske i jonske temperature, za šta postoji više metoda (za detaljan pregled videti [50]). Dodatno, na osnovu posmatranja u X-području, može se nezavisno od jonizacione starosti proceniti i elektronska koncentracija, te se tako pruža mogućnost i procene starosti ostatka. Na slici 1.3 je prikazana zavisnost kinetičke temperature elektrona, protona, i drugih, relevantnih jona na udarnom frontu, od jonizacione starosti, za udarni talas brzine 3000 km/s. Pretpostavlja se da odmah iza udarnog fronta važi $kT_i \propto m_i V_{\text{sh}}^2$. Jasno se uočava da se za vrednosti $n_e t \gtrsim 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ uspostavlja režim izjednačenih temperatura svih tipova čestica.

⁶⁰nem. *Christian Johann Doppler*, 1803 – 1853.



Slika 1.3: Zavisnost kinetičke temperature elektrona, protona, i drugih, relevantnih jona, od jonizacione starosti (prema [68]).

Sasvim uopšteno, u kosmičkim plazmama se mogu uspostaviti različiti tipovi jonizaciono-rekombinacionih ravnoteža. U zvezdanim koronama ili vreloj međuzvezdanoj materiji je tako uspostavljena koronalna ili sudarna jonizaciona ravnoteža⁶¹ (videti pominjanje modela CIE u poglavlju 1.4.1). Zapravo, pojednostavljeno, model koronalne plazme⁶² uglavnom podrazu-

⁶¹Sudarna jonizaciona ravnoteža (koronalni model) ne odgovara ravnotežnoj, Sahinoj (eng. *Meghnad Saha*, 1893 – 1956) raspodeli po stanjima jonizacije, koja važi pri uslovu (lokalne) termodinamičke ravnoteže.

⁶²Navedimo samo nekoliko poznatih emisionih modela koji podrazumevaju CIE, koji su implementirani u XSPEC-u: *apec* (*Astrophysical Plasma Emission Code*; [59]), *raymond* [51], *mekal* (*MEwe, KAastra & Liedahl*; [40]) i dr.

meva da je na datoj temperaturi uspostavljena ravnoteža između, sa jedne strane sudarne jonizacije iz osnovnih stanja prisutnih atoma i jona, a sa druge strane radijativne rekombinacije sa viših stanja jonizacije. Stanje CIE podrazumeva da različiti tipovi čestica (elektroni, protoni i drugi joni) imaju istu temperaturu. Ipak, materija koja je prebrisana udarnim talasom OSN predstavlja jednu neravnotežnu plazmu (eng. *non-equilibrium ionisation*, NEI). Dakle, plazma OSN uglavnom nije u jonizaciono-rekombinacionoj ravnoteži. Konkretno, naglo zagrevanje udarnim talasom obično prate dosta sporiji procesi jonizacije, pa se može reći da je plazma mladih OSN nedovoljno jonizovana (eng. *underionized, ionizing plasma*) u poređenju sa ravnotežnim CIE stanjem na datoj temperaturi. Dakle, kod nedovoljno jonizovanih plazmi javljaju se niža stanja jonizacije nego što bi se to očekivalo samo na osnovu poznavanja elektronske temperature. Dakle, u slučaju plazmi mladih OSN, efekat NEI se ogleda kroz to da su jonizaciona stanja na datoj temperaturi niža nego što je to slučaj za CIE. Na niskim koncentracijama čestica svojim ostacima supernovih⁶³, nije proteklo dovoljno vremena od kada je prošao udarni front, tako da je proces jonizacije veoma spor, te je potrebno mnogo vremena da se postigne ravnoteža. Skrenimo pažnju da poseban slučaj predstavljaju plazme koje su više jonizovane nego što bi bilo očekivano u slučaju CIE na konkretnoj temperaturi (eng. *overionized, recombining plasma*), kod kojih je došlo do naglog hlađenja elektrona (usled adijabatskog širenja i/ili termalnog provođenja), te zatim sporijeg procesa rekombinacije. To je situacija koja se često javlja kod tzv. ostataka mešane morfologije (eng. *mixed-morphology supernova remnants*). Elektroni su tada relativno hladni u poređenju sa dominantnim jonizacionim stanjima prisutnih elemenata. Kod rekombinacionih plazmi (koje se primećuju kod ponekih OSN mešane morfologije), jonizaciona stanja su viša nego što bi se to očekivalo kada je uspostavljen režim CIE. Dakle, tada je stepen jonizacije atoma veći od očekivanog na osnovu procenjene temperature elektrona. Pomenimo i da je kod plazmi OSN koje nisu dovoljno jonizovane, radijativni rekombinacioni kontinuum teško uočljiv. Sa druge strane, to nije slučaj kod rekombinacione plazme pojedinih OSN mešane morfologije. Uglavnom se smatra da CIE model može biti odgovarajući samo za OSN sa globalnom brzinom udarnog talasa $V_{sh} < 500$ km/s. Važno je istaći da jonizaciona starost $n_e t$ ukazuje i

⁶³Za tipičnu vrednost elektronske koncentracije OSN se može izabrati $n_e = 1 \text{ cm}^{-3}$, mada vrednosti mogu biti i mnogo manje, kao i nešto veće. Naravno, elektronska koncentracija se takođe može menjati tokom vremena pri evoluciji OSN.

na proces uspostavljanja jonizaciono-rekombinacione ravnoteže. Obično se može reći da je dostignuta CIE za one plazme čija je jonizaciona starost $\gtrsim 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, što odgovara, ranije pomenutom uslovu za uravnotežavanje temperatura različitih tipova čestica (videti sliku 1.3). U većini posmatranih OSN plazma je $n_e t \ll 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Trenutno je implementirano više emisionih modela vreljih, optički retkih, sudarno jonizovanih plazmi male gustine koji podrazumevaju NEI, u postojeće softverske alate za obradu i analizu posmatranja u X-području. Razlike su kako u poboljšanjima vezanim za atomsku fiziku⁶⁴, tako i u dodavanju različitih fizičkih procesa relevantnih za konkretna nebeska tela⁶⁵. Važno je istaći da spektar u X-području bitno zavisi i od detalja vezanih za strukturu i dinamiku OSN. U tom smislu je najkorektnije koristiti odgovarajuće numeričke simulacije OSN zajedno sa sintezom (računom) spektara. Ipak, za interpretaciju savremenih X-spektara to je često, još uvek previše nepraktično i zahtevno. Iz tog razloga je pogodnije koristiti različite, aproksimativne, analitičke metode. Izdvojimo tako npr. model `sedov` u XSPEC-u, koji podrazumeva Sedov-Tejlorovu⁶⁶ dinamiku OSN [5]. Dodatno pojednostavljeno je se npr. ogleda kroz jedan prostiji model `ps shock`, implementiran u XSPEC-u. Reč je o NEI modelu koji sadrži u sebi fizičke procese vezane za ravne paralelne udarne frontove⁶⁷ OSN, koji često daje zadovoljavajuće rezultate, te se u velikom broju slučajeva poklapa sa složenijim modelom `sedov` (za više detalja videti [5]).

Istaknimo da, u ranim fazama, vodeći udarni talas OSN zagreva okolnu materiju, dok povratni udarni talas (eng. *reverse shock*) zagreva odbačeni zvezdani materijal. Dodatno, interakcija udarnog talasa i oblaka međuzvezdane materije proizvodi dodatne talase, npr. reflektovane udarne talase koji dodatno prelaze preko već prebrisane MZM i uslođavaju spektre ostataka supernovih u X-području.

Međuzvezdana ekstinkcija igra važnu ulogu tokom oblikovanja posmatranog spektra ostataka supernovih u X-području. Pri tome, proces foto-

⁶⁴Npr. upotreba podataka iz tzv. AtomDB baze podataka.

⁶⁵Recimo, standardni NEI model u XSPEC-u, `nei` (eng. *Non-Equilibrium Ionization collisional plasma model*), ne uključuje fiziku OSN.

⁶⁶eng. *Leonid Ivanovitch Sedov*, 1907-1999; eng. *Geoffrey Ingram Taylor*, 1886-1975.

⁶⁷Prilikom razmatranja zračenja delova OSN, uglavnom je opravdano pretpostaviti da je bezsudarni udarni talas OSN (lokalno) ravan. Varijanta `vpshock` podrazumeva da je moguće menjati (varirati) pojedinačne vrednosti zastupljenosti elemenata. Slično važi i za model `vsedov`.

jonizacije (radijativne jonizacije, vezano-slobodnog procesa) je dominantna komponenta međuzvezdane ekstinkcije u oblasti između oko 0.1 – 10 keV. Dakle, neutralna ili delimično jonizovana MZM je u stanju da efikasno slabi X-zračenje i to po eksponencijalnom zakonu, $e^{-\tau}$, gde je sa τ označena optička dubina (debljina). U velikom broju slučajeva optička dubina se može zapisati preko [33, 38]:

$$\tau = N_{\text{H}}\sigma, \quad (1.16)$$

gde je sa N_{H} označena tzv. ekvivalentna linijska gustina (eng. *equivalent column density*) vodoničnog sadržaja (atomskog i molekuskog) određena iz X-posmatranja, a sa σ ukupni efikasni presek (verovatnoća) za procese koji dovode do ekstinkcije, po pomenutoj, ekvivalentnoj linijskoj gustini. Prisećanja radi, skrenimo pažnju da se linijska gustina, uopšte može shvatiti kao mera količine međuzvezdane materije između posmatrača i nebeskog tela. Inače, uobičajeno je da se linijska gustina izražava preko broja neutralnog vodonika po jedinici površine (u tzv. cgs sistemu; dakle, po cm^2) duž vizure. Zapravo, pomenuta površina se odnosi na poprečni presek zamišljenog cilindra čija se osa poklapa sa pravcem vizure⁶⁸. Tipične vrednosti ekvivalentne linijske gustine N_{H} u pravcu većine Galaktičkih ostataka supernovih su reda $10^{21} - 10^{22} \text{ cm}^2$. Pri energijama fotona u X-području, za dominantnu ekstinkciju zaslužni su teži elementi MZM. Ispod 1 keV, C, N, O i Ne su uglavnom najznačajniji, a iznad 1 keV su Si, S i Fe [12]. Naime, doprinos ekstinkciji X-zračenja od strane relevantnih elemenata MZM ulazi u izraz za ukupni efikasni presek [38]. Dodatno, pored fotojonizacije, rasejanje na česticama prašine i Komptonovo⁶⁹ rasejanje ponekad mogu dati doprinos slabljenju kosmičkog X-zračenja. Softverski alati kao što je XSPEC sadrže različite modele međuzvezdane ekstinkcije u X-području, kao što je npr. `tbabs` (eng. *The Tuebingen-Boulder ISM absorption model*). Pomenuti model uključuje i uticaj gasa, prašine, kao i molekuskog sadržaja (molekuskog vodonika) u MZM. Vrednosti zastupljenosti elemenata se takođe mogu prilagođavati (npr. opcija `abund wilm` za jedan, konkretan model zastupljenosti elemenata u međuzvezdanoj materiji, koji je često u upotrebi; [71]; ali videti i [38] i dr).

⁶⁸Posebno interesantna oblast na nebeskoj sferi je tzv. Lokmanova šupljina ili rupa (eng. *Lockman Hole*) zbog veoma male vrednosti linijske gustine, $N_{\text{H}} \approx 4.5 \times 10^{19} \text{ cm}^2$.

⁶⁹Prema Komptonu (eng. *Arthur Holly Compton*, 1892 – 1962).

Glava 2

Galaktički ostatak supernove Petlja u Labudu

Petlja u Labudu (lat. *Cygnus Loop*) je Galaktički ostatak supernove¹. Spada u tzv. ljuskastu klasu ostataka supernovih. Ljuskasti ostaci (eng. *shell-type supernova remnants*) imaju prstenastu morfologiju, usled 2D projekcije (u najgrubljoj aproksimaciji) sferne ljuske na nebesku sferu. Reč je o najbrojnijem tipu OSN.

Najnovija procena udaljenosti do ovog ostatka iznosi 725 ± 15 pc [18]. Inače, precizno određivanje rastojanja do nebeskih tela je povezano sa nizom praktičnih problema, posebno kada je reč o ostacima supernovih. Navedimo samo jedan metod koji daje dobre rezultate kod bliskih, evolutivno starijih ostataka supernovih (temperatura u ljusci je grubo između 5000 – 50000 K) velikih uglovnih dimenzija. Ukoliko se otkrije zvezda unutar ljuske nekog OSN, tada je moguće odrediti udaljenost do tog, konkretnog objekta. Naime, u spektrima zvezda koje se nalaze unutar ljuske OSN, a čije elektromagnetno zračenje prolazi i kroz materiju OSN (interaguje sa njom), manifestuju se specifične apsorpcione linije u vidljivoj i ultraljubičastoj oblasti (npr. određene linije Na I i Ca II), koje su (zbog širenja ljuske) pomerene ka plavom delu spektra [17]. Zvezde koje se nalaze u pozadini (iza OSN, a samo su projektovane unutar ljuske) pak pokazuju pomeranja i ka plavom i ka crvenom delu spektra kako uzorkuju obe strane ljuske (koja se pomera i ka nama i od nas). Sa druge strane, kod zvezda koje se nalaze ispred OSN ne posmatraju

¹Obično se označava kao G74.0-8.5. Naime, svi Galaktički OSN se označavaju brojevima koji ukazuju na galaktičke koordinate (za detalje videti Grinov (eng. *Green*) katalog Galaktičkih ostataka supernovih [20]).

se takve apsorpcione linije. Udaljenost do ostatka se onda procenjuje kao srednja vrednost rastojanja svih zvezda za koje se utvrdi da se nalaze unutar ljuske. U konkretnom slučaju ostatka Petlja u Labudu, udaljenosti do zvezda su određene na osnovu merenja paralaksi pomoću svemirskog teleskopa Gaja (eng. *Gaia; Global Astrometric Interferometer for Astrophysics*).

Ostatak supernove Petlja u Labudu je, samo približno pravilne, kružne ljuskaste strukture, sa jasno izraženim odstupanjima, pre svega na južnoj strani (pogledati sliku 2.1). Srednji ugaoni radijus Petlje u Labudu je reda 1.5 stepeni, što ga čini veoma rasprostrtim izvorom na nebeskoj sferi. Najnovije procene starosti ostatka od oko 20000 godina ukazuju da je znatno stariji nego što se ranije mislilo [17]. Uzimajući u obzir ugaone dimenzije, kao i najnoviju procenu udaljenosti do ostatka, sledi da je stvarni radijus oko 19 pc.

Velika uglovna veličina i površinski sjaj ovog ostatka omogućavaju da se istraže različiti, fini detalji (npr. filamenti) u okviru složene morfologije². Petlja u Labudu je veoma kompleksan OSN kod kojeg se manifestuju kako radijativni, tako i neradijativni udarni talasi (filamenti), sa različitim brzinama prostiranja (150 – 400 km/s; [56], [69]). Do nedavno je preovladavao stav da velike razlike u karakteristikama udarnog talasa duž ostatka ukazuju da se Petlja u Labudu širi kroz svojevrsnu šupljinu male gustine (kao kroz unutrašnjost nekog mehura), nastalu prostiranjem jakog vetra zvezde roditelja (eng. *wind-blown cavity*). Naime, delovi ostatka se prostiru kroz retku sredinu u unutrašnjosti takvog mehura formiranog zvezdanim vetrom pre pojave supernove, dok su ostali delovi već sustigli gustu ljusku (promenljive debljine) koja okružuje šupljinu i interaguju sa njom [41, 45, 68]. Ipak, danas postoji i mišljenje da se ostatak samo širi kroz sredinu male gustine, dok mu delovi interaguju sa različitim međuzvezdanim oblacima. Dakle, prema najnovijim istraživanjima, morfologija razmatranog OSN je posledica njegovog položaja daleko van Galaktičke ravni, gde se nalazi u retkoj sredini, no ipak okružen sa nekoliko gustih molekulskih oblaka [16, 17, 18]. Još uvek nije, u potpunosti jasno koja je od ove dve interpretacije valjana.

Prema dosadašnjim saznanjima, oni delovi ostatka supernove Petlja u Labudu koji se veoma lako uočavaju u vidljivoj oblasti elektromagnetnog spektra, poznati su još od vremena velikog astronoma posmatrača Vilijema

²Udarni talasi interaguju sa različitim oblicima nehomogenosti u MZM (manji ili veći oblaci MZM), što uzrokuje veoma složenu emisiju elektromagnetnog zračenja. Inače, interakcija udarnog talasa i oblaka dalje uzrokuje reflektovane i transmitovane udarne talase, što unosi dodatnu kompleksnost [35, 49].

Heršela³. Konkretno, reč je o emisioj, svetloj maglini Veo (eng. *Veil Nebula*), koju je Heršel otkrio 1784. godine [6]. Naravno, u tom periodu ljudske istorije još nisu postojali koncepti supernove i ostatka supernove. Dodatno, tek su, mnogo godina kasnije, radio-posmatranja⁴ utvrdila da je konkretna maglina zapravo ostatak supernove [4].

Kako udarni talas OSN usporava tokom vremena, sve više dolazi do značajnih gubitaka energije putem zračenja (eng. *radiative cooling*), u oblasti iza udarnog fronta (što je u početnim fazama moglo da se zanemari), te sve izraženijeg hlađenja. Udarni talas postaje radijativni⁵. Tako se u oblasti iza udarnog fronta stvaraju uslovi za emisiju različitih linija u vidljivom području. Na taj način je utvrđeno i da pojedini posmatrani optički filamenta OSN Petlja u Labudu odgovaraju tzv. radijativnim udarnim talasima [69]. Konkretnije, brzo hlađenje i rast gustine iza radijativnog udarnog talasa dovodi do formiranja svetlih filamenata. Izdvaja se emisija u linijama, pre svega u $H\alpha$, kao i u brojnim linijama koje odgovaraju tzv. zabranjenim prelazima (npr. azota, kiseonika i sumpora). Dakle, kada je reč o radijativnim udarnim talasima, emisija u linijama, u vidljivoj oblasti dovodi do velikih gubitaka energije zračenjem, te se plazma hladi. Javlja se strmi gradijent temperature iza udarnog fronta. Dodatno, to menja i stepen jonizacije prisutnih atoma kako se udaljava od udarnog fronta (za detalje videti [68]). Emisione linije usled dozvoljenih, rezonantnih prelaza su manje brojne u poređenju sa zabranjenim u vidljivom području⁶. Istaknimo, na ovom mestu i da je kod pojedinih mladih OSN, sa neradijativnim udarnim talasom koji se prostire kroz delimično neutralnu sredinu, moguća jaka emisija u vidljivom području, u jednoj maloj oblasti iza udarnog fronta. Takvi spektri

³Između ostalog, Heršel (nem. *Friedrich Wilhelm Herschel*, 1738 – 1822) je poznat po otkriću planete Uran, infracrvenog zračenja, a dao je doprinos i zvezdanoj astronomiji.

⁴Ostaci supernovih su veoma sjajni u radio-području. Posmatra se, prevashodno sinhrotronska emisija ultrarelativističkih elektrona u radio-području. Naime, na udarnim talasima OSN dolazi do ubrzavanja naelektrisanih čestica, te do stvaranja kosmičkih zraka [67].

⁵Skrenimo pažnju da mladi OSN mogu jednim svojim delom interagovati sa oblacima MZM, te formirati lokalne radijativne udarne talase. Dodatno, OSN koji se prostiru kroz gušću sredinu ranije postaju radijativni u odnosu na one koji se prostiru kroz retku sredinu. U tom smislu se koristi termin evolutivno mlađi/stariji ostaci.

⁶Ispada da je malo dozvoljenih prelaza u vidljivoj oblasti za prisutne jone. Zaista, za jednostruko ili dvostruko jonizovane atome velikog broja najzastupljenijih elemenata nema mnogo dozvoljenih prelaza u vidljivoj oblasti. Dodatno, rasejanje u rezonantnim linijama (eng. *resonant line scattering*) isto dovodi do manjka rezonantnih linija [68].

pokazuju prisustvo Balmerovih⁷ linija, bez znatne emisije u linijama zabranjenih prelaza (eng. *Balmer-dominated shocks*).

Petlja u Labudu je do sada više puta posmatrana u X-području i to sa različitim svemirskim opservatorijama. Ispostavlja se da su zastupljenosti elemenata u ljusci (pogledati sliku 2.2), svetloj u X-području, manje od standardnih vrednosti za Sunce (eng. *sub-solar*; [26, 27, 44, 46, 47]). Recimo, posmatrana mala zastupljenost neona (Ne) ukazuje da to nije posledica razaranja prašine⁸ [68]. Ipak, u blizini spoljašnje ivice ostatka javljaju se izvesne oblasti čija je zastupljenost veća od srednje za ljusku [27]. Ispostavlja se da se to, samo prividno povećanje zastupljenosti na pojedinim mestima na samoj ivici ljuske ostatka može objasniti pojačanom emisijom kiseonika usled procesa razmene naelektrisanja između neutralnog vodonika i O VIII jona [13, 28, 54, 64]. Sa druge strane, unutrašnjost OSN Petlja u Labudu, nižeg površinskog sjaja predstavlja sredinu obogaćenu metalima [66]. Ta sredina ima višu temperaturu, reda 0.6 keV od znatno svetlije, ali hladnije ljuske, sa reda 0.2 keV [63]. Dodatno, unutar vrele unutrašnjosti postoji izvesna diferencijacija elemenata. Naime, O, Ne i Mg su brojniji u spoljašnjim delovima, dok su Si, S, Ar i Fe najbrojniji u centralnoj oblasti [63, 65]. To ukazuje na slojevitú eksploziju, pri čemu su teži elementi bili smešteni u centru zvezde roditelja (eng. *progenitor*). U svakom slučaju, analiza zastupljenosti unutrašnjosti ostatka daje rezultate u skladu sa pretpostavkom da je reč o OSN nastalom usled kolapsirajuće supernove (eng. *core collapse supernova*) sa početnom masom zvezde roditelja od oko 15 masa Sunca [63]. Procene su da je reč o eksploziji crvenog superdžina sa, još uvek značajnom količinom vodoničnog omotača u trenutku eksplozije [68]. Dodatno, posmatrana, asimetrična raspodela metala ukazuje na asimetričnu eksploziju supernove [63].

