

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Barbara Šiljeg

ISTRAŽIVANJE MEĐUZVJEZDANE TVARI
POMOĆU BLJESKOVA GAMA-ZRAKA

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER ISTRAŽIVAČKI

Barbara Šiljeg

Diplomski rad

**Istraživanje međuzvezdane tvari
pomoću bljeskova gama-zraka**

Voditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Željka Marija Bošnjak

Suvoditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Vibor Jelić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2021.

Zahvaljujem prvo svojoj obitelji i prijateljima čija mi je podrška bila od ogromne pomoći prilikom završavanja studija.

Također zahvaljujem svojim mentorima Viboru Jeliću i Željki Bošnjak koji su sa strpljenjem odgovarali na sva moja pitanja te mi uvelike pomogli prilikom izrade ovog rada.

Za kraj se zahvaljujem i Andrei Braccu, Petri Maruševac, Andrei Tiengu, Fabiu Pintoreu te i ostalim članovima Laboratorija za Astročestičnu fiziku i Astrofiziku instituta Ruđer Bošković koji su mi priskočili u pomoć svaki put kada je to bilo potrebno produbljujući moje znanje unutar i izvan sadržaja ovog rada.

Sažetak

U ovom se radu istražuje konzistentnost metode mjerenja udaljenosti do oblaka međuzvezdane prašine pomoću prstenova X-zračenja koji se formiraju oko bljeskova gama-zračenja raspršenjem na prašini u Mliječnom putu s drugim nezavisnim mjerenjima. Trenutno postoji šest bljeskova gama-zračenja kojima su se precizno odredile udaljenosti za jedan ili više oblaka prašine na njihovim doglednicama. Ove su se udaljenosti usporedile s predviđanjima 3D raspodjela prašine dobivenih promatranjem ekstinkcije velikog broja zvijezda u našoj okolini: Lallement et al. (2019) i Leike et al. (2020). Zaključilo se da su ove metode mjerenja udaljenosti međusobno konzistentne zbog čega su se pokušali predvidjeti novi prstenovi X-zračenja oko nekoliko selektiranih bljeskova gama-zračenja koristeći navedene 3D raspodjele prašine.

Za bljesak gama-zračenja GRB 140206A navedene raspodjele predviđaju oblak prašine na udaljenosti od otprilike 300 pc. Provođenjem analize podataka X-zračenja satelita Swift, opazio se slab signal mogućeg prstena kojim se odredila udaljenost do prašine od 320 pc s relativnom pogreškom od 3.1%. Sam signal nije vrlo značajan s obzirom na pozadinu zbog čega možemo zaključiti da je detektirani prsten, u najboljem slučaju, slabo vidljiv.

Za dodatnu analizu prašine na doglednici ovog bljeska uzeli su se podaci sinkrotronskog zračenja radioteleskopa LOFAR te infracrveno emisijsko zračenje prašine teleskopa Planck. Pronađeno dobro slaganje orijentacije depolariziranih kanala sinkrotronskog zračenja s orijentacijom magnetskog polja dobivenom teleskopom Planck daje nam indiciju da detektirane emisije dolaze vjerojatno iz istog oblaka međuzvezdane tvari te da je udaljenost ovog oblaka $\lesssim 500$ pc što se slaže s prijašnjim rezultatima.

Konzistentnost 3D raspodjela ekstinkcije s mjerenjima udaljenosti pomoću bljeskova gama-zračenja nam omogućava nov način predviđanja potencijalne detekcije prstenova X-zračenja koje se može koristiti za unaprijeđenje selekcije novih bljeskova.

Ključne riječi: Bljesak gama-zračenja, međuzvezdana prašina, multifrekvencijska analiza međuzvezdane tvari

Probing the interstellar medium with gamma-ray bursts

Abstract

This work explores the consistency of measurements of interstellar dust distances using time evolving X-ray halos that form around gamma-ray bursts with other independent measuring techniques. Until now, there has been six gamma-ray bursts which have provided us with the measurements of the distances to dust clouds in their lines of sight. We decided to test these distances using two 3D extinction maps: Lallement et al. (2019) and Leike et al. (2020). Results show very good correlation of the measured distances from the bursts with the differential extinction distributions from these maps. Because of this, we have decided to also analyse such distributions along the lines of sights for a few more selected gamma-ray burst candidates.

We have found that both extinction maps predict a layer of dust at a distance of around 300 pc along the line of sight for GRB 140206A. In light of this, we have also analysed the X-ray data from Swift satellite in order to find the appropriate halo. We have found a faint signal of the halo which provided us with the distance of 320 pc with 3.1% uncertainty. The signal itself was not very significant with respect to the background, so we can conclude that at best, the halo is very faint.

To further analyse the dust along this line of sight, we have also used the synchrotron emission data from the radiotelescope LOFAR and the infrared emission of dust from the Planck telescope. We found good correlation between the orientations of depolarized canals in synchrotron data and the magnetic field lines from dust emission polarization. This result indicates that these two different emissions are probably coming from the same cloud of interstellar media and that this cloud is located at distances $\lesssim 500$ pc which is in good agreement with our previous results.

The found consistency of the measurements of dust distances using gamma-ray bursts with the 3D extinction maps makes it possible for us to predict the potential detection of the X-ray halo formation. This information can help us to further improve our current selection of new gamma-ray burst candidates.

Keywords: Gamma-ray burst, interstellar dust, multi-frequency analysis of interstellar medium

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Međuzvezdana prašina	2
1.1.1	Međudjelovanje elektromagnetskog zračenja sa zrcima prašine	2
1.1.2	Model raspršenja X-zračenja na prašini	4
1.2	Bljeskovi gama-zračenja	6
1.2.1	Udaljenosti opaženih bljeskova gama-zračenja	7
1.2.2	Vremenska i spektralna svojstva bljeskova gama-zračenja	7
1.2.3	Nastanak bljeskova gama-zračenja	12
1.3	Raspršenje X-zračenja iz bljeskova gama-zračenja na prašini u Mliječnom putu	12
1.4	Dosadašnja mjerenja udaljenosti uz pomoć opažanja prstenova X-zračenja	14
1.5	Motivacija	15
2	Podaci	17
2.1	Podaci X-zračenja satelita Swift	17
2.2	3D raspodjele ekstinkcije	19
2.3	Ostali podaci	23
2.3.1	Podaci radioteleskopa LOFAR	23
2.3.2	Podaci Planck satelita	24
3	Usporedba metoda mjerenja udaljenosti do oblaka prašine	25
3.1	Usporedba dosadašnjih mjerenja	25
3.2	Predviđanja 3D raspodjela ekstinkcije	32
4	GRB 140206A	36
4.1	Metoda detekcije prstena	36
4.2	Rezultati detekcije prstena oko bljeska gama-zračenja GRB 140206A	39
4.3	Okolina položaja bljeska gama-zračenja GRB 140206A iz podataka LOFAR i Planck teleskopa	42
5	Zaključak	45
	Literatura	47

1 Uvod

Istraživanja međuzvjezdane tvari ključna su za razumijevanje brojnih pojava u svemiru, od nastanka zvijezda pa do raspodjele tamne tvari u galaksijama. Zvijezde nastaju upravo u najgušćim područjima međuzvjezdane tvari, no također ju i obogaćuju tijekom svoga života kroz procese povezane sa zvjezdanim vjetrovima i eksplozijama zvijezda, tzv. supernovama. Ova izmjena materije između zvijezda i međuzvjezdane tvari nam daje informaciju o brzini kojom galaksija troši materiju te stoga i o duljini trajanja aktivnog nastajanja zvijezda u galaksiji. Iako međuzvjezdane tvari ima u većini galaksija, najpristupačniji način proučavanja njenih svojstava je kroz promatranja iste unutar naše galaksije, Mliječnog puta.