Nedavno su, u cilju određivanja vrednosti brzina udarnih talasa u OSN Petlja u Labudu, korišćena merenja sopstvenih kretanja odgovarajućih filamenata sa severoistočnog dela ostatka (pogledati sliku 2.1), uz najnoviju procenu udaljenosti [43, 69]. Sopstvena kretanja su merena tako što su upoređivani snimci ostatka u H α emisiji iz dve različite epohe. Merene su i upoređivane brzine neradijativnih i radijativnih filamenata, pri čemu su radijativni filamenta prepoznavani na osnovu vidljivosti u [S II] emisiji, koja je

⁷nem. *Johan Jakob Balmer*, 1825 – 1898.

⁸Skrenimo pažnju da je u slučaju Petlje u Labudu moguće uočiti proces destrukcije prašine [61].

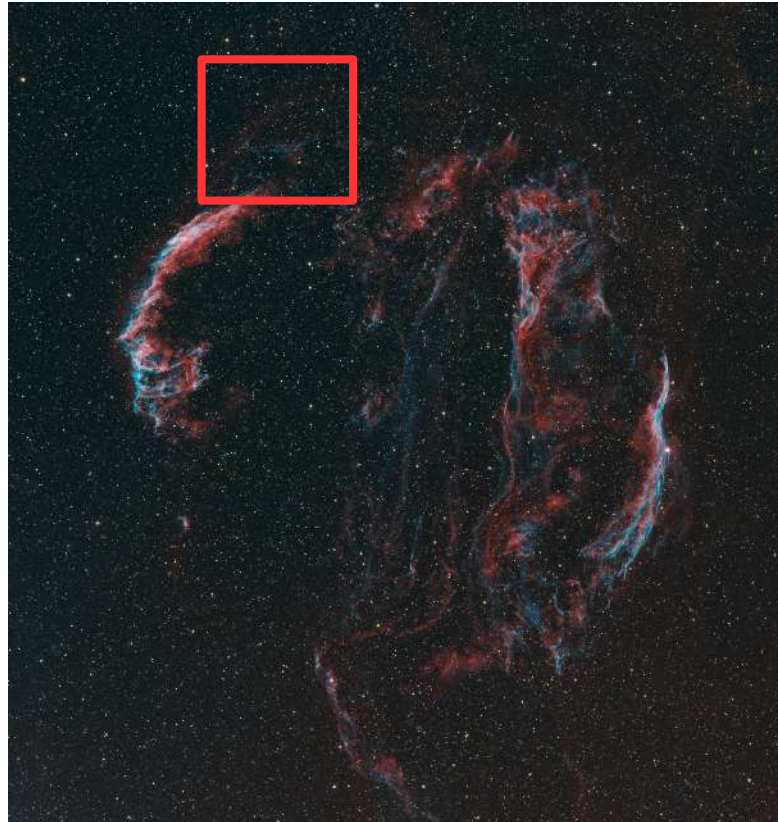
karakteristična za radijativne udarne talase. Proučavanje filamenata je od velikog značaja pri razmatranju fizičkih osobina u bezsudarnim talasima.

Na slici 2.1 prikazan je Galaktički OSN Petlja u Labudu u vidljivom delu spektra. Crvenom bojom je označena emisija u $H\alpha$, plavom u $[O III]$, a zelenom u $[S II]$. Sever je gore, a istok levo. Najsvetliji delovi odgovaraju skoro pravilnoj ljusci sa zapadne i istočne strane OSN. Crvenim kvadratom je grubo obeležena oblast u kojoj se nalaze razmatrani filamenti u ovom radu.

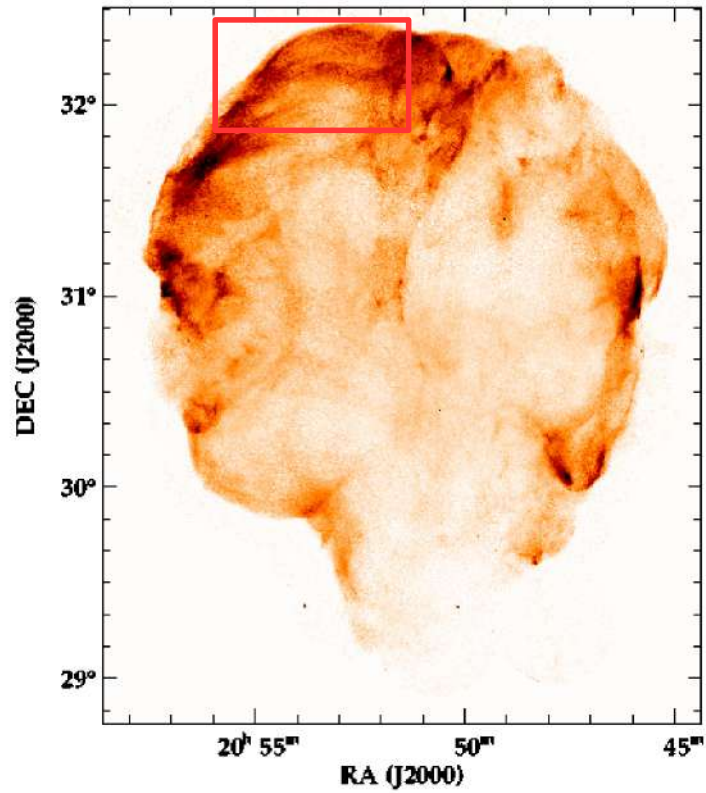
Dodatno, na slici 2.2 je predstavljen kompozitni snimak celog OSN Petlja u Labudu u X-području, 0.1 – 2.5 keV [34, 36]. Reč je o posmatranjima ostvarenim pomoću HRI (eng. *High Resolution Imager*) instrumenta svemirske opservatorije ROSAT (nem. *Röntgensatellit*). Crvenim okvirom je opet grubo obeležena oblast u kojoj se nalaze razmatrani filamenti u ovom radu.

Konačno, na slici 2.3 je predstavljen OSN Petlja u Labudu u radio-području na 325 MHz [28]. Reč je o snimku sa WENSS pregleda severnog neba (eng. *The Westerbork Northern Sky Survey*; [53]). Bela linija grubo prikazuje granice prostiranja ostatka u X-području (posmatranja sa ROSAT opservatorije).

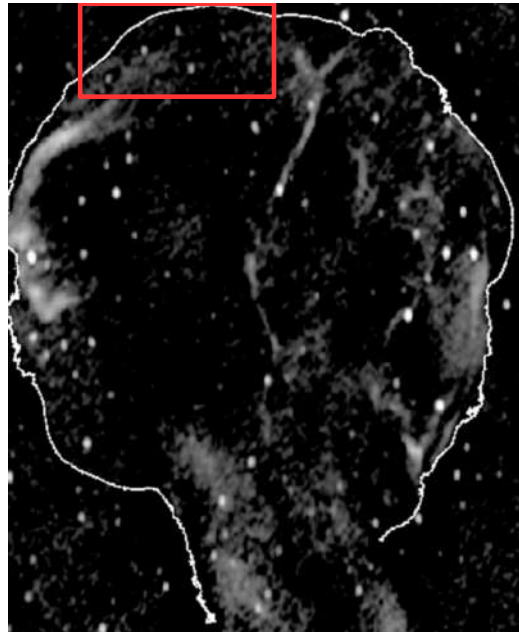
U nastavku će biti više reči o analizi filamenata razmatranih u [43, 69]. Konkretno, biće diskutovani spektri pomenutih filamenata u X-području (pogledati slike 2.1 i 2.2), na osnovu posmatranja ostvarenih pomoću svemirske opservatorije XMM-Njutn.



Slika 2.1: Galaktički OSN Petlja u Labudu u vidljivom delu elektromagnetnog spektra. Crvenom bojom je prikazana emisija u $H\alpha$, plavom u $[O III]$, a zelenom u $[S II]$. Sever je gore, a istok levo. Najsvetliji delovi odgovaraju skoro pravilnoj ljusci sa zapadne i istočne strane OSN. Crvenim kvadratom je grubo obeležena oblast u kojoj se nalaze razmatrani filamenti u ovom radu (Autor: *Martin Pugh*).



Slika 2.2: Kompozitni snimak celog OSN Petlja u Labudu u X-području [34, 36]. Reč je o posmatranjima ostvarenim pomoću HRI instrumenta svemirske opservatorije ROSAT (0.1 – 2.5 keV). Crvenim okvirom je grubo obeležena oblast u kojoj se nalaze razmatrani filamenti u ovom radu (Autor: *Levenson et al.*; [34, 36]).



Slika 2.3: Snimak Petlje u Labudu u radio-području na 325 MHz. Bela linija grubo prikazuje granice prostiranja ostatka u X-području. Crvenim okvirom je grubo obeležena oblast u kojoj se nalaze razmatrani filamenti u ovom radu (Autor: *Katsuda et al.*; [28, 53]).

Glava 3

Analiza spektara neradijativnih i radijativnih filamenata u X-području

Pre same redukcije i analize posmatranja (slika i spektara) neradijativnih i radijativnih filamenata OSN Petlja u Labudu, u X-području, neophodno je dobro se upoznati sa svim relevantnim instrumentima koji čine konkretnu svemirsku opservatoriju. Dakle, prvo sledi kratak opis instrumentarijuma koji sadrži XMM-Njutn, konkretno EPIC kamera koje su od interesa za ovaj rad, pa upoznavanje sa javno dostupnim podacima sadržanim u okviru zvanične arhive posmatranja (poglavlje 3.1). Zatim će biti opisan proces redukcije posmatranja (3.2) i najvažnijih rezultata (3.4).

3.1 Svemirska opservatorija XMM-Njutn

3.1.1 Instrumenti

Svemirska opservatorija XMM-Njutn obuhvata nekoliko instrumenta za prikupljanje i detekciju fotona u X-području. Na ovom mestu će biti dat koncizan pregled najvažnijih osobina kolektora i detektora X-zračenja, relevantnih za ovaj rad. Konkretno, diskusija će biti fokusirana na EPIC kamere i odgovarajuće kolektore.

XMM-Njutn sadrži tri X-teleskopa. Svaki od prva dva X-teleskopa (kolektora) fokusiraju deo (oko 44%) upadnog X-zračenja na EPIC MOS kameru

(videti poglavlje 1.2.2), a ostatak na spektrometar sa refleksionom difrakcionom rešetkom (eng. *Reflection Grating Spectrometers*, RGS). Treći X-teleskop fokusira svo prikupljeno X-zračenje na EPIC PN kameru (videti poglavlje 1.2.2). Dakle, kada je reč o detekciji X-zračenja, XMM-Njutn raspolaže sa pet instrumenata, EPIC MOS 1, EPIC MOS 2, EPIC PN, RGS 1 i RGS 2. Inače, svaki od pomenuta tri X-teleskopa¹ se sastoji od 58 uklopljenih Volterovih ogledala prvog tipa (videti poglavlje 1.1). Podsetimo se da je Volterov sistem prvog reda sačinjen od kombinacije paraboloidnih i hiperboloidnih ogledala koja su postavljena na istoj optičkoj osi tako da im se žiže poklapaju (dakle, koaksijalno i konfokalno). Svi X-teleskopi leže u istom pravcu, a PSF izrazito zavisi od udaljenja u odnosu na centar vidnog polja. Na velikim udaljenostima od optičke ose, PSF je izdužen, usled vanosnih aberacija (astigmatizma). Naravno, postoji i slaba zavisnost PSF-a od energije fotona. Svaki od tri X-teleskopa ima specifičan PSF (za više detalja videti u [52]).

Šesti instrument u okviru XMM-Njutna je OM (eng. *Optical Monitor*), koji omogućava posmatranja u vidljivom i ultraljubičastom delu spektra. Obično svih šest instrumenata rade (posmatraju) simultano. Kako u ovom radu nije od interesa spektroskopija visoke rezolucije², detalji vezani za RGS neće biti izloženi. Uz to, neće biti diskusije ni o OM instrumentu. Za više detalja o svim uređajima³ u okviru XMM-Njutna videti u [57].

Tri pomenute EPIC kamere omogućavaju kvalitetna posmatranja u intervalu energija između oko 0.15 – 12 keV, sa spektralnom (energijskom) rezolucijom od oko $E/\Delta E \sim 20 - 50$. Ugaona (prostorna) rezolucija EPIC instrumenata je prevashodno određena PSF-om odgovarajućeg kolektora. FWHM PSF-a i HEW PSF-a za teleskope sa EPIC MOS kamerama, na optičkoj osi su reda 5'' i 14'', respektivno. Za teleskop sa EPIC PN kamerom iznose reda 6'' i 15'', respektivno. Veličina vidnog polja je oko 30' u prečniku.

¹Skrenimo pažnju da se XMM-Njutn ističe u odnosu na ostale svemirske opservatorije velikom efektivnom površinom (videti poglavlja 1.3.2 i 1.3.3), sa maksimumom na 1.5 keV (zavisi od energije). Setimo se da efektivna površina zavisi i od udaljenosti od optičke ose. Naravno, ukupna efektivna površina (ne samo kolektorska) zavisi i od primenjenih filtera, pa samim tim i kvantne efikasnosti.

²RGS instrumenti omogućavaju posmatranja spektara u intervalu energija između 0.33 – 2.5 keV, sa $E/\Delta E \sim 200 - 800$.

³Skrenimo pažnju da u okviru svemirske opservatorije XMM-Njutn postoji i ERM (eng. *EPIC Radiation Monitor*) uređaj. Osnovna funkcija mu je prikupljanje informacija o čestičnom okruženju letelice (npr. uticaj radijacionih pojaseva planete Zemlje ili flerova sa Sunca), pre svega radi brzog reagovanja na potencijalno opasne nivoe korpuskularnog zračenja koje bi moglo oštetiti instrumente.

Svaka od EPIC MOS kamera se, zapravo pojedinačno sastoji od sedam (trofaznih, frontalno osvetljenih) CCD čipova. Centralni CCD čip je postavljen u fokus teleskopa, dok je preostalih šest postavljeno tako da prate krivinu fokalne ravni (pojedinačni čipovi, dakle nisu svi u istoj ravni), kako bi se što bolje fokusirali izvori van optičke ose. EPIC PN kamera se sastoji od dvanaest samostalnih jedinica, pozadinski osvetljenih p-n CCD čipova, koje su postavljene na jednu, zajedničku ploču. Izdvajaju se četiri kvadranta od po tri pomenute samostalne jedinice. Fokus teleskopa se poklapa sa CCD 4 u prvom kvadrantu.

Važno je napomenuti da je od početka rada⁴ do danas, XMM-Njutn pretrpeo nekoliko sudara sa veoma malim meteoroidima, što je prouzrokovalo trajno oštećenje pojedinih delova detektora (npr. gubitak EPIC MOS1 CCD 3 i 6 čipova).

EPIC kamere su osetljive i na fotone drugih energija (infracrvene, vidljive i ultraljubičaste) pa je moguća odgovarajuća kontaminacija (videti poglavlje 1.2.2). U tom smislu se koriste konkretni filteri koji blokiraju tu emisiju u zavisnosti od procenjenog stepena uticaja na posmatranja. Dakle, svaka EPIC kamera je opremljena sa filterima koji su nepropusni za optičke, infracrvene i UV fotone. Postoji nekoliko filtera za svaku EPIC kameru, u zavisnosti od stepena uticaja optičkih fotona na rad EPIC kamera. Neophodno je da sam, glavni posmatrač odredi vrstu filtera koji će biti korišćeni za svako posmatranje, odnosno konkretan izvor od interesa. Debeo filter (eng. *thick filter*) se koristi samo ukoliko se procenjuje da će optički fotoni bitno uticati na posmatranja. Može blokirati fotone tačkastog izvora do $m_V = 1 - 4$ (MOS) ili $m_V = -2 - 1$ (PN). Filter srednje debljine (eng. *medium filter*) je manje efikasan od debelog (reda 10^3 puta) i može blokirati svetlost tačkastog izvora do $m_V = 6 - 9$. Najmanju efikasnost (reda 10^5 puta manju od debelog filtera) imaju dva tanka filtera (eng. *thin filter*). Dodatno, radi kalibracije ili zaštite instrumenata, moguće je i blokirati X-zračenje koje dolazi sa neba (eng. *filter wheel closed*, FWC).

Postoji nekoliko mogućnosti ili režima prikupljanja podataka pomoću EPIC kamera. Može se posmatrati celom aktivnom površinom kamere (sa punim FOV), tzv. FF režim (eng. *Full Frame imaging mode*). Dodatno, samo EPIC PN kamera, pored FF ima mogućnost realizacije posmatranja u EFF režimu (eng. *Extended Full Frame*), koji podrazumeva da je trajanje kratkih

⁴Svemirska opservatorija XMM-Njutn je lansirana 10. decembra 1999. godine. Zanimljivo je pomenuti da je svemirska opservatorija Čandra lansirana u julu iste godine.

(elementarnih) ekspozicija (videti poglavlje 1.3.2) pri posmatranju duže nego u standardnom FF režimu. I FF i EFF podrazumevaju da su svi pikseli uključeni u posmatranju, te da je puni FOV iskorišćen. Ako se posmatra samo centralni MOS CCD, onda FF režim podrazumeva polje od 600×600 piksela, a vremenska rezolucija je oko 2.6 s. Za PN CCD-e FF režimu odgovara polje od 376×384 piksela, a vremenska rezolucija je oko 73.4 ms, dok je u EFF režimu oko 199.1 ms. U nastavku će biti od interesa samo FF režim.

Ipak, skrenimo kratko pažnju da je moguće da se koristi samo deo aktivne površine kamere. Bez navođenja svih, različitih režima posmatranja, recimo samo da je moguće postići bolju vremensku rezoluciju smanjivanjem aktivne površine, radi skraćivanja vremena očitavanja. Tako se u npr. TM modu (eng. *Timing mode*), postiže velika vremenska rezolucija na račun gubitka u prostornoj rezoluciji. EPIC PN kamera može imati veoma visoku vremensku rezoluciju, do reda 0.03 ms u TM režimu, gde je aktivna oblast sačinjena od 64×200 piksela. Štaviše, vremenska rezolucija za EPIC PN kameru može ići i do $7 \mu\text{s}$ u tzv. BM režimu (eng. *Burst mode*), gde je aktivna oblast sačinjena od 64×180 piksela.

Za razliku od EPIC PN kamere, u slučaju EPIC MOS kamera, samo je centralni CCD taj na kojeg utiče promena režima prikupljanja podataka, dok ostali ostaju u FF režimu. Inače, očitavanje čipova PN kamere se odvija mnogo brže nego u slučaju MOS kamera.

Uporedimo, na kraju, grubo pojedine, za ovaj rad relevantne instrumente u okviru svemirskih opservatorija XMM-Njutn (EPIC), Čandra (ACIS; eng. *Advanced CCD Imaging Spectrometer*), Suzaku (XIS; eng. *X-ray Imaging Spectrometer*) i ROSAT, koji pokrivaju gotovo identičan opseg energija. Kada je reč o prostornoj rezoluciji, od najbolje ka najlošijoj se nižu Čandra, ROSAT, XMM-Njutn, Suzaku (ubedljivo najgora prostorna rezolucija, preko jednog lučnog minuta). Kada je reč o energijskoj (spektralnoj) rezoluciji, najbolje stoji Suzaku XIS (50 eV na 1 keV), a najlošiji je ROSAT. Najveću efektivnu površinu kolektora ubedljivo ima XMM-Njutn, a najmanju ROSAT.

3.1.2 Podaci i softverski alati

Sa zvanične arhive javno dostupnih posmatranja XMM-Njutn opservatorije⁵ (eng. *XMM-Newton Science Archive*) moguće je preuzeti sve relevantne podatke neophodne za naučnu analizu⁶. To su, pre svega ODF (eng. *observation data files*) podaci, odnosno skup fajlova koji sadrže detaljne informacije o konkretnom posmatranju. To su tzv. sirova posmatranja, zajedno sa brojnim informacijama o stanju letilice, koja se moraju redukovati pre naučne analize. Nazivi ODF fajlova sadrže informaciju o broju revolucija opservatorije zaključno sa konkretnim posmatranjem (eng. *revolution number*), identifikaciju razmatranog posmatranja (eng. *Obs. ID*), tip instrumenta na koje se odnosi fajl (eng. *detector ID*), i dr.

Dodatno, moguće je preuzeti i tzv. PPS (eng. *processing pipeline files*) podatke sa arhive. To su automatski redukovana posmatranja za brz pregled i grubu analizu rezultata (slike, spektri, lista detektovanih tačkastih izvora, i dr).

Neophodno je nekoliko softverskih alata kako bi se sirovi podaci transformisali u naučno prihvatljive. Veliki broj takvog, javno dostupnog softvera je obezbeđen od strane HEASARC-a (eng. *High Energy Astrophysics Science Archive Research Center*, HEASARC). XMM-SAS (eng. *XMM-Science Analysis System*) spada u specijalan softverski alat namenjen redukciji i analizi posmatranja ostvarenih pomoću svemirske opservatorije XMM-Njutn⁷. Velikim delom se oslanja na druge, brojne softverske pakete⁸ sadržane u okviru HEASoft-a⁹ (eng. *High Energy Astrophysics Software*, HEASoft). Za tretiranje posmatranja rasprostrtih izvora (izvora konačnih dimenzija), specijalno je namenjen XMM-ESAS alat čije su komande implementirane unutar XMM-SAS-a (detaljan opis svih komandi i postupka obrade posmatranja je dat u [60]).

Kako bi se valjano obavila redukcija posmatranja, XMM-SAS zahteva pristup odgovarajućim, kalibracionim fajlovima (eng. *Current Calibration Files*, CCF) koji su javno dostupni, a najnovije verzije se mogu preuzeti na zvaničnoj stranici XMM-Njutn opservatorije¹⁰. Zapravo, CCF podaci

⁵Više informacija o XMM-Njutn opservatoriji, softverskim alatima i redukciji posmatranja može se naći na <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton>.

⁶<http://nxsa.esac.esa.int/nxsa-web/#home>

⁷<https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/download-and-install-sas>

⁸Recimo, ranije pomenuti XSPEC je sadržan u HEASoft-u, kao i mnogi drugi alati.

⁹<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/heasoft/>

¹⁰<https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/current-calibration-files>

predstavljaju skup kalibracionih podataka od početka misije, pa je neophodno izabrati konkretan skup informacija za specifično posmatranje. To se postiže upotrebom XMM-SAS komande `cifbuild` koja kreira tzv. CIF fajl (eng. *Calibration Index File*).

Učitavanje relevantnih ODF fajlova se sprovodi pomoću XMM-SAS komande `odfingest`. Zapravo, ovom funkcijom se kreira tzv. SUM fajl (eng. *SAS summary file*) koji predstavlja svojevrsan rezime najvažnijih informacija o konkretnom posmatranju.

Konačno, za prikaz slika i osnovnu manipulaciju najčešće se koristi softverski alat¹¹ `saods9`, mada je nekad od koristi i `fv`, koji je sadržan u okviru HEASoft-a¹².

3.2 Izbor oblasti za analizu

Filamenti pobrojani u tabeli 2 u [69] i tabeli 3 u [43], posmatrani kroz uskopojasni $H\alpha$ filter, nalaze se na severoistočnoj granici (rubu) ostatka supernove Petlja u Labudu (eng. *northeastern rim*, NE). U arhivi javno dostupnih posmatranja XMM-Njutn opservatorije postoje dva posmatranja koja, većim delom pokrivaju tu oblast neba.

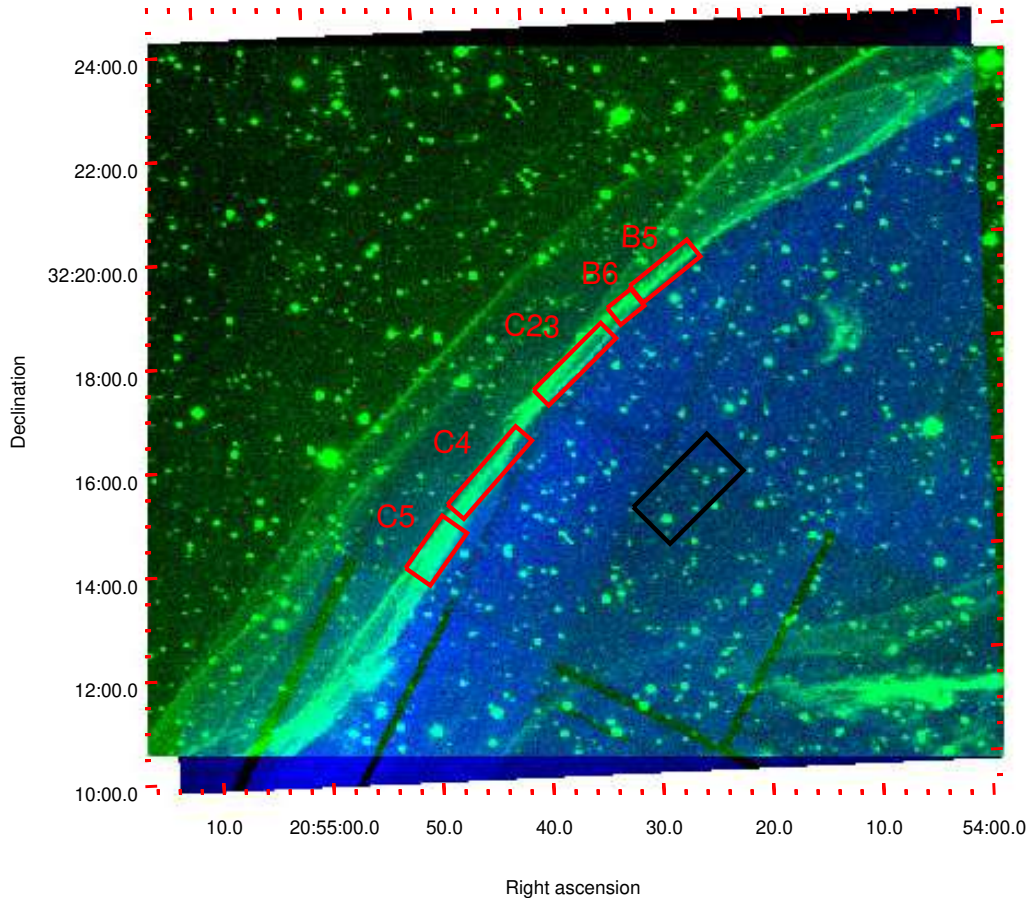
Prvo posmatranje je Obs. ID 0741820101 i sadrži filamente iz grupe A, B, C, D i E. Reč je o posmatranju severoistočne oblasti ostatka u oznaci P7 (PI: *Williams, Brian*), tokom 2649. revolucije letelice, u maju 2014. godine. Posmatranja EPIC instrumentima su obavljena u FF režimu, sa tankim br. 1 (eng. *thin1*) filterom. Prema bazi ADS (eng. *The SAO/NASA Astrophysics Data System*) ovo posmatranje do sada nije korišćeno za analizu spektara oblasti OSN Petlja u Labudu koji odgovaraju filamentima vidljivim kroz uskopojasni $H\alpha$ filter.

Na slici 3.1 predstavljen je kompozitni snimak P7 oblasti ostatka supernove Petlja u Labudu (rezultat ovog rada, videti poglavlje 3.4) ostvaren pomoću sve tri EPIC kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.40 – 5.0 keV (plavo), zajedno sa optičkim posmatranjem istog dela neba kroz uskopojasni $H\alpha$ filter (zeleno). Optička posmatranja su realizovana 1993. godine pomoću Barel Šmit teleskopa Nacionalne opservatorije Kit Pik (eng. *Burrell Schmidt telescope, Kitt Peak National Observatory, Kitt Peak, Arizona, USA*). Glavni posmatrač je bio Robert Fesen (eng. *Robert Fesen*),

¹¹<https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimageds9>

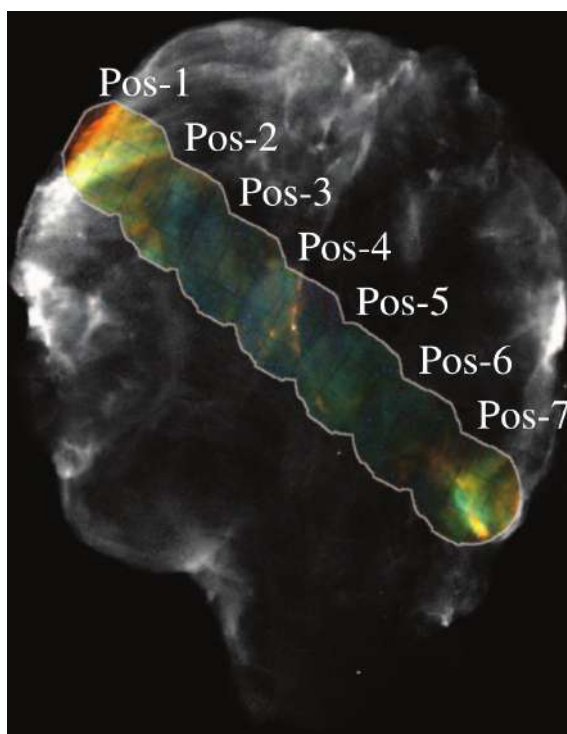
¹²<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/fvtools/fv/>

a zahvalnost za ustupanje konkretnog posmatranja dugujemo Džonu Rejmondu (eng. *John Raymond*). Pravougaonima su označeni pojedini regioni koji se dalje koriste za spektralnu analizu (za detalje videti poglavlje 3.4).

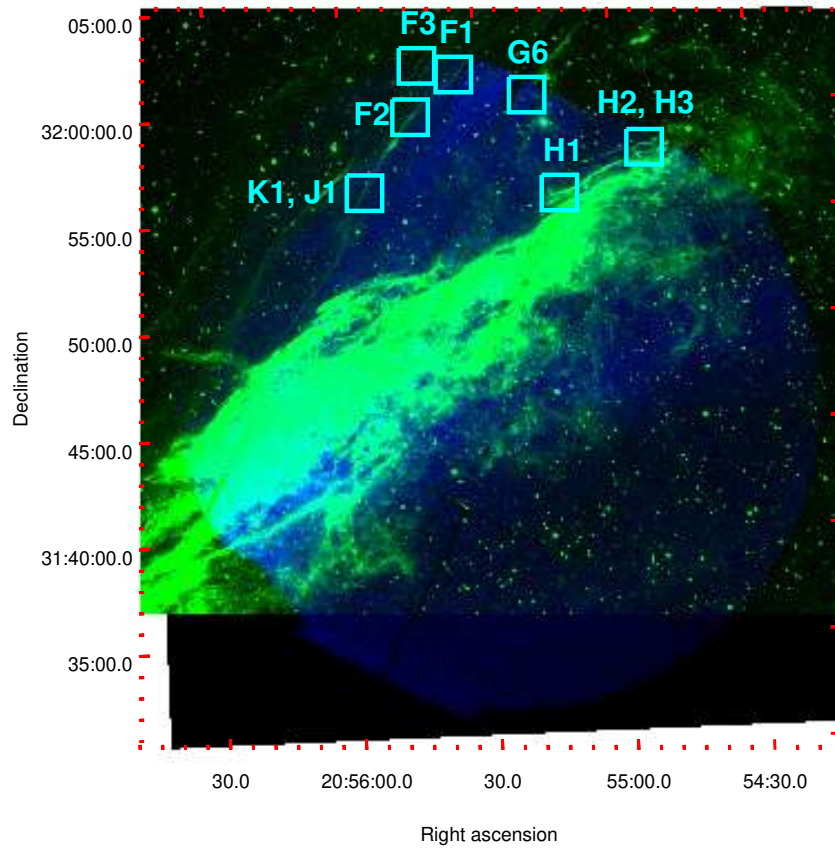


Slika 3.1: Kompozitni snimak P7 oblasti ostatka supernove Petlja u Labudu ostvaren pomoću sve tri EPIC kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.40 – 5.0 keV (plavo), zajedno sa optičkim posmatranjem istog dela neba kroz uskopojasni $H\alpha$ filter (zeleno). Optička posmatranja su realizovana 1993. godine pomoću Barel Šmit teleskopa Nacionalne opservatorije Kit Pik (posmatrač: Robert Fesen). Pravougaonima su označeni pojedini regioni koji se koriste za analizu spektara i leže u blizini centra vidnog polja (pogledati sliku 3.5).

Drugo posmatranje, Obs. ID 0082540101 (pogledati slike 3.2 i 3.3), sadrži filamente iz grupe F, G, H, K i J. Reč je o posmatranju severoistočne oblasti ostatka u oznaci Pos-1 (PI: *Miyata, Emi*) tokom 543. revolucije letelice, u novembru 2002. godine. Posmatranja EPIC instrumentima su obavljena u FF režimu, sa filterom srednje debljine. Na žalost, svi filamenti su, u ovom slučaju smešteni daleko od centra vidnog polja pa je analiza spektara znatno otežana (pogledati sliku 3.3, originalni rezultat ovog rada), te ovo posmatranje nije dalje korišćeno za detaljnu spektralnu analizu. Dodatna otežavajuća okolnost leži u tome što ostatak supernove zauzima celi FOV, pa je tretiranje pozadine znatno zahtevnije.



Slika 3.2: Ostatak supernove Petlja u Labudu posmatran HRI instrumentom opservatorije ROSAT (crno-belo; 0.1–2.5 keV). Dodatno su, u boji (crveno: 0.30–0.52 keV, zeleno: 0.52–1.07 keV, plavo: 1.07–3.00 keV) označene, neke oblasti koje su posmatrane XMM-Njutnom, uključujući Pos-1 (najsevernija oblast). Prikazan je zajednički EPIC (MOS 1/2 i PN) snimak (prema [63]).



Slika 3.3: Kompozitni snimak Pos-1 oblasti ostatka supernove Petlja u Labudu ostvaren pomoću sve tri EPIC kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.40 – 5.0 keV (plavo), zajedno sa optičkim posmatranjem istog dela neba kroz uskopojasni $H\alpha$ filter (zeleno). Optička posmatranja su realizovana 1993. godine pomoću Barel Šmit teleskopa Nacionalne opservatorije Kit Pik (posmatrač: Robert Fesen). Pravougaonicima su označeni filamenti razmatrani u [43, 69].

U tabeli 1 nalaze se svi regioni koji su korišćeni u radu. Date su koordinate centra, dužina i širina pravougaonika kao i ugao rotacije pravougaonika u odnosu na ose ekvatorskog sistema.

Tabela 1: Koordinate posmatranih regiona, dimenzije pravougaonika koji je pridružen regionu i ugao zakrivljenosti pravougaonika. Regioni B5c, B6c, C23c, C4c, C5c, K1 i J1c i H1 predstavljaju regione pridružene samom ostatku. Regioni B5b, B6b, C23b, C4b, C5b, K1 i J1b odgovaraju delovima OSN od 25'' iza samog filamenta. Regioni B5z, B6z, C23z, C4z, C5z, K1 i J1z započinju nakon 25'' iza filamenta i protežu se 75''. Crni region predstavlja oblast koja nije pridružena H α i služi za poređenje spektra.

Region	[h:m:s]	δ [°:':"])	širina i dužina["]	ugao rotacije[°]
B5c	20:54:27.7860	+32:19:29.100	85 x 25	39
B5b	20:54:26.5380	+32:19:09.660	85 x 25	39
B5z	20:54:24.0500	+32:18:30.710	85 x 75	39
B6c	20:54:31.5150	+32:18:49.870	35 x 25	39
B6b	20:54:30.2680	+32:18:30.440	35 x 25	39
B6z	20:54:27.7940	+32:17:51.500	35 x 75	39
C23c	20:54:36.3910	+32:17:46.330	110 x 25	45
C23b	20:54:34.9980	+32:17:28.450	110 x 25	45
C23z	20:54:32.1990	+32:16:52.960	110 x 75	45
C4c	20:54:44.5710	+32:15:45.480	120 x 25	49
C4b	20:54:43.0690	+32:15:29.230	120 x 25	49
C4z	20:54:40/1010	+32:14:56.340	120 x 75	49
C5c	20:54:49.7490	+32:14:19.0800	74 x 35	55
C5b	20:54:47.8150	+32:14:0.820	74 x 25	55
C5z	20:54:44.5890	+32:13:32.13	74 x 75	55
K1 i J1 c	20:55:55.5120	+31:56:20.580	120 x 30	60
K1 i J1 b	20:55:53.6364	+31:56:06.904	120 x 25	60
K1 i J1 z	20:55:50.2173	+31:55:42.090	120 x 75	60
H1	20:55:12.2700	+31:55:49.670	115 x 50	35
Crni	20:54:26.5540	+32:15:16.530	120 x 60	45

3.3 Obrada posmatranja

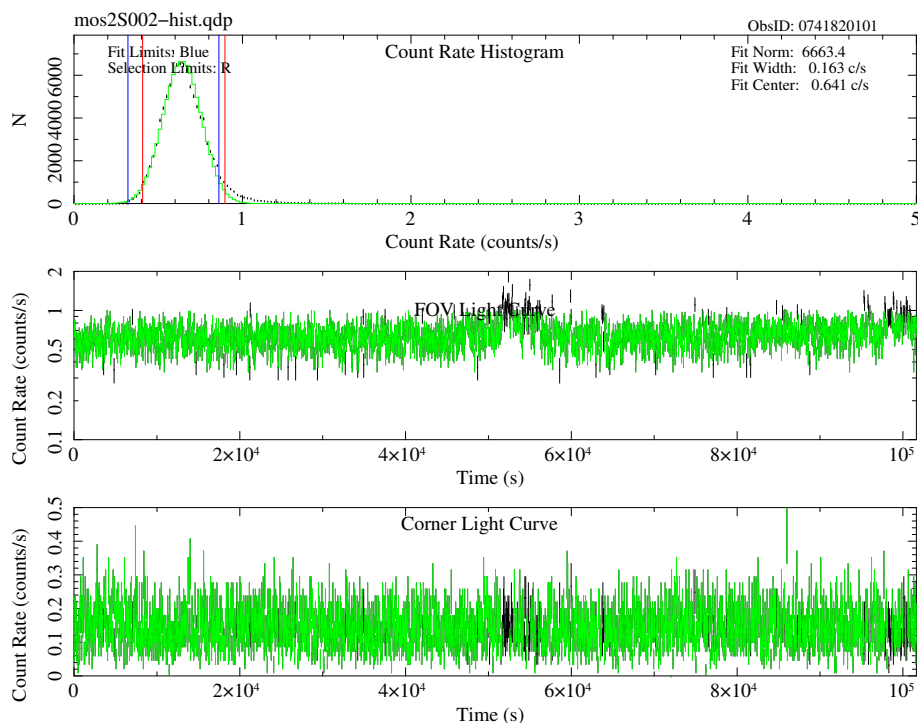
3.3.1 Posmatranje P7 oblasti

Osnovna redukcija posmatranja ostvarenih EPIC MOS i PN kamerama može se poluautomatski realizovati odgovarajućim pozivima XMM-(E)SAS komandi `emchain` i `epchain`, respektivno. Od pojedinačnih ODF fajlova sa informacijama o prikupljenim podacima za svaki čip svake kamere, prave se celovite liste detekcija za svaku EPIC kameru. Zatim je neophodno izvršiti i filtriranje posmatranja, ukloniti sve podatke koji odgovaraju npr. tzv. lošim pikselima, a i vremenskim trenucima intenzivnog dejstva okolnih protona niskih energija (videti poglavlje 1.4.2) na EPIC kamere (eng. *soft proton filtering*). U tom smislu se mogu koristiti komande `mos-filter` i `pn-filter`.

Na slici 3.4 je, najpre prikazan primer histograma stope odbroja za celi FOV MOS2 kamere (gore), te vremenska serija stope odbroja tokom celog posmatranja (kriva sjaja) za MOS2 FOV (sredina), kao i za podatke sa ivica (ćoškova, pravougaonog) MOS2 detektora, koje ne spadaju u (kružni) FOV teleskopa (dole). Ćoškovi detektora (rubovi spoljašnjih CCD čipova) nisu izloženi X-fotonima sa izvora, niti protonima niskih energija koji uspevaju biti reflektovani u FOV. Krive sjaja su određene za interval energija između 2.5 – 8.5 keV, kako se ispostavlja, radi boljeg uočavanja problema. Za prosečno posmatranje je pomenuti histogram moguće verno opisati teorijskom, normalnom raspodelom sa maksimumom koji odgovara nekoj prosečnoj stopi odbroja za vremenske intervale koji nisu pod uticajem protona (zelena puna linija na gornjem grafiku). Crvene vertikalne linije označavaju donje i gornje granice stope odbroja koje se koriste za izbor dobrih vremenskih trenutaka. Dobri vremenski intervali na krivama sjaja su označeni zelenom bojom, a crnom trenuci pojačanog dejstva protona niskih energija (velike stope odbroja u odnosu na srednju vrednost), koji se izbacuju iz dalje analize. Da su trenuci pojačane stope odbroja izazvani protonima niskih, a ne česticama visokih energija može se potvrditi analizom krive sjaja podataka iz ćoškova kamera. Naime, čestice visokih energija bi, usled veće prodornosti, izazvale i pojačanje stope odbroja u oblasti ćoškova, što protoni niskih energija nisu u stanju.

Komande `mos-filter` i `pn-filter` kreiraju tzv. GTI datoteke koje sadrže dobre vremenske trenutke, uz pomoć kojih se, konačno prave očišćena (filtrirana) posmatranja (eng. *cleaned event files*). Naravno, važno je voditi računa da se ovom procedurom ipak može desiti da se u dobre intervale uvrsti i neki

neželjeni trenutak.



Slika 3.4: Histogram stope odbroja za FOV MOS2 kamere (gore), vremenska serija stope odbroja tokom celog posmatranja za MOS2 FOV (sredina), kao i za podatke iz ćoškov (pravougaonog) MOS2 detektora, koje ne spadaju u (cirkularni) FOV teleskopa (dole). Krive sjaja su određene za interval energija između 2.5 – 8.5 keV.

Kao dodatnu proveru da li su podaci uspešno filtrirani, moguće je koristiti javno dostupan program¹³ `Fin_over_Fout`, detaljnije opisan u [14]. U kratkim crtama, porede se stope odbroja u oblasti unutar i van FOV. Ako je odnos stopa odbroja unutar i van FOV-a veći, kontaminacija je najverovatnije izraženija. Skrenimo pažnju da se pokazalo da ova metoda nije valjana za izvore konačnih dimenzija koji pokrivaju ceo FOV. Pošto to ovde nije slučaj, rezultati programa se mogu uzeti u razmatranje. Ispostavlja se da za EPIC MOS2 kameru nema indicija da postoji rezidualna kontaminacija protonima niskih energija, dok je za MOS1 i PN moguće neznatno malo pri-

¹³<https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/epic-scripts>.

sustvo. Kako će za spektralnu analizu, u nastavku biti korišćena samo EPIC MOS2 kamera, detaljnije filtriranje posmatranja nije rađeno¹⁴.

Nakon filtriranja, vremena ekspozicija (eng. *livetimes*) iznose 90.75 ks, 93.50 ks, 70.77 ks, za MOS1, MOS2 i PN, respektivno. Poređenja radi, predloženo trajanje posmatranja iznosi 103 ks, a ukupno realizovano trajanje je 101.657 ks, 101.627 ks, 100.076 ks, za MOS1, MOS2 i PN, respektivno.