Međuzvjezdana se tvar sastoji od ioniziranog, atomskog i molekularnog plina, prašine i kozmičkih zraka. Prašina po masenoj gustoći zauzima 1% ukupne međuzvjezdane tvari, dok ostatak zauzima plin (brojevno 91% vodika, 8.9% helija te 0.1% težih elemenata) u raznim fazama. Faze plina dijelimo s obzirom na temperaturu i gustoću kao što je prikazano u tablici 1.1. Za njihovo istraživanje koristimo promatranja duž cijelog elektromagnetskog spektra, ovisno o tome koja nas faza zanima, odnosno koje fizikalne procese želimo proučavati. Ovaj rad se bavi proučavanjem prašine u Mliječnom putu pomoću ekstragalaktičkih bljeskova gama-zračenja (engl. *gamma-ray bursts*; *GRBs*). Bljeskovi gama-zračenja nam omogućuju vrlo precizno mjerenje udaljenosti do galaktičkih struktura na kojima se X-zračenje iz samih bljeskova raspršuje na zrcima prašine.

Faza	T [K]	n [cm ⁻³]
Vruća ionizirana materija (<i>hot ionized medium</i> ; <i>HIM</i>)	$\sim 10^6$	$\sim 10^{-2}$
Topla ionizirana materija (<i>warm ionized medium</i> ; <i>WIM</i>)	$\sim 5 \cdot 10^3$	~ 0.5
Topla neutralna materija (<i>warm neutral medium</i> ; <i>WNM</i>)	$\sim 5 \cdot 10^3$	$\sim 0.5 - 2$
Hladna neutralna materija (<i>cold neutral medium</i> ; <i>CNM</i>)	$\sim 10^2$	$\sim 10^2$
Molekularni oblaci (<i>molecular clouds</i>)	~ 10	$\sim 10^3$

Tablica 1.1: Faze međuzvjezdane tvari s obzirom na temperaturu i gustoću. U zagradama se nalaze engleski izrazi i pripadne često korištene kratice. [Više informacija o fazama se može naći u knjizi Brucea T. Drainea (2011) [1].]

1.1 Međuzvezdana prašina

Zrnca prašine većinom nastaju u gustim hladnijim slojevima u zvijezdama kao što su atmosfere crvenih divova. Iste bivaju izbačene u međuzvezdani prostor tlakom zračenja, zvjezdanim vjetrovima ili u eksplozivnim pojavama. Po kemijskom sastavu, smatra se da se zrnca u početku sastoje od ugljika ili silikata na koje se kasnije mogu akumulirati drugi visoko zastupljeni elementi u svemiru kao što su vodik, kisik, ugljik i dušik. Akumulirani elementi čine dodatni sloj kristala leda, metana, ugljikovog monoksida i amonijaka, na kojem se kasnije u međudjelovanju s ultraljubičastim zračenjem formira još jedan dodatan sloj raznih molekula i jednostavnih organskih spojeva [2]. Konačne veličine ovih zrnaca imaju raznolik radijus od 5 pa do 250 nanometara [Draine, 2011 [1]].

Ovisno o zastupljenoj veličini zrnaca, oblaci prašine apsorbiraju i raspršuju elektromagnetsko zračenje s time da je proces izraženiji za veće energije zračenja. Apsorbiranu energiju zrnca emitiraju u infracrvenom dijelu elektromagnetskog spektra što se koristi kao jedna od metoda detekcije prašine u Mliječnom putu. U idućim će se podpoglavljima detaljnije proučiti međudjelovanje zrnaca prašine s elektromagnetskim zračenjem, te posebno sa X-zračenjem.