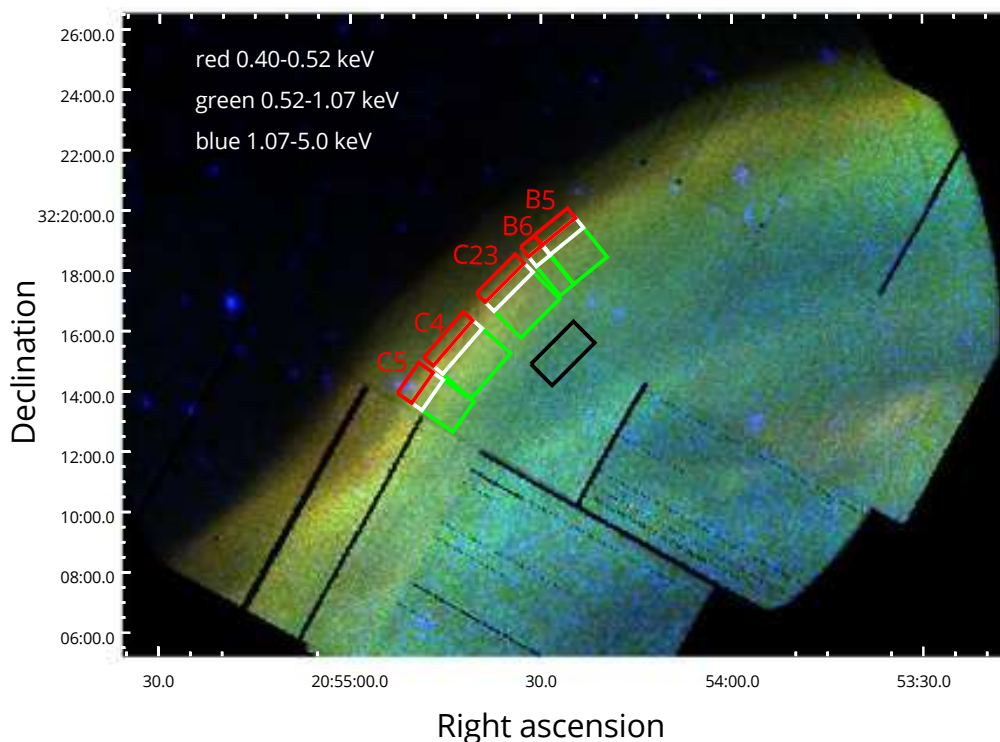
Izuzimajući CCD3 i CCD6 komponente MOS1 kamere koje su, nakon pretrpljenog oštećenja van funkcije u ovom posmatranju, važno je istaći i da drugi CCD čipovi MOS kamera mogu nekada biti u tzv. anomalnom režimu rada, pa ih je, u tom slučaju neophodno isključiti iz analize. Ponekada je to moguće uočiti i samom vizuelnom inspekcijom. Naime, tada je pojedinim čipovima pridružen neopravdano veći odbroj (pojačan uticaj pozadine) na nižim energijama, što se najbolje uočava na slikama u intervalu energija manjem od 1 keV. Naravno, nije uvek moguće uočiti ovaj problem vizuelnom inspekcijom, posebno pri kraćim ekspozicijama. Neka je odnos odbroja na višim (konkretno, u intervalu 2.5 – 5.0 keV) i nižim (konkretno, u intervalu 0.4 – 0.8 keV) energijama predstavljen tzv. HR odnosom¹⁵ (eng. *hardness ratio*). Ako je moguće izračunati taj, HR odnos za podatke iz ćoškova detektora, van FOV-a onda se dodatno može zaključiti o svojstvu pojedinačnih čipova (vrednosti ispod 1 ukazuju na anomalno stanje). U tom smislu, nakon analize su uklonjeni CCD 2, (3), 4, (6) i 7 iz MOS1 (3 i 6 su već, sami po sebi van funkcije), kao i CCD 5 iz MOS2. Dodatno, Q4 kvadrant iz PN kamere je takođe uklonjen. Naime, ispostavilo se da je kvadrantu Q4 pridružena skoro duplo manja ekspozicija nego ostalim PN kvadrantima, što verovatno nije posledica realnog kvara, nego nemogućnosti obrade pojačanog pozadinskog signala tokom procesuiranja podataka na samoj letelici. U tom smislu je ipak, u principu moguće zadržati ovaj kvadrant ali je važno izbegavati spek-

¹⁴Detaljnije filtriranje bi zahtevalo modelovanje spektra celog FOV kako bi se odredila globalna SPC komponenta emisije, a zatim, na adekvatan način oduzela. To se za slučaj kreiranja slika, nakon fitovanja spektra celog FOV-a, može postići pomoću komande **proton**. Ako je od interesa samo spektralna analiza, onda se to postiže samo direktnim dodavanjem modela ove komponente pozadine prilikom fitovanja spektra. U svakom slučaju, bilo da je od interesa samo napraviti sliku ili pak samo analizirati spektar nekog regiona, najdetaljnija analiza podrazumeva modelovanje spektra ove komponente pozadine.

¹⁵Naglasimo da se HR u savremenoj literaturi različito definiše [48]. Nekada je to samo odnos S/H , a nekada $HR = (H + S)/(H - S)$, gde se H i S odnose na odbroj u različitim intervalima energija (višim i nižim; važno je samo da se ne preklapaju). Može se reći da HR igra ulogu indeksa boje (kolor indeksa).

tralnu analizu oblasti koje pokrivaju nekoliko PN kvadranta.

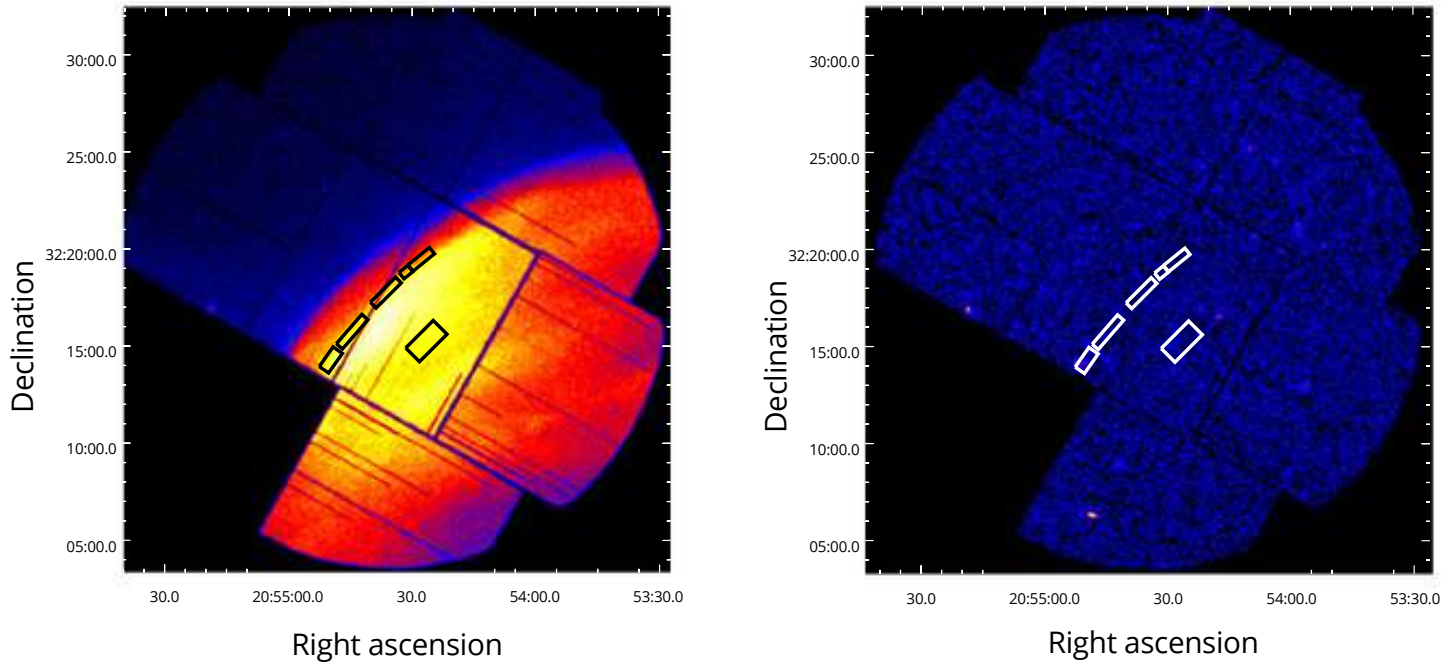
Komande `mos-spectra` i `pn-spectra`, uz `mos_back` i `pn_back`, poluautomatski mogu kreirati i slike i spektre. Ove funkcije tretiraju i instrumentalnu QPB pozadinu, usled dejstva čestica visokih energija (videti poglavlje 1.4.2). Procedura kalibracije je detaljno opisana u [31] i [60]. Pojednostavljeno rečeno, informacija o QPB sadržaju se dobija, kako analizom čoškova detektora (van FOV-a) za konkretno posmatranje, tako i razmatranjem FOV-a i čoškova prijemnika za odgovarajuće FWC podatke. Kalibracioni, FWC snimci se prave kada je onemogućen pristup detektoru svim spoljašnjim (vansionskim) fotonima ili protonima niskih energija (videti poglavlje 3.1). Ipak, čestice visokih energija mogu proći do prijemnika, pa je tada moguće dati veran opis prostorne raspodele QPB komponente pozadine.



Slika 3.5: Kompozitni snimak P7 oblasti ostatka supernove Petlja u Labudu koji je ostvaren pomoću sve tri EPIC kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.40 – 0.52 keV (crveno), 0.52 – 1.07 keV (zeleno), 1.07 – 5.0 keV (plavo). Pravougaonima su označeni regioni koji se koriste za analizu spektara.

Na slici 3.5 je predstavljen kompozitni, izravnati snimak P7 oblasti ostatka supernove Petlja u Labudu ostvaren pomoću sve tri EPIC kamere XMM-Njutn opservatorije, a kreiran pomoću XMM-(E)SAS komandi. Slično kao u radovima [47, 63], na slici je crvenom bojom predstavljen odbroj od fotona energija između $0.40 - 0.52$ keV, zelenom iz intervala $0.52 - 1.07$ keV, a plavom unutar opsega $1.07 - 5.0$ keV. Pravougaonicima su označeni regioni koji se dalje koriste za analizu spektara (za detalje videti poglavlje 3.4).

Na slici 3.6 je prikazana P7 oblast ostatka Petlja u Labudu posmatrana pomoću EPIC MOS2 kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između $0.4 - 1.0$ keV (levo) i $3.0 - 8.0$ keV (desno). Jasno se uočava da je ova oblast OSN izražena na nižim energijama, prvenstveno ispod 3 keV. Pravougaonicima su označeni pojedini regioni koji se koriste za analizu spektara. CCD5 je isključen iz dalje analize jer je, u konkretnom posmatranju u anomalnom režimu. Uopšte, u ovom radu je izabrana restriktivnija redukcija posmatranja, kako nivo odbroja to dopušta.



Slika 3.6: P7 oblast ostatka Petlja u Labudu posmatrana pomoću EPIC MOS2 kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.4 – 1.0 keV (levo) i 3.0 – 8.0 keV (desno). Pravougaonicima su označeni pojedini regioni koji se koriste za analizu spektara. CCD5 je isključen iz dalje analize jer je, u konkretnom posmatranju u anomalnom režimu.

3.3.2 Posmatranje Pos-1 oblasti

Na potpuno analogan način, kao što je opisano u prethodnom poglavlju, redukovano je i posmatranje Pos-1 oblasti. Rezultati su u skladu sa obradom istovetnog posmatranja koja je predstavljena u radovima [47] i [63]. Ipak, osnovna razlika je u tome što je u ovom radu izabrana restriktivnija redukcija posmatranja, kako nivo odbroja to dopušta.

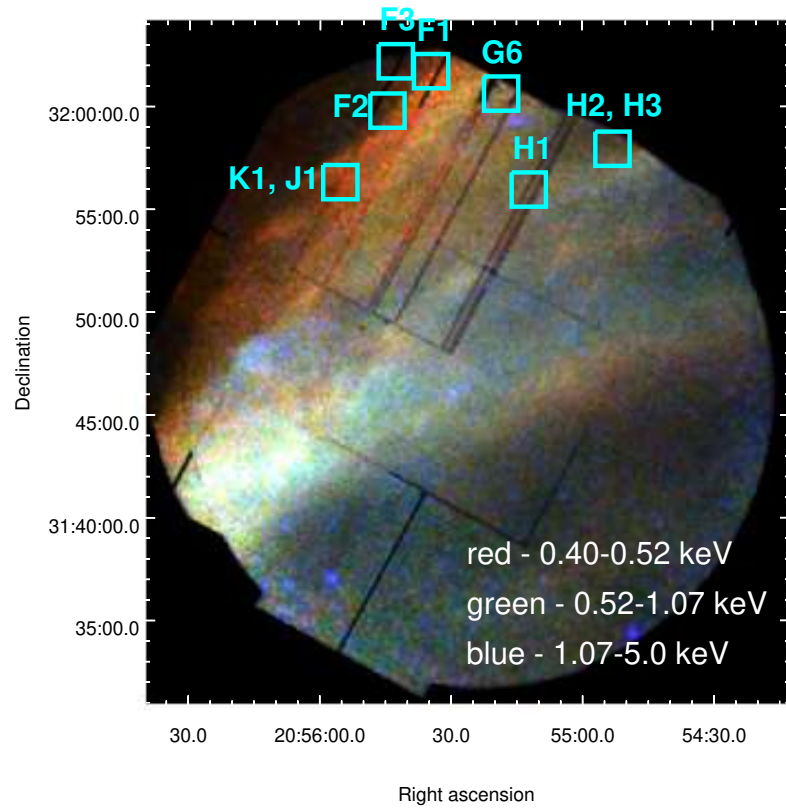
Nakon, ranije opisanog, filtriranja posmatranja, vremena ekspozicija iznose 14.09 ks, 13.74 ks, 8.48 ks, za EPIC MOS1, MOS2 i PN, respektivno. Poređenja radi, predloženo trajanje posmatranja iznosi 13.817 ks, a ukupno realizovano trajanje je 14.674 ks, 14.674 ks, 13.120 ks, za EPIC MOS1, MOS2 i PN, respektivno.

Detaljnijom analizom, uklonjeni su CCD (6) iz MOS1 (6 je već, sam po sebi van funkcije), kao i CCD 3 iz MOS2. Dodatno, Q2 iz PN kamere je takođe uklonjen zbog neuobičajeno velikog odbroja u odnosu na druge kvadrante. Ipak, ispostavlja se da je to previše restriktivna mera, pa bi adekvatno tretiranje pozadine moglo da opravda da se taj kvadrant zadrži.

Na slici 3.7 je predstavljen kompozitni, izravnati snimak Pos-1 oblasti ostatka supernove Petlja u Labudu ostvaren pomoću sve tri EPIC kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.40 – 0.52 keV (crvena boja), 0.52 – 1.07 keV (zelena boja), 1.07 – 5.0 keV (plava boja). Pravougaonicima su označeni filamenti vidljivi kroz uskopojasni $H\alpha$ filter (pogledati sliku 3.3) detaljno razmatrani u [43, 69].

Kao što je već napomenuto, svi pomenuti filamenti su, u ovom slučaju smešteni daleko od centra vidnog polja, pa je analiza spektara znatno otežana, pa ovo posmatranje nije dalje korišćeno za detaljniju spektralnu analizu (ipak, videti poglavlje 3.5). Dodatna otežavajuća okolnost je u tome što ostatak supernove zauzima celi FOV, pa je tretiranje pozadine značajno otežano.

U radu [47] je detaljno analizirana Pos-1 oblast. Konkretno, analizirani su spektri različitih regiona unutar FOV-a. Ipak, nisu predstavljeni rezultati konkretnih delova FOV-a koji odgovaraju $H\alpha$ filamentima iz [43] i [69]. Očigledno je da FOV razmatranog posmatranja ne spada u tzv. oblast povećanih zastupljenosti (videti glavu 2), za razliku od FOV-a posmatranja P7 oblasti, te X-linije usled transfera naelektrisanja nisu uočene. Dodatno, u radu [66] je zaključeno da SWCX komponenta pozadine (videti poglavlje 1.4.2) nije od značaja za posmatranje Pos-1 regije. Diskusija o spektrima će biti predstavljena u poglavlju 3.5.



Slika 3.7: Kompozitni snimak Pos-1 oblasti ostatka supernove Petlja u Labudu ostvaren pomoću sve tri EPIC kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.40 – 0.52 keV (crveno), 0.52 – 1.07 keV (zeleno), 1.07 – 5.0 keV (plavo).

3.4 Analiza spektara izabranih regiona iz P7 oblasti

3.4.1 Izbor regiona

Ostataka supernove Petlja u Labudu je prividno veoma sjajan u X-području između 0.4 – 3.0 keV. U tom smislu je bilo moguće sprovesti veoma restriktivnu redukciju posmatranja, kako za gensanje slika (eng. *background-subtracted, exposure-corrected images*), opisanu u poglavlju 3.3, tako i za spektralnu analizu¹⁶.

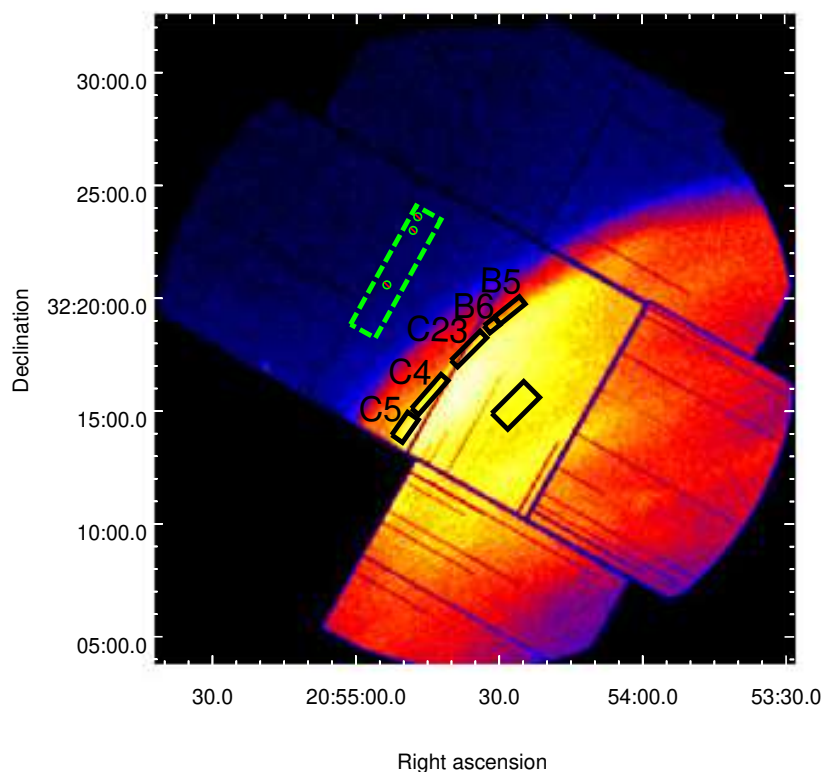
Na slici 3.5 su različitim pravougaonicima označeni regioni koji se koriste za analizu spektara u ovom radu. Naime, crveni pravougaonici (c) su upravo oblasti pridružene samim filamentima, dok beli regioni (b) odgovaraju delovima OSN u rasponu od 25'' iza samih filamenata. Svaki zeleni region (z), paralelan filamentima, započinje nakon 25'' iza svakog filameta i proteže se 75''. Konačno, crni pravougaonik predstavlja oblast koja nije pridružena H α filamentima i služi za poređenje spektara, i dalju diskusiju.

Prilikom odabira filamenata za analizu, uzeti su u obzir slični kriterijumi kao oni definisani u radu [56]. Dakle, vođeno je računa da filamenti budu takve morfologije u H α oblasti, da nije prisutno izraženo grananje. Takođe, zbog ograničene prostorne rezolucije savremenih X-teleskopa u odnosu na optičke, uzeti su u obzir samo oni filamenti iza kojih nema drugih filamenata na rastojanju od 100''. Razlog za to je želja da se detaljnije diskutuje o fizičkim karakteristikama plazme u oblasti nakon prolaska udarnog fronta (slično kao u radovima [50], [56] i [58]).

U nastavku je odlučeno da se analizira spektar dobijen samo pomoću MOS2 kamere i to sa centralnog CCD čipa, pre svega zbog prednosti koju nosi analiza oblasti u blizini centra FOV-a. Ispostavilo se da gore pomenute kriterijume selekcije uglavnom i ispunjavaju samo filamenti koji su detektovani centralnim CCD-om MOS2 kamere. Kako bi se analiza maksimalno pojednostavila, spektri MOS1 kamere nisu razmatrani, mada bi istovremeno modelovanje spektara obe MOS kamere svakako dalo preciznije rezultate (videti poglavlje 3.5). Ipak, nije očekivano da bi tada rezultati bili drastično drugačiji. Kako definisani regioni zahvataju više kvadranta, zbog ranije ukazanog problema sa kvadrantom Q4, ni spektri PN kamere nisu razma-

¹⁶Za spektralnu analizu su pored loših piksela isključeni i događaji iz njihove neposredne blizine. Drugim rečima, korišćena je restriktivna opcija `FLAG==0`.

trani. Spektralna rezolucija PN kamere je malo lošija od MOS kamere (oko 67 eV za PN, a oko 57 eV za MOS na 1 keV), a i prostorna rezolucija MOS instrumentarijuma je, mada svega za oko 1", ipak malo bolja nego za PN.



Slika 3.8: P7 oblast posmatrana pomoću EPIC MOS2 kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.4 – 1.0 keV. Zelenom isprekidanom linijom je označen region koji se koristi za analizu pozadine. Precrtani kružići unutar tog regiona predstavljaju tačkaste izvore koji su isključeni iz dalje spektralne analize.

Na slici 3.8 je predstavljena P7 oblast ostatka posmatrana pomoću EPIC MOS2 kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.4 – 1.0 keV. Zelenom isprekidanom linijom je označen region koji se koristi za spektralnu analizu pozadine, van dela FOV-a koju zauzima ostatak supernove. Precrtani kružići unutar tog regiona predstavljaju tačkaste izvore koji su isključeni iz dalje spektralne analize. Naprosto, region koji se koristi za analizu pozadine ne sme sadržati zračenje koje potiče od razmatranog, niti od bilo kog drugog, razlučenog izvora.

Pronalaženje tačkastih izvora (eng. *source detection*) X-zračenja se može izvršiti uz pomoć XMM-ESAS komande `cheese` [60], zasnovane na XMM-SAS komandi `emldetect`. Naime, sprovodi se simultano fitovanje prostorne raspodele odbroja za sve EPIC kamere, u različitim intervalima energija, PSF-om teleskopa. Reč je o fitovanju koje počiva na metodi maksimalne verodostojnosti (eng. *simultaneous maximum likelihood PSF fits to the source count distribution*). Inače, opšta je preporuka tima, koji se bavi proučavanjem pozadine u slučaju XMM-Njutn opservatorije, da se region za procenu pozadine definiše u okviru istog CCD čipa, ako je to ikako moguće¹⁷. U tom smislu je ovde, kako je srećom to bilo moguće, definisan region za analizu pozadine u okviru centralnog CCD čipa MOS2 kamere, kao i ostali regioni za spektralnu analizu.

Spektar izabranih regiona je izdvojen iz očišćene (filtrirane) liste detekcija pomoću komande `evselect`. Površina različitih regiona je određena uz pomoć komande `backscale`, kako je ta informacija važna prilikom kasnije procedure oduzimanja pozadine. Odgovarajući RMF i ARF su, za spektralnu analizu generisani uz pomoć komandi `rmfgen` i `arfgen`, respektivno.

Kako je odbroj dovoljno veliki, a OSN ne zauzima celi FOV, moguće je oduzeti spektar pozadine od spektra zračenja iz pravca ka izvoru. Ipak, detaljnija analiza dopušta samo oduzimanje instrumentalne QPB i direktno modelovanje drugih tipova pozadine. U tom smislu, za procenu i oduzimanje instrumentalne QPB pozadine su korišćeni kalibracioni FWC podaci, kreirani za konkretno posmatranje uz pomoć komande `evqpb`¹⁸.

Konačno, komandom `grppha`, iz HEASoft-ovog paketa FTOOLS, je izvršeno povezivanje odgovarajućih fajlova (spektar izvora za pozadinom, spektar pozadine, RMF, ARF) za svaki pojedinačni region, kako bi se mogli učitati u XSPEC radi dalje spektralne analize. Dodatno, pomenuta komanda uključuje mogućnost grupisanja spektralnih podataka. Za valjanu spektralnu analizu S^2 -statistikom, poželjno je da se spektar regrupiše tako da postoji bar 25 odbroja po svakom spektralnom kanalu (za detalje videti poglavlje 1.4.1). U slučaju C -statistike u XSPEC-u, praksa je pokazala da je potrebno da se spektar regrupiše tako da postoji bar 1 odbroj po svakom spektralnom kanalu, mada je u poslednje vreme pokazano da je poželjnije da taj broj bude 5 (za detaljnu diskusiju pogledati [7]).

¹⁷Prema <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/background>.

¹⁸Prema <https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/sas-thread-background>.

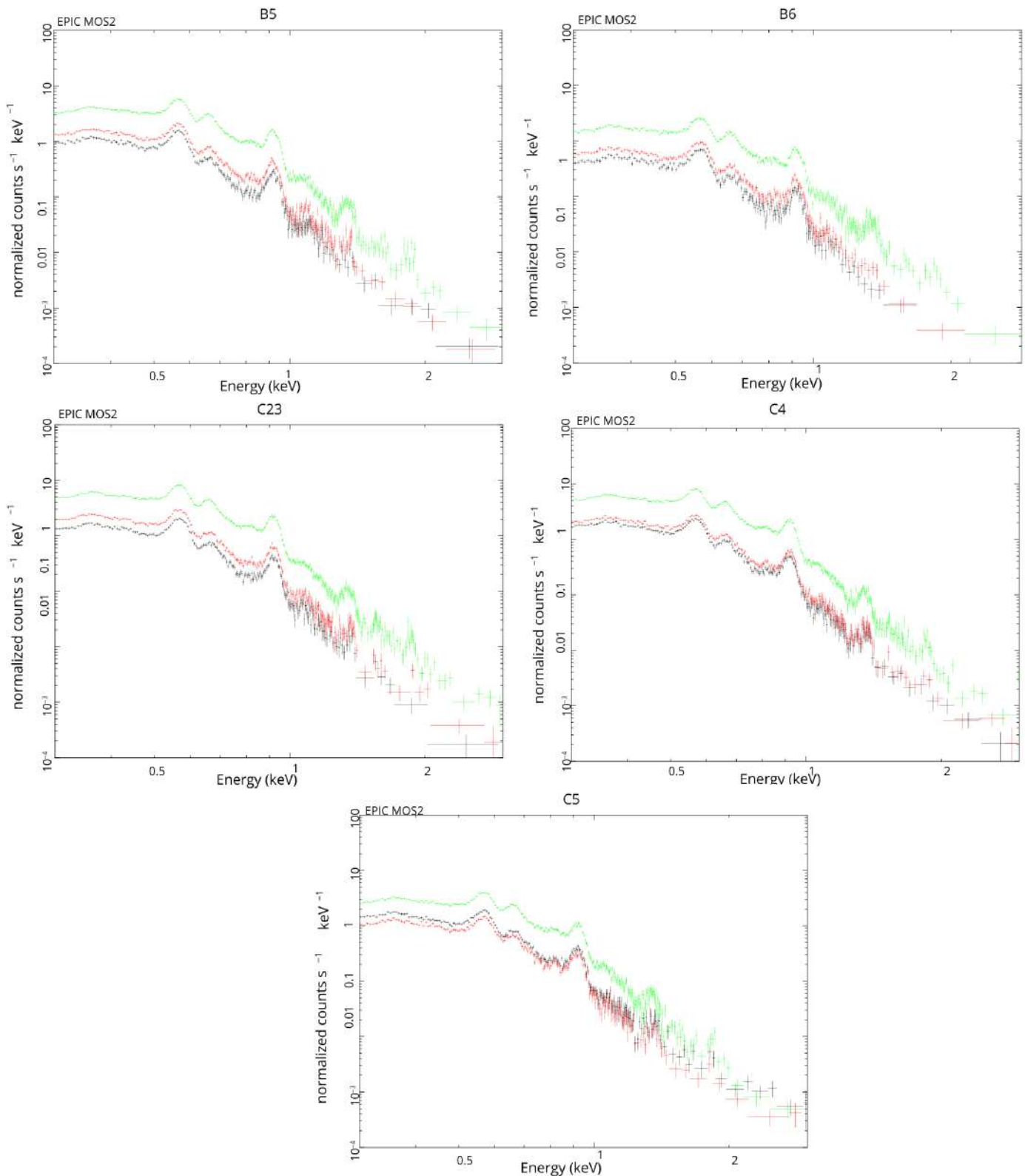
3.4.2 Rezultati i diskusija

Na slici 3.9 su predstavljeni spektri razmatranih regiona B5, B6, C23, C4 i C5 (pogledati sliku 3.5, tabelu 2 u [69] i tabelu 3 u [43]). Zapravo, na svakom od pojedinačnih grafika prikazani su spektri, ranije definisane (videti poglavlje 3.4.1), tzv. crvene, bele i zelene oblasti, za svaki odabrani filament posebno. Na slici je crnom bojom označen spektar oblasti c, crvenom oblasti b, a zelenom oblasti z. Jasno se uočavaju linije O VII na oko 0.57 keV, O VIII na oko 0.66 keV, Ne IX na oko 0.91 keV, Mg XI na oko 1.34 keV i druge.

Analiza svih spektara u ovom radu je izvršena na sledeći način. Prvo je razmatran rezultujući spektar pojedinačnih regiona nastao oduzimanjem spektra izabrane pozadine (pogledati sliku 3.8). Spektri su, u tom slučaju grupisani tako da postoji bar 25 odbroja po svakom spektralnom kanalu, kako bi mogla da se koristi S^2 -statistika, a da se, pri tome ipak sačuva što više finih detalja u samom spektru, koliko energijska rezolucija dopušta (videti poglavlje 1.4.1).

Nakon toga su opet analizirani spektri navedenih regiona, pri čemu je, umesto oduzimanja, pozadina opisivana odgovarajućim teorijskim modelom X-zračenja (videti 1.4.2). Spektri su sada grupisani tako da postoji bar 5 odbroja po svakom spektralnom kanalu, kako bi mogla da se koristi C -statistika (videti [7]).

U tom, drugom slučaju, nakon oduzimanja QPB pozadine, čiji je postupak opisan u 3.4.1, uz pomoć FWC kalibracionih podataka, ostatak pozadine je modelovan na sledeći način, po detaljnoj preporuci XMM-ESAS tima [60]. Vangalaktička pozadina je opisana stepenim zakonom `powerlaw` sa fiksiranim spektralnim indeksom od 1.46, koji je pomnožen sa odgovarajućim modelom apsorpcije X-zračenja u međuzvezdanoj materiji `tbabs`. Emisija lokalnog vrelog mehura opisana je modelom zračenja CIE plazme `apec`, sa fiksiranom temperaturom od 0.1 keV i zastupljenostima. Ova komponenta nije primetno apsorbovana međuzvezdanom materijom duž vizure, tako da nije množena sa `tbabs` modelom. Dodatno, zračenje, pre svega toplije komponente Galaktičkog haloa je apsorbovano neutralnim gasom iz diska Galaksije, te je opisano još jednim CIE modelom `apec` (gde je dozvoljeno da se menja kT tokom fitovanja, u granicama fizički smislenih vrednosti, a zastupljenosti su fiksirane), pomnoženim sa `tbabs` modelom.



Slika 3.9: Spektri razmatranih regiona B5, B6, C23, C4 i C5. Na svakom od pojedinačnih grafika prikazani su spektri tzv. crvene, bele i zelene oblasti, za svaki filament posebno (crno: c, crveno: b, zeleno: z).

U oba slučaja je, za zračenja ostatka Petlja u Labudu, slično kao i u ranijim radovima [13, 28], podrazumevan `vpshock` model emisije pomnožen sa modelom apsorpcije `tbabs`. Zapravo, radi poređenja rezultata sa drugim radovima, omogućeno je da se mogu varirati vrednosti zastupljenosti za C, N, O, Ne, Mg, Si (= S), Fe (= Ni), kao kod [13, 28]. U svim modelima je, slično kao u [13], izabrana, fiksirana vrednost za linijsku gustinu vodoničnog sadržaja od $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ [30]. Ta vrednost je mnogo manja od ukupne (Galaktičke) linijske gustine¹⁹ u pravcu ove oblasti koja iznosi $1.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ [28]. Dodatno, u slučaju modelovanja spektara izabranih regiona i same pozadine, u konkretnom `tbabs` modelu emisije pozadine fiksirana je vrednost za ukupnu linijsku gustinu. Inače, početne, referentne vrednosti zastupljenosti elemenata u međuzvezdanoj materiji su u svim slučajevima preuzete iz [71].

Uticao protona niskih energija je zanemaren prilikom modelovanja pozadine, kako je pri konkretnom posmatranju MOS2 kamerom uticaj minimalan i većinski je uklonjen nakon filtriranja. Konačno, usled velikog površinskog sjaja ostatka supernove Petlja u Labudu, te zadovoljavajućeg odbroja, SWCX emisija ne bi trebalo da igra presudnu ulogu u formiranju posmatranog spektra. U tom smislu je na ovom mestu zanemarujemo. Ipak, važno je istaći, zbog dalje analize, da je u praksi veoma teško napraviti jasnu razliku između astrofizičke emisije usled razmene naelektrisanja i SWCX komponente pozadine, te da je uopšte neophodna detaljnija provera. To se pre svega odnosi na detaljnu proveru X-zračenja pozadine, koja u konkretnom posmatranju ipak ne ukazuje na značajno prisustvo SWCX linija.

Isključivo radi ilustrativnijeg prikaza rezultata, na graficima je spektar regrupisan pomoću XSPEC komande `setplot rebin 3 30`, koja ne menja grupe prilikom fitovanja, već samo služi za bolju vizuelnu predstavu²⁰. To je posebno bitno važno kada se koristi *C*-statistika, kako bi spektri bili vizuelno jasniji.

Ipak, u oba razmatrana slučaja, ispostavlja se da prosti model zračenja ostatka supernove `tbabs-vpshock`, sam nije u stanju da skroz verno opiše emisiju, posebno u oblasti oko $0.7 - 1.0 \text{ keV}$, za sve regione, što je, zapravo i u skladu sa rezultatima predstavljenim u [13, 28]. Konkretno, iako statistički tretman (npr. vrednosti redukovano χ^2 , tj. vrednosti χ^2 podeljene sa brojem

¹⁹U okviru XSPEC-a se može koristiti i komanda `nh`, koja za zadatu rektascenziju i deklinaciju (pravac) daje procenu ukupne linijske gustine.

²⁰Regrupisanje se vrši spajanjem postojećih grupa (energijskih kanala) dok se ne postigne bar neka minimalna statistika, no ipak se vodi računa da se ne spoji više od nekog maksimalnog broja početnih kanala.

stepeni slobode) daje numerički gledano prihvatljive modele, postojanje velikih oscilacija oko $0.7 - 1.0$ keV u graficima koji prikazuju razlike između posmatranja i modela ukazuju da je prisutna neka dodatna komponenta emisije. Zastupljenosti elemenata C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Fe, Ni, za sve regione pokazuju da je reč o tzv. oblasti povećanih zastupljenosti u skladu sa radovima [13, 28] i dr.

Podsećanja radi, granična oblast emisije severoistočnog dela ostatka Petlja u Labudu u X-području poklapa se sa optičkim neradijativnim H α filamen-tima, koji materijalizuju položaje lokalnih udarnih talasa. Prisustvo H α filamenata ukazuje na prisustvo neutralne komponente materije u oblasti neposredno iza udarnog fronta. Kao što je naglašeno, pored modela apsorpcije u X-području (tbabs), spektar ostatka je prvobitno opisivan samo pomoću vps shock modela. Zapravo, dosadašnja istraživanja su pokazala da spektri iz velikog broja oblasti samog ruba ostatka supernove Petlja u Labudu mogu sasvim dobro da se predstavljaju pomoću modela koji podrazumeva jednu vps shock komponentu, sa temperaturom reda 0.2 keV i relativnim zastupljenostima u odnosu na Sunce reda $0.1 - 0.2$ (sabsolarne zastupljenosti). U tim oblastima nije dominantna emisija od zvezdane materije koja je odbačena tokom pojave supernove. Dakle, većina oblasti u ivičnim regionima ostatka, su regioni tzv. normalne lokalne zastupljenosti, kojima odgovaraju mnogo manje vrednosti zastupljenosti (bar upola manje) od prosečne međuzvezdane. Takav je slučaj sa regionima koji se nalaze u Pos-1 oblasti (videti sledeće poglavlje). Skrenimo pažnju da su lokalne međuzvezdane zastupljenosti u okolini ostatka reda 0.5 . Uključivanjem značajnog doprinosa netermalne komponente emisiji ivičnih regiona ostatka u X-području moglo bi se, u principu, ukazati na to da su zastupljenosti zapravo bliske međuzvezdanim. Ipak, model koji obuhvata i netermalnu komponentu (stepeni zakon) se u konkretnom slučaju pokazao fizički nerealan, što i nije očekivano [28].

Sa druge strane, primećene su i pojedine, uske oblasti tzv. povećane zastupljenosti, duž oboda ostatka, koje više podsećaju na prosečne zastupljenosti u međuzvezdanoj materiji. Dakle, kada se govori o tzv. oblastima povećane zastupljenosti, zapravo mislimo na vrednosti koje su bliske prosečnim zastupljenostima u međuzvezdanoj materiji. U tom smislu bi se moglo reći da postoje dva tipa materije u okruženju ostatka, jedna sa vrednostima zastupljenosti koja odgovara prosečnoj međuzvezdanoj materiji, a druga koja bi odgovarala svojevrsnom zidu šupljine u kojoj je došlo do pojave supernove, te sa kojim je ostatak verovatno trenutno u kontaktu [28]. Moguće je da je dejstvo zvezdanog vetra izmenilo zastupljenosti u delovima

neposrednog okruženja ostatka. Ipak, zvezdani vetrovi bi trebalo da su bogati jedino elementima kao što su C, N, O, i Ne [28]. To pak nije u skladu sa opšte povećanim zastupljnostima u tim oblastima. Dosadašnja istraživanja su pokazala i da je malo verovatno da se očekuje da je sama međuzvezdana materija u toj meri nehomogena i to na tako malim prostornim skalama (prostornim skalama reda nekoliko parseka). Novija istraživanja, pak pokazuju da je prvobitni scenario, po kojem se ostatak supernove širi kroz šupljinu i udara o svojevrsni zid nastao dejstvom zvezdanog vetra zvezde roditelja, možda pogrešan. Drugim rečima, ispostavlja se da ostatak verovatno samo interaguje sa velikim brojem okolnih diskretnih međuzvezdanih oblaka [16, 17, 18]. Konačno, prisustvo emisije usled razmene naelektrisanja (CX emisije) može jednostavno objasniti pojavu oblasti povećane zastupljenosti i rešiti problem prividne heterogenosti zastupljenosti elemenata duž ivice ostatka. Zapravo, uključivanje CX emisije u model spušta vrednosti zastupljenosti na nivo u tzv. normalnim regionima. CX komponenta X-zračenja ostatka supernove Petlja u Labudu daje najveći doprinos u intervalu energija 0.3 – 2 keV, pa regioni sa povećanim zastupljenostima obično pokazuju povišenu emisiju, pre svega na 0.7 keV. U tom smislu je u nastavku dodata i komponenta usled emisije prouzrokovane procesom razmene naelektrisanja.

Uopšteno, razmena naelektrisanja se može tretirati kao specifičan neelastični sudar pri kojem se jedan ili više elektrona razmenjuje između jona (iz oblasti nakon prolaska udarnog fronta) i neutrala (pre svega neutralnog vodonika iz okoline). Razmena naelektrisanja se realizuje neradijativno, pri čemu sledi naknadna radijativna deekscitacija. Ispostavlja se da je u nezamisljivom broju slučajeva u astrofizičkim plazmama verovatnoća za ovaj proces velika. Kod visoko jonizovanih atoma (npr. O VIII) koji učestvuju u izmeni naelektrisanja sa neutralnim vodonikom, prilikom radijativne deekscitacije fotoni imaju energije u X-području. U tom smislu su oblasti neposredno iza udarnog fronta ostataka supernove potencijalni izvori CX emisije.

Upravo NE3 i NE4 oblasti posmatrane svemirskom opservatorijom Suzaku obuhvataju regione povećane zastupljenosti i poklapaju se sa P7 delom ostatka (pogledati sliku 3.10). U radu [28] spektar ostatka supernove je opisan tako što je pored uobičajene, termalne emisije ostatka dodata i komponenta CX emisije. Termalna komponenta je opisana *vpshock* modelom sa zastupljnostima određeni iz analize spektara NE2 oblasti (videti poglavlje 3.5), sa normalnim zastupljenostima. Te vrednosti su zatim fiksirane, a CX emisija je onda modelovana Gausijanima (22 emisione linije). U [13] je predstavljena slična analiza sa 35 relevantnih CX emisioh linija.

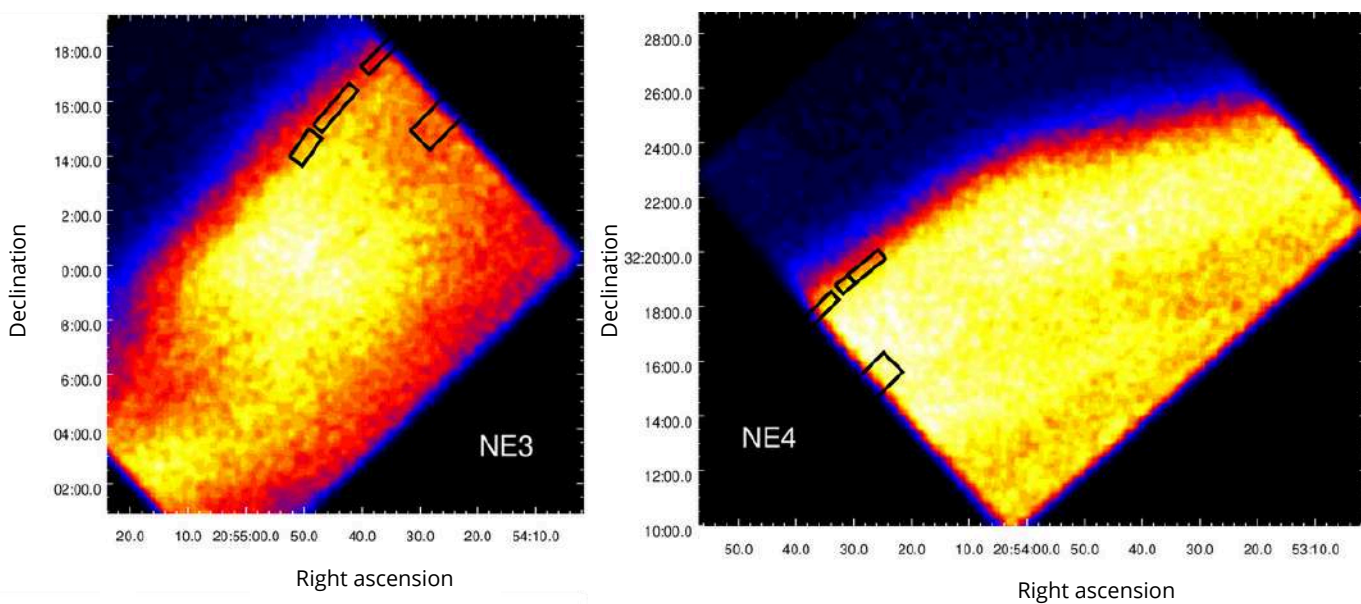
Posmatranja ostvarena pomoću XMM-Njutn opservatorije daleko su lošije energijske rezolucije od onih ostvarenih pomoću Suzaku-a²¹. Kako tako mnoge linije nisu razlučene u posmatranjima XMM-Njutnom, trebalo bi imati u vidu rezultate ostvarene pomoću Suzaku-a, pa ih koristiti kao okvirne smernice za vrednosti parametara prilikom modelovanja. Iz pomenutih razloga je u ovom radu korišćen pojednostavljen pristup modelovanju CX emisionih linija, kako za razliku od Suzaku-a, ovde mnoge linije i nisu razlučene. Uvedeno je 8 dominantnih emisionih linija opisanih Gausijanima, po proceduri predstavljenoj u radu [28], gde je vrednost energije fiksirana (C VI Ly α na 0.3673 keV, C VI Ly γ na 0.4591 keV, O VII K α na 0.57 keV, O VIII Ly α na 0.653 keV, O VII Ly γ na 0.8163 keV, Ne IX K α na 0.91 keV, Ne X Ly α na 1.02 keV, Mg XI K α na 1.35 keV).

Na slici 3.10 je predstavljen kompozitni snimak dela severoistočne oblasti ostatka supernove Petlja u Labudu ostvaren pomoću sve četiri XIS kamere (XIS 0-3) opservatorije Suzaku²² u opsegu energija između 0.3 – 2.0 keV. Prikazane su dve oblasti, NE3 (levo; Obs. ID 500022010, od 29. novembra 2005. godine) i NE4 (desno; Obs. ID 500023010, od 30. novembra 2005. godine). U tu svrhu je korišćen softverski alat Ximage (eng. *Ximage, An X-Ray Image Package*) sadržan unutar HEASoft-a. Za detalje videti [28]. Pravougaonicima su označeni regioni koji se koriste za analizu XMM-Njutn spektara u ovom radu.