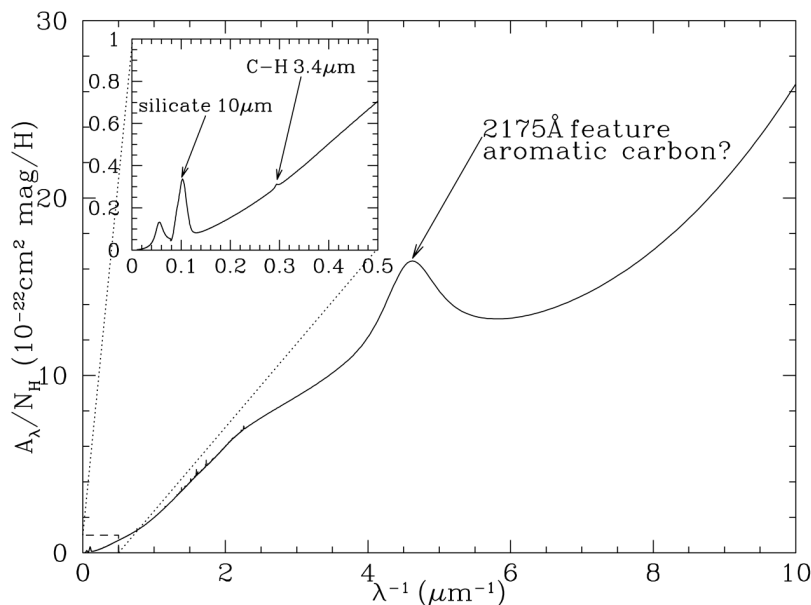
1.1.1 Međudjelovanje elektromagnetskog zračenja sa zrcima prašine

Prolaskom elektromagnetskog zračenja kroz oblak prašine, ono može međudjelovati sa samim zrcima na način da bude apsorbirano ili raspršeno. Promatramo li svjetlost nekog objekta na čijoj se doglednici nalazi prašina, smanjenje sjaja objekta će biti direktna posljedica apsorpcije i raspršenja zračenja na zrcima prašine što se jednom riječju naziva ekstinkcijom. Za svako od ovih međudjelovanja računa se udarni presjek čiji će zbroj na kraju dati udarni presjek ekstinkcije, odnosno vrijedi [Draine, 2011 [1]]:

$$\sigma_{\text{ekst}} = \sigma_{\text{aps}} + \sigma_{\text{ras}} . \quad (1.1)$$

S druge strane, ekstinkcija se u opažanjima mjeri u magnitudama po sljedećoj definiciji:

$$\frac{A_{\lambda}}{\text{mag}} = 2.5 \log_{10} \frac{F_{\lambda}^0}{F_{\lambda}} \quad (1.2)$$



Slika 1.1: Primjer ovisnosti ekstinkcije o inverzu valne duljine svjetlosti za tipični smjer promatranja u lokalnoj međuzvjezdanoj tvari. [Izvor: Draine, 2011 [1]]

gdje je F_λ mjereni tok zračenja s nekog objekta, a F_λ^0 tok zračenja koji bi bio opažen kada ne bi bilo prašine na doglednici. Ovisnost ekstinkcije o valnoj duljini (odnosno energiji) svjetlosti prikazana je na slici 1.1 gdje se jasno vide apsorpcijski efekti silikata i ugljika. Vidimo da ekstinkcija raste zajedno s energijom zračenja zbog čega se i objekti u vidljivom području elektromagnetskog spektra na čijoj se doglednici nalazi oblak prašine čine crveniji (engl. *interstellar reddening*, oznaka: $E(B - V)$). Jakost ekstinkcije na doglednici do nekog objekta (najčešće zvijezde) se određuje uspoređujući spektralna svojstva danog objekta s drugim sličnim objektima na čijoj se doglednici nalazi manje prašine. Treba napomenuti da je doprinos prašine u ekstinkciji dominantan na energijama manjim od 13.6 eV nakon čega vodik iz međuzvjezdane tvari počinje apsorbirati zračenje.

Osim ukupne ekstinkcije na doglednici, u ovom će nam radu biti potrebna i diferencijalna ekstinkcija. Diferencijalna ekstinkcija ili gustoća ekstinkcije (engl. *differential extinction or extinction density*) u nekoj točki P predstavlja količinu ekstinkcije u jedinici udaljenosti kojoj je svjetlost podvrgnuta prolazeći kroz okolinu točke P. Odnosno vrijedi:

$$A_\lambda = \int_0^d \frac{dA_\lambda}{dr} dr \quad (1.3)$$

gdje je $\frac{dA_\lambda}{dr}$ diferencijalna ekstinkcija, a pripadna se integracija provodi duž doglednice odabranog izvora.