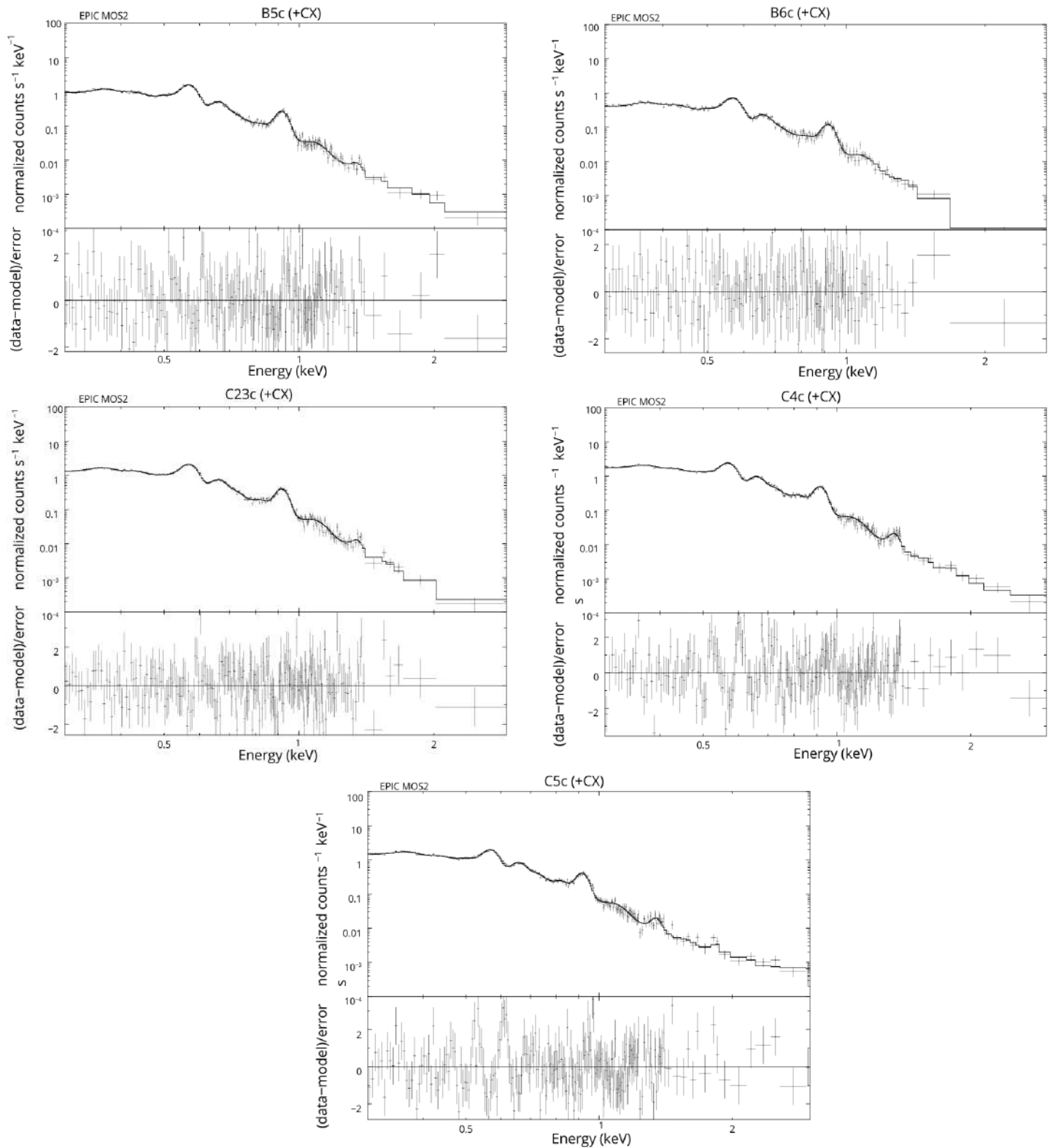
Na slici 3.11 prikazani su spektri regiona B5c, B6c, C23c, C4c i C5c, koji se poklapaju sa konkretnim optičkim filamentima. Spektri regiona B5b, B6b, C23b, C4b i C5b, koji odgovaraju delovima OSN u rasponu od 25'' iza samih filamenata predstavljeni su na slici 3.12. Na slici 3.13 prikazani su spektri regiona B5z, B6z, C23z, C4z i C5z, koji započinju nakon 25'' iza svakog filameta i proteže se 75''. Konačno, spektar poredbene oblasti (crni region), koja se ne poklapa sa H α filamentima, prikazan je na slici 3.14. Punim crnim linijama je predstavljen odgovarajući model koji uključuje i CX emisiju.

²¹Podsetimo da XMM-Njutn ima i nižu senzitivnost izpod 0.5 keV nego Suzaku.

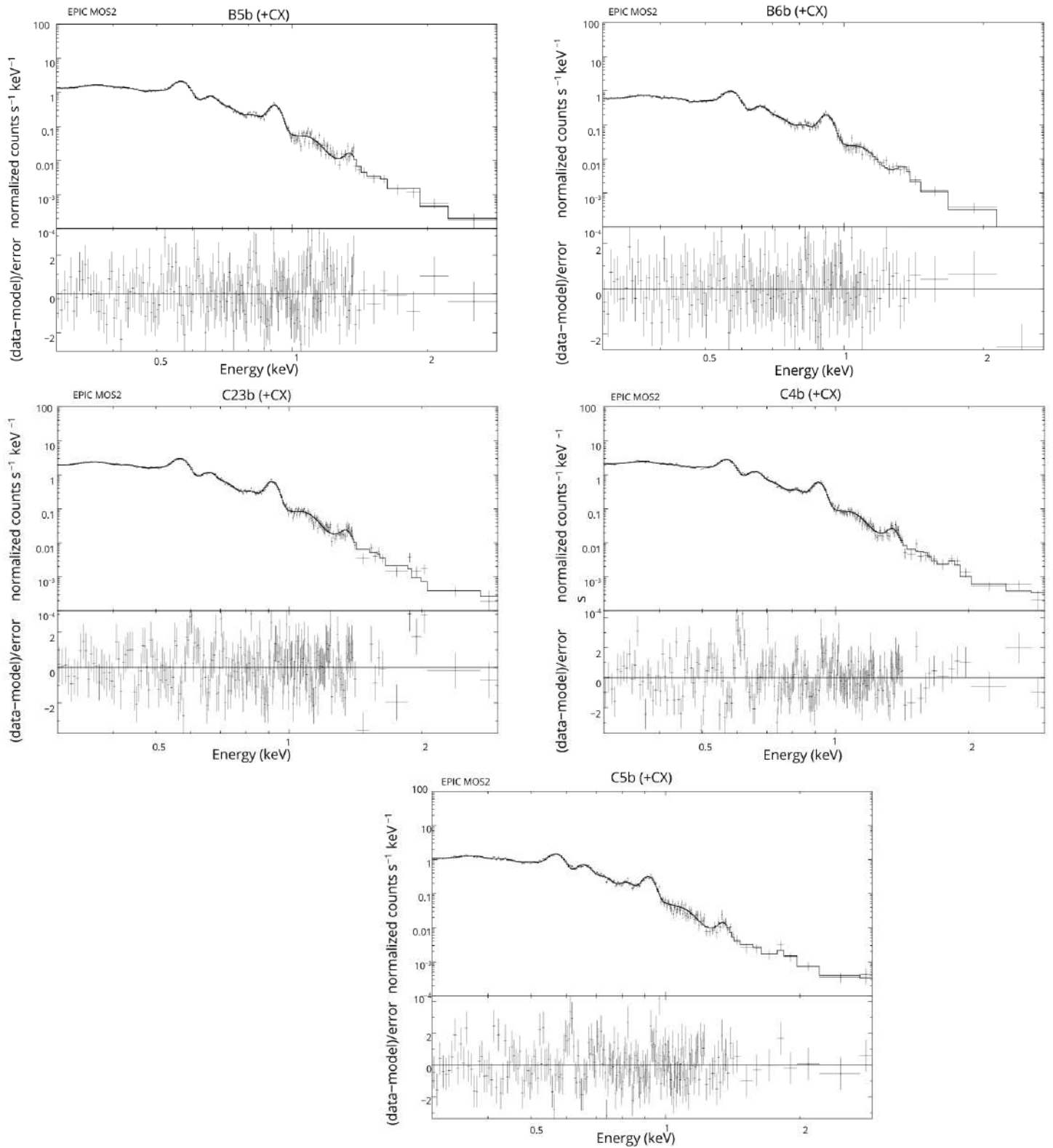
²²Podaci su preuzeti sa javno dostupne arhive HEASARC-a, koja uključuje više misija, na <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/W3Browse/w3browse.pl>.



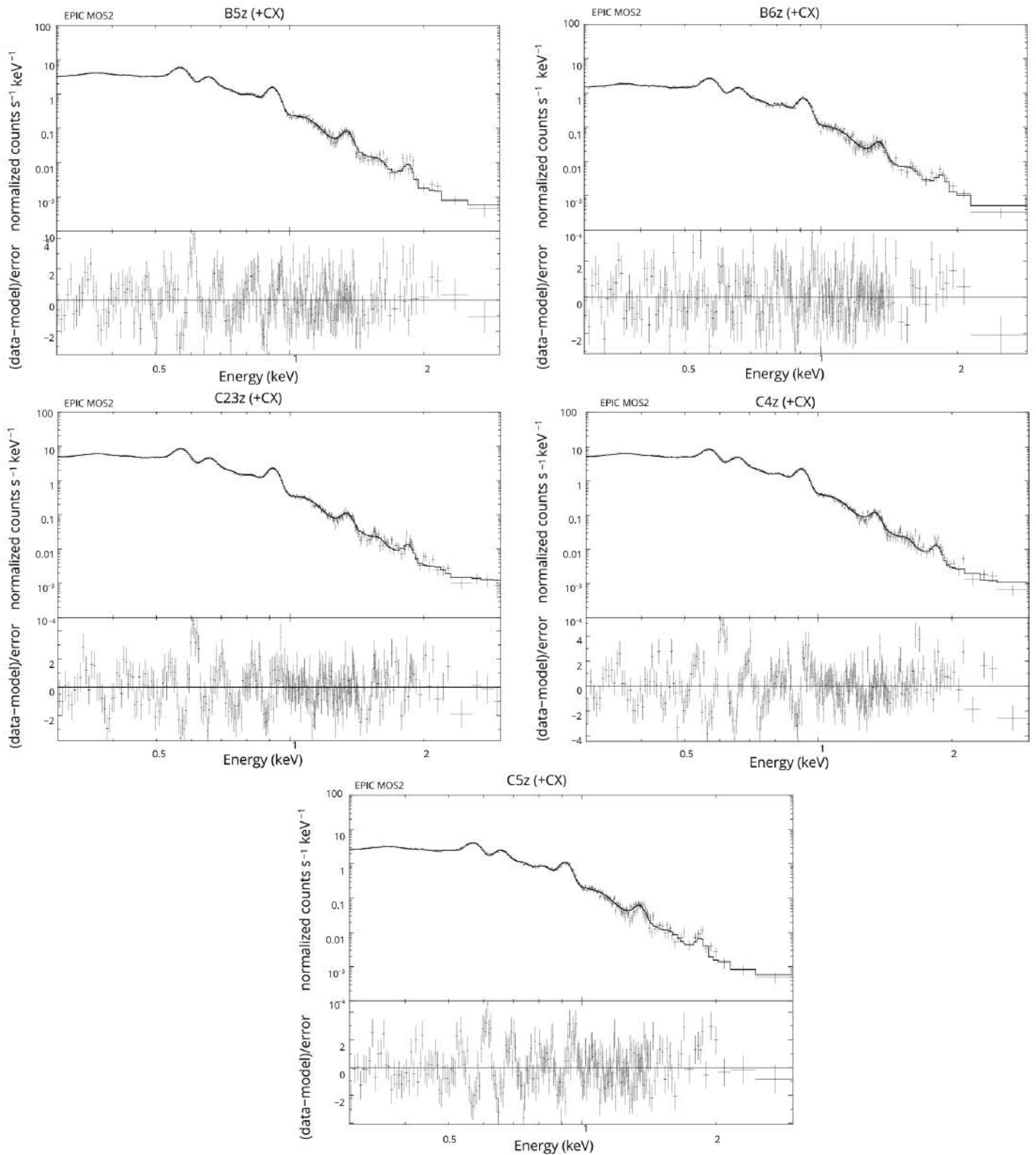
Slika 3.10: Kompozitni snimak ostatka supernove Petlja u Labudu ostvaren pomoću sve četiri XIS kamere opservatorije Suzaku u opsegu energija između 0.3–2.0keV. Prikazane su dve oblasti, NE3 (levo) i NE4 (desno). Pravougaonicima su označeni regioni koji se koriste za analizu spektara u ovom radu.



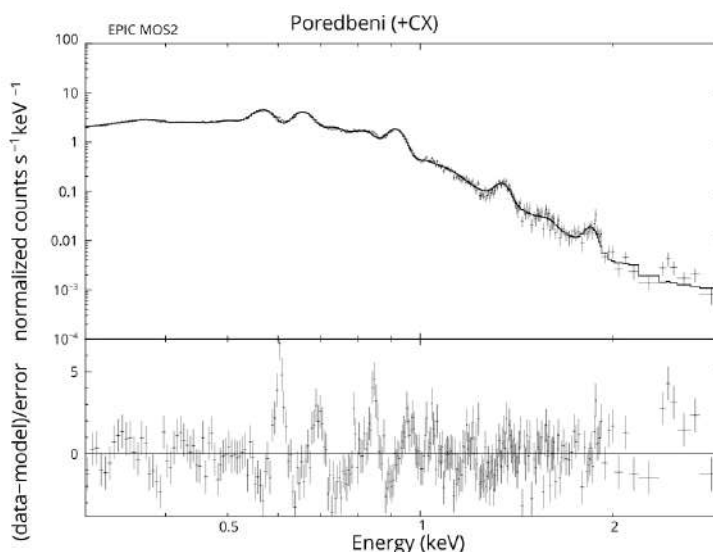
Slika 3.11: Spektri razmatranih regiona B5c, B6c, C23c, C4c i C5c, koji se poklapaju sa konkretnim optičkim filamentima. Punom crnom linijom predstavljen je model koji uključuje i CX emisiju.



Slika 3.12: Spektri razmatranih regiona B5b, B6b, C23b, C4b i C5b, koji odgovaraju delovima OSN u rasponu od $25''$ iza samih filamenata. Punom crnom linijom predstavljen je model koji uključuje i CX emisiju.



Slika 3.13: Spektri razmatranih regiona B5z, B6z, C23z, C4z i C5z, koji započinju nakon $25''$ iza svakog filameta i proteže se $75''$. Punom crnom linijom predstavljen je model koji uključuje i CX emisiju.



Slika 3.14: Spektar poredbene oblasti (crni region) koja nije preklapljena sa $H\alpha$ filamentima. Punom crnom linijom predstavljen je model koji uključuje i CX emisiju.

U tabeli 2 su predstavljeni samo rezultati za model koji uključuje CX emisiju, u slučaju kada se modeluje spektar pozadine. Date su vrednosti elektronskih temperatura kT_e , koje su izražene u keV. Kvalitet fita je dat u formi C -stat/dof, gde je vrednost C -statistike, a dof označava broj stepeni slobode.

Takođe, u ovom radu praćena je gradualna promena elektronske temperature, međutim predstavljena analiza nije dala očekivane rezultate u smislu praćenja fine, gradualne promene elektronske temperature sa udaljavanjem od udarnog fronta. Sa jedne strane ograničenja u spektralnoj i prostornoj rezoluciji, a sa druge strane pojednostavljeni model CX emisije, najverovatniji su uzroci tome. U svakom slučaju, elektronska temperatura za sve razmatrane regione je reda 0.2 keV, što je u skladu sa dosadašnjim radovima.

Uočava se da postoji trend postepenog rasta vrednosti jonizacione starosti od c, ka z oblastima, za svaki filament. Takav rezultat je očekivan, kako se

sve više udaljava od samog udarnog fronta (filamenta). Ipak, osim za B6z, C4z, za koje važi da je $n_{et} > 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ (CIE plazma), jonizaciona starost je u intervalu reda $n_{et} = (1 - 6) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ (NEI plazma).

Dobija se da uvođenjem CX linija u model zaista opadaju vrednosti zastupljenosti većine elemenata u odnosu na one određene prostim `vpshock` modelom. Ipak, primećena su odstupanja samo za Si i S. Naime, zastupljenosti Si, S su sistematski veće od normalnih i kreću se u intervalu između 0.7 – 2.0 u odnosu na Sunčeve, čak i kada se u model uključe CX linije. Nije moguće utvrditi trend promene ovih zastupljenosti sa udaljavanjem od svakog, konkretnog filameta. Uvođenje dodatne CX linije Si XIII $K\alpha$ na 1.833 keV nije bitno smanjilo vrednosti zastupljenosti Si i S. Dodatno, ako se prilikom modelovanja ne povežu zastupljenosti Si i S, opet ostaje tendencija ka vrednostima njihovih zastupljenosti > 0.5 u odnosu na Sunce. Kao i ranije, spektralna i prostorna rezolucija, kao i pojednostavljeni model CX emisije, najverovatniji su uzrok tome.

Pomenuti model sa CX linijama, u principu dobro opisuje sva posmatranja. To, na prvi pogled deluje čudno jer bi se očekivalo da bar crni, poredbeni region ne pokazuje CX emisiju. Za taj, tzv. poredbeni region se dobija $kT_e = 0.23_{-0.01}^{0.01} \text{ keV}$ (651.167/349). Jonizaciona starost je $> 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ (CIE plazma), a svi elementi imaju normalne zastupljenosti osim Si i S kod kojih je 1.4 u odnosu na Sunce. Ipak, kako je pokazano u [27], regioni povećane zastupljenosti (zapravo, oni sa CX emisijom) obuhvataju oblasti čak i preko 200'' iza samog udarnog fronta, odnosno iza neradijativnih filamenata u NE4 oblasti.

Tabela 2: Vrednosti elektronskih temperatura kT_e izraženih u keV, za model koji uključuje CX emisiju, za svaku razmatranu oblast. Kvalitet fita je dat u formi C -stat/dof, gde je vrednost C -statistike, a dof označava broj stepeni slobode.

Region	c (C -stat/dof)	b (C -stat/dof)	z (C -stat/dof)
B5	$0.20_{-0.02}^{0.03}$ (232.247/217)	$0.20_{-0.01}^{0.02}$ (264.608/230)	$0.22_{-0.02}^{0.01}$ (470.802/309)
B6	$0.21_{-0.04}^{0.04}$ (175.959/173)	$0.21_{-0.03}^{0.04}$ (170.107/188)	$0.20_{-0.01}^{0.02}$ (356.512/266)
C23	$0.20_{-0.02}^{0.03}$ (263.902/231)	$0.19_{-0.01}^{0.02}$ (310.182/255)	$0.21_{-0.01}^{0.01}$ (528.747/342)
C4	$0.20_{-0.01}^{0.03}$ (342.926/253)	$0.20_{-0.01}^{0.02}$ (379.242/259)	$0.20_{-0.01}^{0.01}$ (687.649/347)
C5	$0.21_{-0.03}^{0.01}$ (369.573/268)	$0.19_{-0.01}^{0.02}$ (307.372/227)	$0.20_{-0.01}^{0.01}$ (512.501/304)

Rezultati predstavljeni u ovom radu su generalno u skladu sa spektralnom analizom ostvarenom pomoću svemirske opservatorije Suzaku [13, 28], a u suprotnosti su sa rezultatima predstavljenim u [39, 50, 56, 58] koji su koristili posmatranja koja su realizovana pomoću ROSAT-a. Jonizaciona starost većine razmatranih regiona, reda $10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$, ukazuje da plazma nije u CIE (mada mu teži), za razliku od zaključaka predstavljenim u [39, 50, 56, 58].

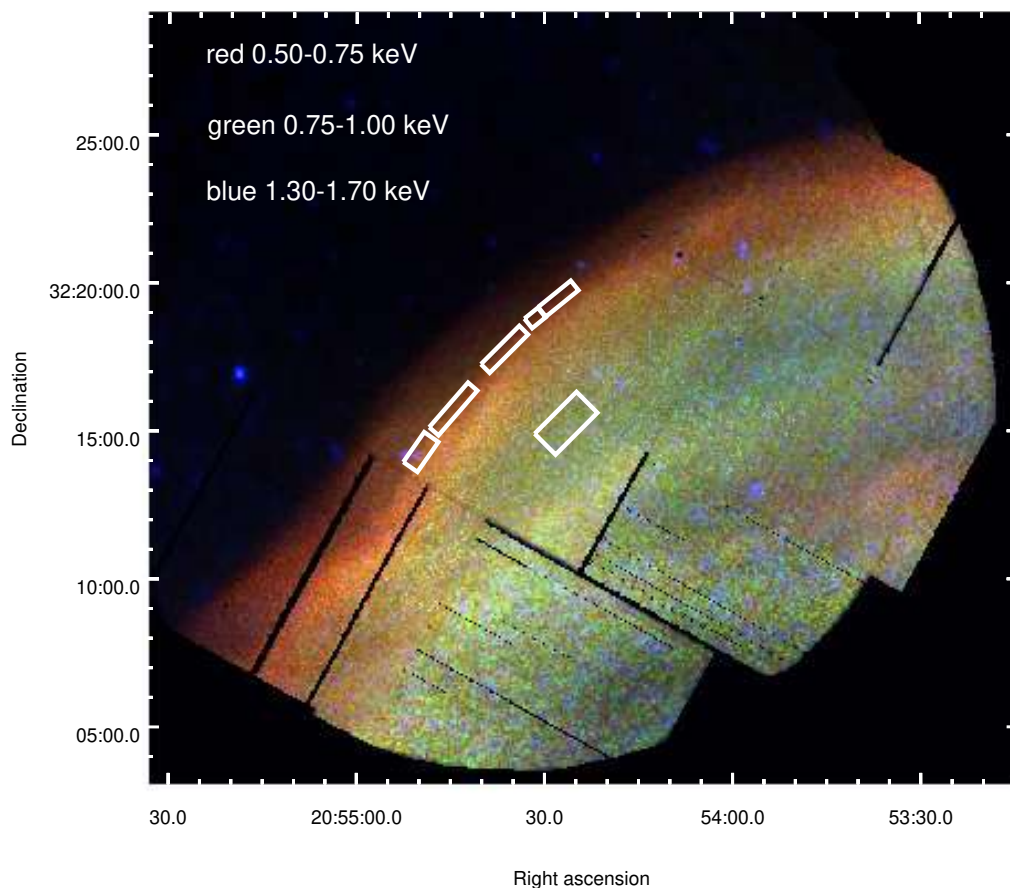
Slične vrednosti temperature i jonizacione starosti se dobijaju (mada bliže CIE granici od $10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$) ukoliko se fiksiraju vrednosti zastupljenosti na one iz NE2 oblasti posmatrane XIS instrumentima opservatorije Suzaku²³, mada je kvalitett fita mnogo lošiji.

Već i vizuelna inspekcija odstupanja posmatranog spektra od modela (videti slike 3.11, 3.12, 3.13, 3.14), ukazuje da, iako je razmatrani model formalno prihvatljiv, ipak i dalje postoji neslaganje koje je najverovatnije posledica pojednostavljenog modela CX emisije (prosti Gausijani koji opisuju konkretne linije). Pokazuje se da dodavanje drugih, manje izraženih CX emisioh linija iz [13] još više spušta zastupljenosti na normalne, mada je i dalje prisutna tendencija Si i S ka vrednostima većim od 0.5 u odnosu na Sunce. Ipak, to je i dalje grub model koji podrazumeva fitovanje CX linija konačnim brojem Gausijana. Jako je važno voditi računa o tome da vrednosti stope rekombinacija jona zapravo rastu usled procesa razmene naelektrisanja, tako da su plazmi u kojoj se primećuje CX emisija svojstvene niže vrednosti jonizacionih stanja elemenata nego kod plazme čija je emisija čisto termalna. Jasna je potreba za složenijim modelima emisije ostataka supernovih u X-području koji uključuju kako termalnu, tako i CX komponentu.

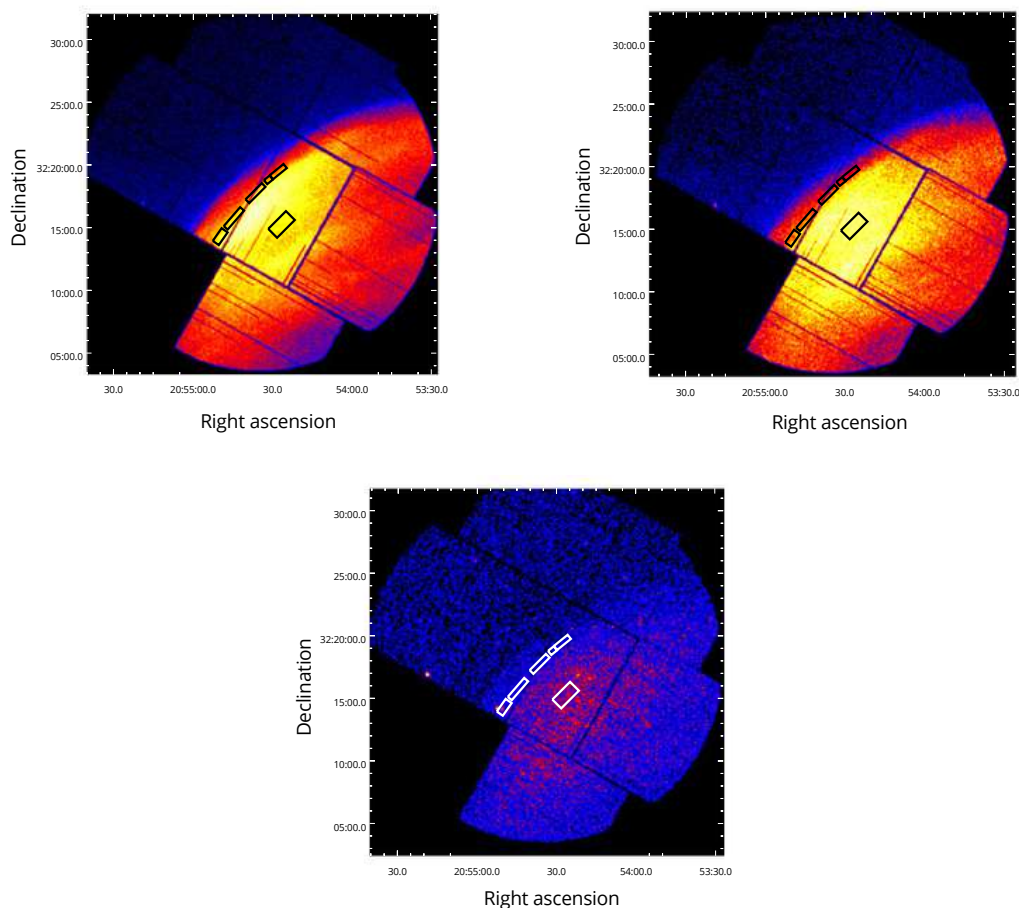
Kao dodatak, radi uvida u izraženost pojedinih emisioh linija u spektru i prostorne raspodele pojedinih elemenata, na slici 3.15 prikazan je kompozitni snimak P7 oblasti ostatka supernove Petlja u Labudu ostvaren pomoću sve tri EPIC kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.50 – 0.75 keV (crveno; dominantna oblast kiseonika O VII i O VIII), 0.75 – 1.00 keV (zeleno; oblast gvožđa Fe XIX i neona Ne IX), 1.30 – 1.70 keV (plavo; oblast magnezijuma Mg XI). Prostorna raspodela elemenata je u skladu sa dosadašnjim rezultatima, prikazanim u [28]. Pravougaonicima su označeni pojedini regioni koji se koriste za analizu spektara. Konkretnije, na slici 3.16 je prikazana P7 oblast ostatka Petlja u Labudu posmatrana pomoću EPIC MOS2 kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između

²³Za C, N, O, Ne, Mg, Si, i Fe relativne zastupljenosti u odnosu na Sunce iznose 0.17, 0.07, 0.08, 0.15, 0.10, 0.10, i 0.14 [13].

0.5 – 0.75 keV (gore, levo), 0.75 – 1.00 keV (gore, desno), 1.3 – 1.7 keV (dole). Pravougaonicima su opet označeni pojedini regioni koji se koriste za analizu spektara. CCD5 je isključen iz analize jer je, u konkretnom posmatranju u anomalnom režimu. Jasno se primećuju dominantna emisija u linijama kiseonika.



Slika 3.15: Kompozitni snimak P7 oblasti ostatka supernove Petlja u Labudu ostvaren pomoću sve tri EPIC kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.50 – 0.75 keV (crveno; oblast kiseonika O VII i O VIII), 0.75 – 1.00 keV (zeleno; oblast gvožđa Fe XIX i neona Ne IX), 1.30 – 1.70 keV (plavo; oblast magnezijuma Mg XI). Pravougaonicima su označeni pojedini regioni koji se koriste za analizu spektara.

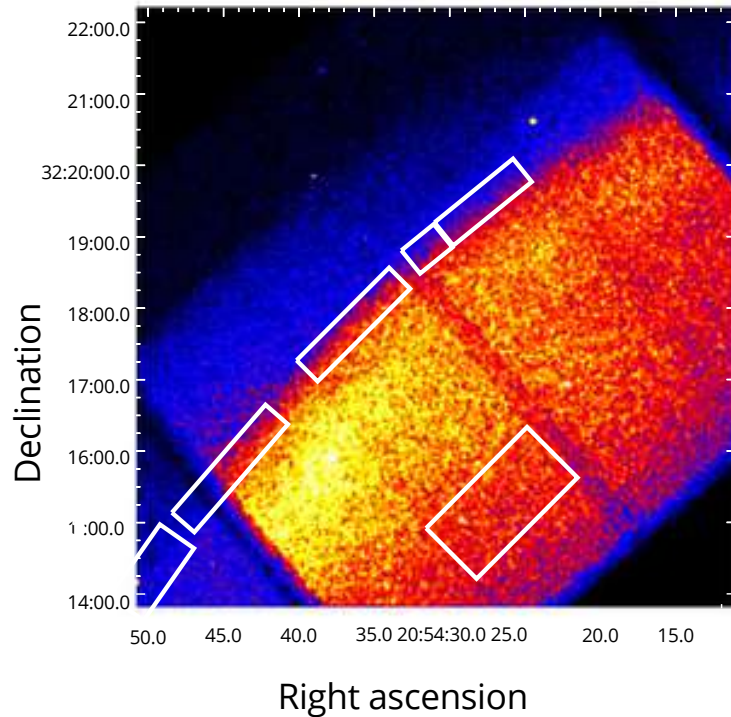


Slika 3.16: P7 oblast ostatka Petlja u Labudu posmatrana pomoću EPIC MOS2 kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.5 – 0.75 keV (gore, levo), 0.75 – 1.00 keV (gore, desno), 1.3 – 1.7 keV (dole). Pravougaonicima su označeni pojedini regioni koji se koriste za analizu spektara. CCD5 je isključen iz analize jer je, u konkretnom posmatranju u anomalnom režimu.

Na slici 3.17 je, radi poređenja, prikazan severoistočni deo ostatka supernove Petlja u Labudu posmatran pomoću ACIS S3 kamere svemirske opservatorije Čandra²⁴ u opsegu energija između 0.5 – 7.0 keV. Reč je o posmatranju (Obs. ID 2821; PI: *Terrance Gaetz*) od 24. decembra 2001. godine (za detalje videti u [27]). Pravougaonicima su označeni regioni koji se koriste za analizu

²⁴Podaci su preuzeti sa javno dostupne arhive posmatranja svemirske opservatorije Čandra na <https://cda.harvard.edu/chaser/>.

spektara u ovom radu. Rezultati koji su prikazani u ovom radu su u skladu (red veličine) sa spektralnom analizom Čandrinih posmatranja [27].



Slika 3.17: Ostatak supernove Petlja u Labudu posmatran pomoću ACIS S3 kamere svemirske opservatorije Čandra u opsegu energija između 0.5 – 7.0 keV. Pravougaonicima su označeni regioni koji se koriste za analizu spektara u ovom radu.

Kako je spektralna rezolucija Čandre sličnija XMM-Njutn-u, rezultati dobijenu u ovom radu, za model `tbabs·vpshock` su, očekivano, istog reda veličine²⁵. Ipak, usled bolje prostorne rezolucije u odnosu na XMM-Njutn, pomoću Čandre bi se, u principu mogla preciznije ograničiti emisija iz konkretnih regiona, pa bi bilo zanimljivo modelovati Čandrin spektar P7 oblasti modelom koji uključuje CX emisiju i uporediti rezultate.

²⁵U radu [27], modelovanje Čandrinog spektra P7 oblasti nije uključivalo CX emisiju.

Dodatno, na osnovu izračunatih vrednosti brzina optičkih filamenata, merenjem sopstvenog kretanja, V_{proper} , datim u [69], može se izračunati $T_{\text{proper}} = 3m_p V_{\text{proper}}^2 / (16k)$, gde je m_p masa protona, k Bolcmanova konstanta²⁶ [58], i uporediti je sa elektronskim temperaturama iz Tabele 2. Vrednosti temperature u oblasti iza udarnog fronta, procenjene samo iz merenja sopstvenog kretanja optičkih filamenata su obično veće od stvarnih vrednosti, posebno kada se ostatak širi kroz izrazito heterogenu sredinu (za detalje videti u [58]). Sa druge strane, za veoma heterogene sredine kroz koje se širi ostatak, pored zagrevanja okolne materije vodećim udarnim talasom i dodatnog zagrevanja zvezdane materije odbačene eksplozijom supernove povratnim udarnim talasom, dolazi do dopuskog zagrevanja usled interakcije udarnih talasa sa lokalnim zgušnjeljima (oblacima). Usled interakcije udarnih talasa sa međuzvezdanim oblacima, pored transmitovanih, javljaju se i reflektovani udarni talasi koji dodatno zagrevaju plazmu [65], pa povećavaju vrednosti T_e određenih iz X-posmatranja. U tom smislu je moguće očekivati da su vrednosti T_e nekada veće od T_{proper} . Uz to, precizno empirijski utvrditi vrednosti elektronskih temperatura je teško sa ograničenom prostornom i spektralnom rezolucijom trenutno raspoloživih instrumenata. Konačno, kod NEI plazme su temperature elektrona i jona (protona) svakako različite.

U tabeli 3 su predstavljene računute vrednosti kT_{proper} za svaki razmatrani filament. Za filamente B5 i C23 su $T_e > T_{\text{proper}}$, a za B6, C4 i C5, $T_e < T_{\text{proper}}$.

Tabela 3: Računate vrednosti kT_{proper} za svaki razmatrani filament u P7 oblasti. Vrednosti za brzine i odgovarajuće greške su preuzeti iz [69].

Region	kT_{proper} [keV]
B5	0.14±0.07
B6	0.28±0.10
C23	0.16±0.08
C4	0.45±0.13
C5	0.38±0.12

²⁶nem. *Ludwig Boltzmann*, 1844 – 1906.

3.5 Preliminarna analiza spektara izabranih regiona iz Pos-1 oblasti

Kompozitni snimak dela Pos-1 oblasti ostatka supernove Petlja u Labudu ostvaren pomoću sve tri EPIC kamere XMM-Njutn opservatorije u opsegu energija između 0.40 – 0.52 keV (crveno), 0.52 – 1.07 keV (zeleno), 1.07 – 5.0keV (plavo) prikazan je na slici 3.18. Pravougaonicima su označeni regioni koji se koriste za preliminarnu analizu spektara predstavljenu u ovom radu.

Radi poređenja, na slici 3.19 je predstavljen kompozitni snimak dela ostatka supernove Petlja u Labudu NE2 (Obs. ID 500021010, od 24. novembra 2005. godine), ostvaren pomoću sve četiri XIS kamere (XIS 0-3) opservatorije Suzaku u opsegu energija između 0.3–2.0keV. Slika je, u ovom radu dobijana upotrebom softverskog alata Ximage sadržanom unutar HEASoft-a. Pravougaonicima su označeni regioni koji sadrže optičke filamente razmatrane u ovom radu.

Kako su regioni, pridruženi odgovarajućim optičkim filamentima od interesa, daleko od centra vidnog polja, analiza spektara je znatno otežana. Iz tog razloga će, u nastavku biti predstavljena samo preliminarna, pojednostavljena analiza jednog neradijativnog K1 i J1 i jednog radijativnog H1 filameta. Za neradijativni filament K1 i J1 je, na sličan način kao i u prethodnom poglavlju, izabrano tri regiona za analizu spektara. Crveni pravougaonik (c) je pridružen filamentu, dok beli odgovara delovima OSN u rasponu od 25'' iza samog filameta. Zeleni region (z), paralelan filamentu, započinje nakon 25'' iza filameta i proteže se 75''. Za radijativni H1 filament je razmatrana samo oblast koja obuhvata taj filament.

Čitava oblast predstavljala severoistočnu ivicu ostatka sa tzv. normalnim zastupljenostima gde nije uočena ni CX ni SWCX emisija. Elektronske temperature su reda $kT_e = 0.2\text{keV}$, dok je jonizaciona starost reda $5 \times 10^{11} \text{cm}^{-3} \text{s}$.

Kako ostatak pokriva celi FOV, osim oduzete čestične pozadine pomoću kalibracionih FWC podataka, ostala pozadina je modelovana na isti način kako je opisano u prethodnom poglavlju. Jedina razlika je u tome što su u ovom slučaju, radi bolje kontrole fizičke smislenosti rezultata, zastupljenosti bile fiksirane na srednje vrednosti određene za ovu, NE2 oblast pomoću posmatranja ostvarenim instrumentima sa Suzaku opservatorije (videti fusnotu 23). Omogućeno je da se linijska gustina vodoničnog sadržaja za pravac ka ostatku menja tokom fitovanja, dok je ukupna Galaktička linijska gustina u tom pravcu, pri tretiranju pozadine bila, kao i u prethodnom poglavlju

fiksirana.

Preliminarni rezultati u ovom master radu za K1 i J1 oblast daju sledeće vrednosti elektronskih temperatura: $kT_e = 0.10_{-0.1}^{0.04}$ keV (194.310/160) za c, $kT_e = 0.11_{-0.1}^{0.03}$ keV (206.800/159) za b, te $kT_e = 0.12_{-0.03}^{0.02}$ keV (297.410/218) za z region. Vrednosti su nešto niže u odnosu na ranije analize slične oblasti neba, no ipak u granicama greške. Jonizaciona starost je reda $3 \times 10^8 \text{ cm}^{-3} \text{ s}$, što je znatno niža vrednost nego u ranijim analizama Pos-1 oblasti. Verovatno je reč o artefaktu fitovanja, usled grubog, pojednostavljenog tretiranja pozadine u ovom posmatranju. Ipak, ova vrednost ukazuje na tendenciju ka NEI plazmi. Vrednosti za linijsku gustinu (u intervalu reda $(0.001 - 0.02) \text{ cm}^{-2}$) su u skladu sa ranijim posmatranjima Pos-1 područja.

Kada je radijativni, H1 filament u pitanju, sledi da je $kT_e = 0.16_{-0.02}^{0.01}$ keV (279.067/210) što je u skladu sa prosečnom temperaturom za ovu oblast. Jonizaciona starost $> 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ ukazuje na CIE plazmu.

Konačno, istaknimo da za K1 i J1 filamente sledi da je $T_{\text{proper}} > T_e$, a za radijativni H1 filament se dobija da je $T_{\text{proper}} < T_e$.

Tabela 4: Računate vrednosti kT_{proper} za K1, J1 i H1 filamente iz Pos-1 oblasti.

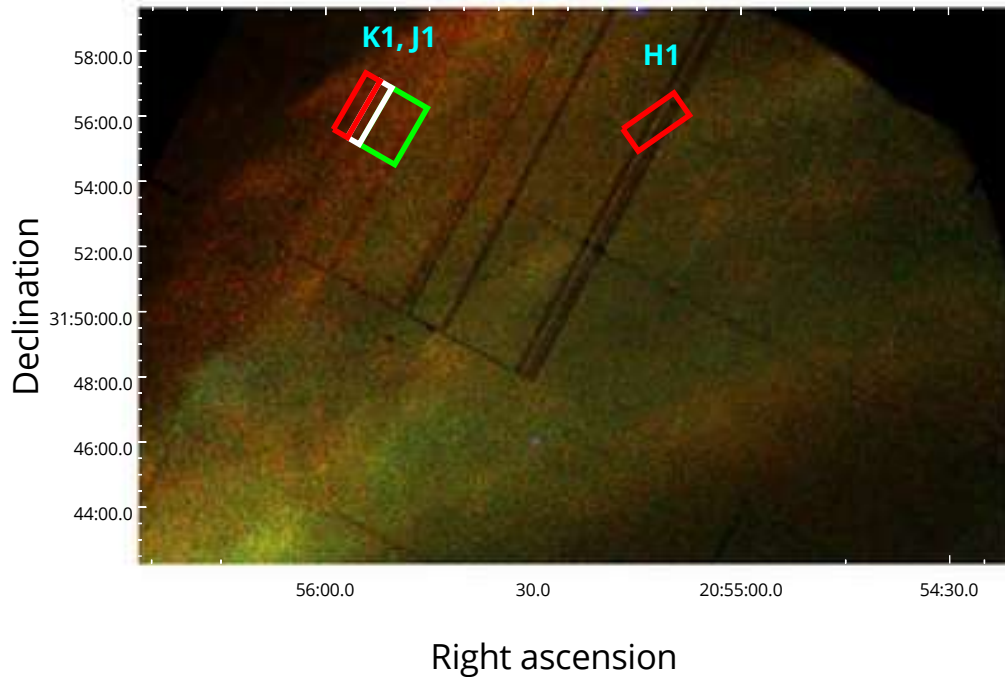
Region	kT_{proper} [keV]
K1	0.21 ± 0.09
J1	0.19 ± 0.08
H1	0.03 ± 0.04

Na slici 3.20 je prikazana neprekidna radio-emisija na 325 MHz u oblasti od interesa (zeleno). Reč je o posmatranju sa WENSS pregleda severnog neba²⁷. Dodatno, plavom bojom su predstavljena X-posmatranja P7, a crvenom Pos-1 oblasti. Regioni izabrani za spektralnu analizu u okviru P7 oblasti smešteni su van značajne radio-emisije. Sa druge strane, radijativni H1, pa i neradijativni K1 i J1 regioni se nalaze u blizini lokalno pojačanog površinskog radio-sjaja.

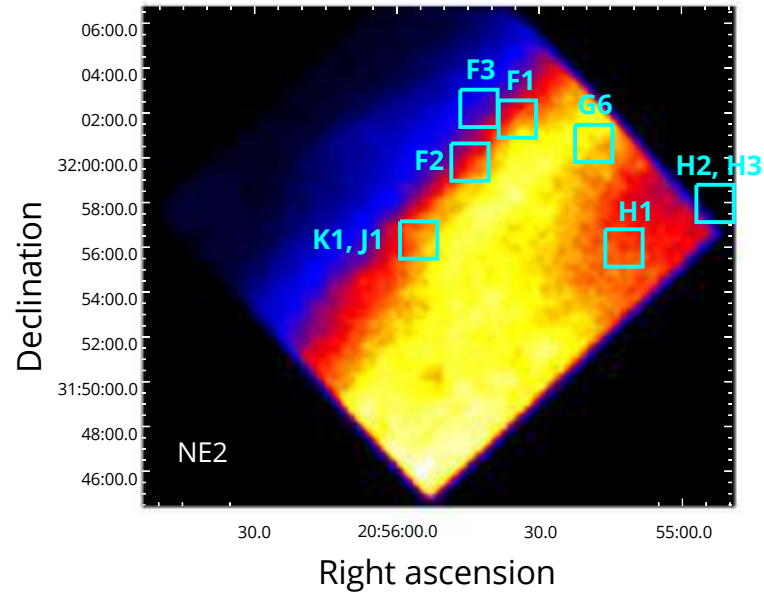
Duž cele ivice ostatka uglavnom se nalaze neradijativni H α filamenti. Ipak, prisustvo emisije u X-području usled razmene naelektrisanja se ne uočava svuda. One oblasti duž ivice ostatka kod kojih CX emisija nije posmatrana, obično se poklapaju sa regionima lokalno pojačane sinhrotronske

²⁷Podaci su preuzeti sa <https://skyview.gsfc.nasa.gov/current/cgi/query.pl>.

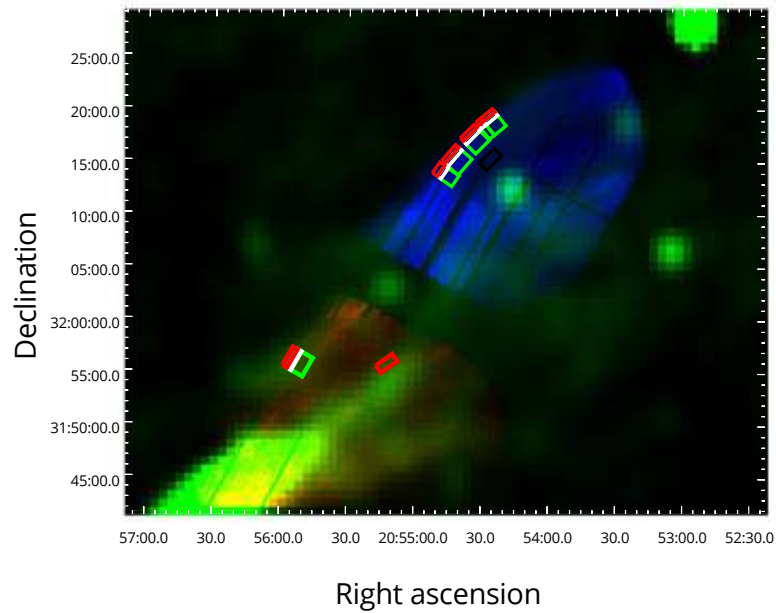
radio-emisije. Kako netermalno radio-zračenje podrazumeva naelektrisane čestice visokih energija (pre svega, elektrone), odsustvo CX emisije se može objasniti jonizacijom neutrala okolne sredine, pre prolaska samog udarnog fronta. Na taj način je moguće svesti CX emisiju na nivo ispod granice detekcije. Naravno, za razliku od neradijativnih, u slučaju radijativnih filamentata, kao što je H1, gustina materije je veća, a brzina udarnog fronta je manja. Pokazuje se i da sporiji udarni talasi proizvode manje CX emisije nego oni većih brzina [32]. Interesantno je naglasiti da se ni kod jednog neradijativnog filameta u Pos-1 oblasti ne posmatra CX emisija, što predstavlja zanimljivu temu za budući rad.



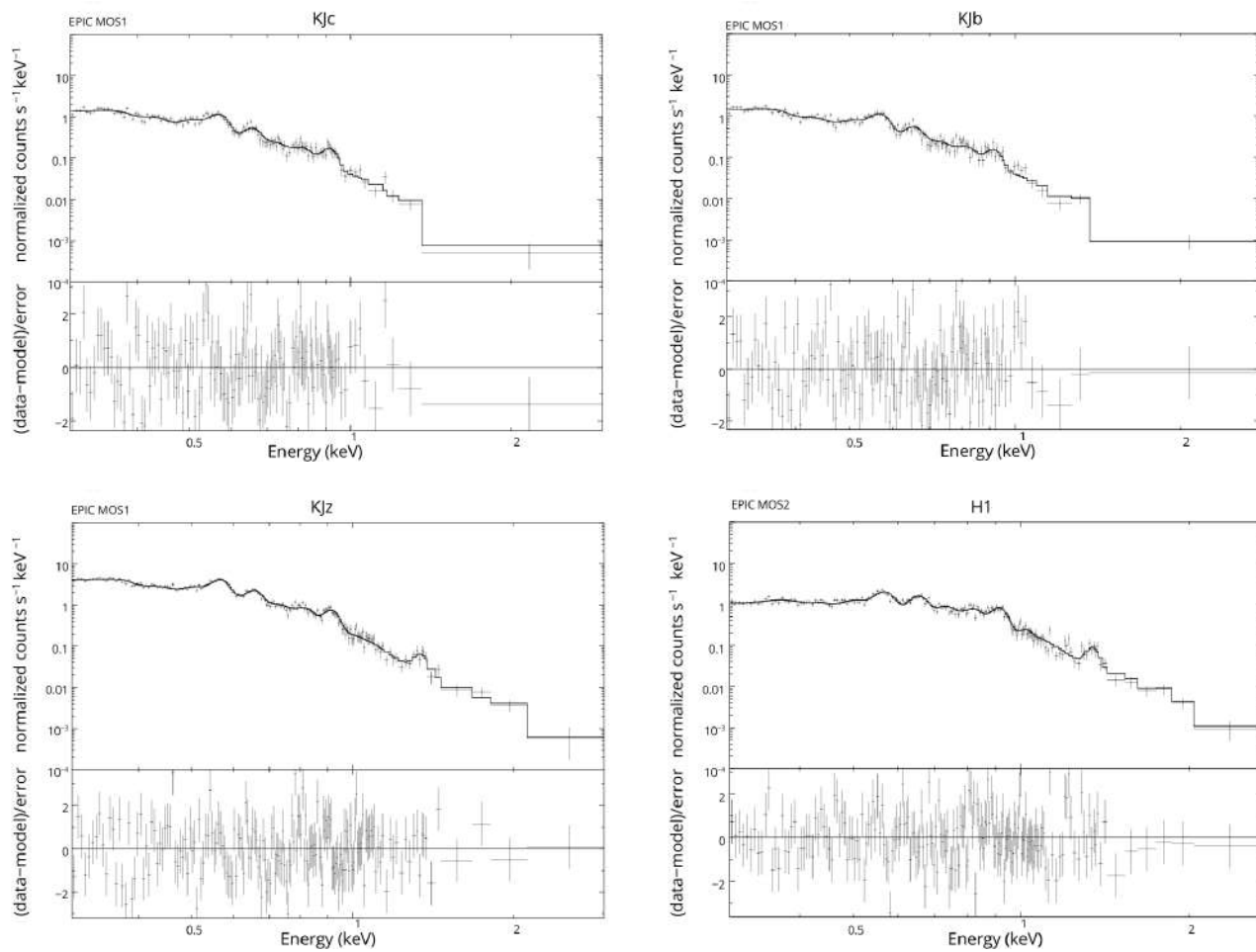
Slika 3.18: Kompozitni snimak dela Pos-1 oblasti ostvaren pomoću sve tri EPIC kamere između 0.40 – 0.52 keV (crveno), 0.52 – 1.07 keV (zeleno), 1.07 – 5.0 keV (plavo). Pravougaonicima su označeni regioni koji se koriste za analizu.



Slika 3.19: Kompozitni snimak dela Petlje u Labudu NE2, ostvaren pomoću sve četiri XIS kamere (XIS 0-3) opservatorije Suzaku između 0.3 – 2.0 keV. Pravougaonicima su označeni regioni koji sadrže optičke filamente razmatrane u ovom radu.



Slika 3.20: Nprekidna radio-emisija na 325 MHz u oblasti od interesa (zeleno). Plavom bojom su predstavljena posmatranja P7, a crvenom Pos-1 oblasti u X-području. Dodatno, prikazani su i razmatrani regioni za spektralnu analizu.



Slika 3.21: Spektari regiona K1 i J1 c (koji se poklapa sa konkretnim optičkim filamentom), K1 i J1 b (koji odgovara delovima OSN u rasponu od 25'' iza samog filameta), K1 i J1 b (koji započinje nakon 25'' iza filameta i proteže se 75'') i regiona H1 (koji odgovara radijativnom filamentu). Punim crnim linijama je predstavljen odgovarajući model.

Zaključak

U ovom radu predstavljena je analiza spektara nekoliko optičkih filamenata supernove Petlja u Labudu u X-području ostatka. Konkretno, razmatrani su pojedini regioni pridruženi radijativnim i neradijativnim filamentima severoistočne oblasti ostatka uz pomoć posmatranja sa svemirske opservatorije *XMM-Newton*.

- Spektralnom analizom utvrđeno je da se naizgled povećane zastupljenosti elemenata u slučaju određenog broja filamenata mogu objasniti time što se prilikom opisa spektara koristi neadekvatan model emisije. Naime, ukoliko se uključi i model emisije u linijama usled procesa razmene naelektrisanja, vrednosti zastupljenosti većine elemenata opadaju i teže očekivanim. Do neslaganja dolazi jedino kod silicijuma i sumpora, najverovatnije usled pojednostavljenog modela koji je korišćen u ovom radu. Ipak, može se reći da su rezultati predstavljeni u ovom radu u skladu sa analizom posmatranja veće spektralne rezolucije, ostvarenih pomoću svemirske opservatorije *Suzaku*, koja su pak znatno lošije prostorne rezolucije.
- Takođe diskutovane su vrednosti elektronske temperature i jonizacione starosti za svaku razmatranu oblast. Jonizaciona starost većine regiona ukazuje da plazma nije u jonizaciono-rekombinacionoj ravnoteži, odnosno da kinetičke temperature elektrona i protona nisu jednake.

Planovi za budući rad

Tokom izrade ovog master rada došlo se i do nekoliko ideja za budući rad. U nastavku će biti navedeno nekoliko najznačajnijih.

- Kao najvažniju modifikaciju analize date u ovom radu bi predstavljala upotreba složenijeg modela za linije nastale usled procesa transefra naelektrisanja, npr. kao opisanom u radu [21].
- Tokom izrade ovog master rada pojavila se novija verzija XMM-SAS alata. U tom smislu je planirano i da se celokupna analiza ponovi sa najnovijim dostupnim XMM-(E)SAS paketom, koji je u velikoj meri pretrpeo korekcije i poboljšanja u odnosu na ranije verzije. Ipak, nije za očekivati da će rezultati biti bitno različiti.
- Manje restriktivna redukcija posmatranja bi omogućila simultano modelovanje spektara sa sve tri EPIC kamere, što bi moglo da omogući detaljniju analizu. Naravno, ni u ovom slučaju se ne očekuju bitne razlike u rezultatima.
- Kada je reč o posmatranjima Pos-1 oblasti bilo bi interesantno sprovesti detaljnu analizu spektara, bez obzira što se konkretni regioni nalaze daleko od centra FOV-a.
- Težište ovog master rada je bilo na analizi posmatranja ostvarenim pomoću XMM-Njutn opservatorije. Kao plan za budući rad je analiza postojećih posmatranja sa arhive opservatorija Suzaku (zbog bolje spektralne rezolucije) i Čandra (zbog bolje prostorne rezolucije). Na taj način bi se dobila nezavisna potvrda rezultata predstavljenih u ovom master radu, a bili bi pokriveni i regioni koji nisu posmatrani XMM-Njutnom. Svakako, nova posamtranja bi bila od velike koristi, tako da je pisanje predloga za realizaciju

posmatranja (eng. *proposal*) važno za nastavljjanje analiza pokrenutih u ovom radu.

- Bilo bi veoma korisno da se realizuju optička spektroskopska posmatranja filamenta K1 i J1 i dalje diskutuje izostanak CX emisije u slučaju pomenutog regiona.

Literatura

- [1] Arnaud, K. A., 1996, *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, eds. Jacoby G. and Barnes J., p17, ASP Conf. Series, volume 101.
- [2] Arnaud, K., Gordon, C., Dorman, B., Rutkowski, K., 2023, *Xspec, An X-Ray Spectral Fitting Package, Users Guide for version 12.13.1*, HEASARC, Astrophysics Science Division, NASA/GSFC, Greenbelt, MD 20771
- [3] Arnaud, K., Smith, R., Siemiginowska, A., 2011, *Handbook of X-ray Astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge
- [4] Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., 1959, In R. N. Bracewell (Ed.), IAU Symposium, *URSI Symposium 1: Paris Symposium on Radio Astronomy*, Vol. 9, p. 323
- [5] Borkowski, K. J., Lyerly, W. J., Reynolds, S. P., 2001, *Astrophys. J.*, **548**, 820
- [6] Bratton, M., 2011, *The Complete Guide to the Herschel Objects*, Cambridge University Press, New York
- [7] Buchner, J., Boorman, P., 2023, *Statistical Aspects of X-ray Spectral Analysis*, arXiv:2309.05705 (Invited chapter for the edited book *Handbook of X-ray and Gamma-ray Astronomy*, Eds. A. Santangelo, C. Bambi, Springer)
- [8] Campana, R., 2022, *In-orbit background for X-ray detectors*, arXiv:2205.09359v1 (Invited chapter for the *Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics*, Eds. C. Bambi and A. Santangelo, Springer)
- [9] Carter, J. A., Sembay, S., 2008, *Astron. Astrophys.*, **489**, 837

- [10] Cash, W., 1979, *Astrophys. J.*, **228**, 939
- [11] Catalano, J., 2019, *Towards a new Analysis of the Super Star Cluster Westerlund 1*, Master's Thesis in Physics, Erlangen Centre for Astroparticle Physics, Physikalisches Institut I, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- [12] Costantini, E., Corrales, L., 2023, *Interstellar Absorption and Dust Scattering*, arXiv:2209.05261v1 (Invited chapter for the *Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics*, Eds. C. Bambi and A. Santangelo, Springer)
- [13] Cumbee, R. S., Henley, D. B., Stancil, P. C., Shelton, R. L., Nolte, J. L., Wu, Y., Schultz, D. R., 2014, *Astrophys. J.*, **787**, L31
- [14] De Luca, A., Molendi, S., 2004, *Astron. Astrophys.*, **419**, 837
- [15] Ducci, L., Malacaria, C., 2023, *Modeling and Simulating X-ray Spectra*, arXiv:2309.07577 (Invited chapter for the *Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics*, Eds. C. Bambi and A. Santangelo, Springer)
- [16] Fesen, R. A., Neustadt, J. M. M., Black, C. S., Milisavljevic, D., 2018, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **475**, 3996
- [17] Fesen, R. A., Weil, K. E., Cisneros, I., Blair, W. P., Raymond, J. C., 2018, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **481**, 1786
- [18] Fesen, R. A., Weil, K. E., Cisneros, I., Blair, W. P., Raymond, J. C., 2021, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **507**, 244
- [19] Fioretti, V., Bulgarelli, A., 2020, *How to Detect X-Rays and Gamma-Rays from Space: Optics and Detectors*, In *Tutorial Guide to X-ray and Gamma-ray Astronomy, Data Reduction and Analysis*, Edited by Cosimo Bambi, ISBN: 978-981-15-6336-2, Springer
- [20] Green D. A., 2022, *A Catalogue of Galactic Supernova Remnants (2022 December version)*, Cavendish Laboratory, Cambridge, United Kingdom (available at "<http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/>")
- [21] Gu, L., Kaastra, J., Raassen, A. J. J., 2016, *Astron. Astrophys.*, **588**, 52
- [22] Howell, S. B., 2006, *Handbook of CCD Astronomy*, Second edition, Cambridge University Press, Cambridge

-
- [23] Kaastra, J. S., 2017, *Astron. Astrophys.*, **605**, A51
- [24] Kaastra, J. S., Paerels, F. B. S., Durret, F., Schindler, S., Richter, P., 2008, *Space Science Reviews*, **134**, 155
- [25] Kahn, S. M., 2005, In M. Güdel, & R. Walter (Eds.), Saas-fee advanced course 30: *High-energy spectroscopic astrophysics* (pp. 3-81).
- [26] Katsuda, S., Tsunemi, H., Uchida, H., Miyata, E., Nemes, N., 2008, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **60**, S115
- [27] Katsuda, S., Tsunemi, H., Kimura, M., Mori, K., 2008, *Astrophys. J.*, **680**, 1198
- [28] Katsuda, S., Tsunemi, H., Mori K., et al., 2011, *Astrophys. J.*, **730**, 24
- [29] Kitchin, C. R., 2014, *Astrophysical Techniques*, Sixth edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton
- [30] Kosugi, H., Tsunemi, H., Katsuda, S., Uchida, H., Kimura, M., 2010, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **62**, 1035
- [31] Kuntz, K. D., Snowden, S. L., 2008, *Astron. Astrophys.*, **478**, 575
- [32] Lallement, R., 2004, *Astron. Astrophys.*, **422**, 391
- [33] Lequeux J., 2005, *The Interstellar Medium*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [34] Levenson, N. A., Graham J. R., Aschenbach, B., et al. 1997, *Astrophys. J.*, **484**, 304
- [35] Levenson, N. A., Graham, J. R., Hester, J. J., Petre, R., 1996, *Astrophys. J.*, **468**, 323
- [36] Levenson N. A., Graham J. R., Keller L. D., Richter M. J., 1998, *Astrophys. J. S.*, **118**, 541
- [37] Lider, V. V., 2022, *Instrum. Exp. Tech.*, **65**, 191
- [38] Locatelli, N., Ponti, G., Bianchi, S., *Astron. Astrophys.*, **659**, A118
- [39] Medina, A. A., Raymond, J. C., Edgar, R. J., Caldwell, N., Fesen, R. A., Milisavljevic, D., 2014, *Astrophys. J.*, **791**, 30
- [40] Mewe, R., Kaastra, J. S., Liedahl, D. A., 1995, *Legacy*, **6**, 16
- [41] McCray, R., Snow, T. P., Jr., 1979, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **17**, 213

- [42] McLean, I. S., 2008, *Electronic Imaging in Astronomy, Detectors and Instrumentation*, Second edition, CRC Press, Springer, Praxis Publishing Ltd, Chichester
- [43] Milanović, N. 2019, *Brzina udarnog talasa u neradijativnim i radijativnim filamentima ostatka supernove Petlja u Labudu*, Master rad, Univerzitet u Beogradu
- [44] Miyata, E., Katsuda, S., Tsunemi, H., Hughes, J. P., Kokubun, M., Porter, F. S., 2007, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **59**, 163
- [45] Miyata, E., Tsunemi, H., 1999, *Astrophys. J.*, **525**, 305
- [46] Miyata, E., Tsunemi, H., Pisarski, R., Kissel, S. E., 1994, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **46**, L101
- [47] Nemes, N., Tsunemi, H., Miyata, E., 2008, *Astrophys. J.*, **675**, 1293
- [48] Park, T., Kashyap, V. L., Siemiginowska, A., van Dyk, D. A., Zezas, A., Heinke, C., Wargelin, B. J., 2006, *Astrophys. J.*, **652**, 610
- [49] Patnaude, D. J., Fesen, R. A., Raymond, J. C., Levenson, N. A., Graham, J. R., Wallace, D. J., 2002, *Astron. J.*, **124**, 2118
- [50] Raymond, J. C., Ghavamian, P., Bohdan, A., et al., 2023, *Astrophys. J.*, **949**, 50
- [51] Raymond, J. C., Smith, B. W., 1977, *Astrophys. J. S.*, **35**, 419
- [52] Read, A. M., Rosen, S. R., Saxton, R. D., Ramirez, J., 2011, *Astron. Astrophys.*, **534**, 34
- [53] Rengelink, R. B., Tang, Y., de Bruyn, A. G., Miley, G. K., Bremer, M. N., Roettgering, H. J. A., Bremer, M. A. R., 1997, *Astron. Astrophys. Supplement Series*, **124**, 259
- [54] Roberts, S. R., Wang, Q. D., 2015, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **449**, 1340
- [55] Rybicki G B., Lightman, A. P., 1979, *Radiation proceses in astrophysics*, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [56] Salvesen, G., Raymond, J. C., Edgar, R. J., 2009, *Astrophys. J.*, **702**, 327

-
- [57] Schartel, N., González-Riestra, R., Kretschmar, P., Kirsch, M., Rodríguez-Pascual, P., Rosen, S., Santos-Lleó, M., Smith, M., Stuhlinger, M., Verdugo-Rodrigo, E., 2022, *XMM-Newton*, arXiv:2212.10995v1 (Invited chapter for the *Handbook of X-ray and Gamma-ray Astrophysics*, Eds. C. Bambi and A. Santangelo, Springer)
- [58] Shimoda, J., Inoue, T., Ohira, Y., Yamazaki, R., Bamba, A., Vink, J., 2015, *Astrophys. J.*, **803**, 98
- [59] Smith, R. K., Brickhouse, N. S., Liedahl, D. A., Raymond, J. C., 2001, *Astrophys. J.*, **556**, L91
- [60] Snowden, S. L., Kuntz, K. D., 2023, *Cookbook for analysis procedures for XMM-Newton EPIC observations of extended objects and the diffuse background*, Version 21.0
- [61] Sankrit, R., Williams, B. J., Borkowski, K. J., Gaetz, T. J., Raymond, J. C., Blair, W. P., et al., 2010, *Astrophys. J.*, **712**, 1092
- [62] Trümper, J. E., Hasinger, G., 2008, *The Universe in X-Rays*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg
- [63] Tsunemi, H., Katsuda, S., Nemes, N., Miller, E. D., 2007, *Astrophys. J.*, **671**, 1717
- [64] Uchida, H., Katsuda, S., Tsunemi, H., Mori, K., Gu, L., Cumbee, R. S., Petre, R., Tanaka, T., 2019, *Astrophys. J.*, **871**, 234
- [65] Uchida, H., Tsunemi, H., Katsuda, S., Kimura, M., 2008, *Astrophys. J.*, **688**, 1102
- [66] Uchida, H., Tsunemi, H., Katsuda, S., Kimura, M., Kosugi, H., Takahashi, H., 2009, *Astrophys. J.*, **705**, 1152
- [67] Urošević, D., Arbutina, A., Onić, D., 2019, *Astrophys. Space Sci.*, **364**, 185
- [68] Vink, J., 2020, *Physics and Evolution of Supernova Remnants*, Springer Nature Switzerland AG, Cham
- [69] Vučetić, M., Milanović, N., Urošević, D., Raymond, J., Onić, D., Milošević, S., Petrov, N., 2023, *Serb. Astron. J.*, **207**, 9
- [70] Wall, J. V., Jenkins, C. R., 2012, *Practical Statistics for Astronomers*, Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge

- [71] Wilms, J., Allen, A., McCray, R., 2000, *Astrophys. J.*, **542**, 914