U nastavku ćemo detaljnije pogledati raspršenje zračenja na zrnima prašine jer će nam ono biti potrebno za jednu od metoda mjerenja udaljenosti oblaka prašine u Mliječnom putu.

Raspršenje zračenja na prašini ovisi o geometriji i optičkim svojstvima prašine te o valnoj duljini svjetlosti. Konkretni parametri koji utječu na prirodu raspršenja su kompleksni indeks loma i parametar veličine.

Kompleksni je indeks loma definiran kao [Dresselhaus, 1999 [3]]:

$$\bar{n} = n + i\kappa \quad (1.4)$$

gdje je n indeks loma, a κ koeficijent ekstinkcije (engl. *extinction coefficient*). Koeficijent ekstinkcije opisuje količinu gušenja elektromagnetskih valova prolaskom kroz materijal zbog čega zrnca s visokom vrijednošću ovog koeficijenta smatramo dobrim apsorberima (npr. metalna zrnca). S druge strane, zrnca s visokom vrijednošću indeksa loma smatramo dobrim raspršivačima (npr. dielektrična zrnca).

Parametar koji uzima u obzir geometriju zrnaca te valnu duljinu svjetlosti je definiran s [Draine, 2011 [1]]:

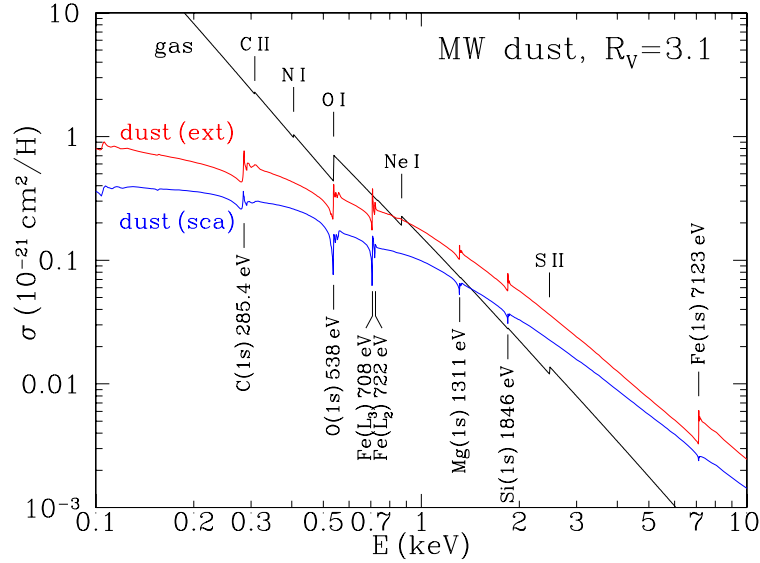
$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} \quad (1.5)$$

gdje je a radijus (sfernog) zrnca, a λ valna duljina svjetlosti. Ovisno o iznosu ovog parametra imamo nekoliko režima raspršenja: Rayleigh raspršenje ($x \ll 1$) kada je zrnca puno manje od valne duljine svjetlosti, Mie raspršenje ($x \simeq 1$) kada su veličina zrnca i valna duljina usporedive veličine te geometrijsko raspršenje ($x \gg 1$) kada je zrnca puno veće od valne duljine svjetlosti.

1.1.2 Model raspršenja X-zračenja na prašini

Trenutno najzastupljeniji model međuzvezdane prašine je takozvani WD01 model [Weingartner & Draine, 2001 [4]] koji aproksimira zrnca kao homogene kuglice te uzima u obzir njihove dvije populacije: ugljična i silikatna zrnca. Ovaj je model konzistentan s brojnim opažanjima kao što su mjerenja ovisnosti ekstinkcije o valnoj duljini, opaženo infracrveno zračenje zrnaca [Li & Draine, 2001 [5], 2002 [6]], raspršenje vidljive i ultraljubičaste svjetlosti [Draine, 2003 [7]] te raspršenje X-zračenja [Draine & Tan, 2003 [8]].

Raspršenje X-zračenja teorijski je opisano u radu Draine (2003) [9] na čemu mi



Slika 1.2: Udarne presjek po jezgri vodika za raspršenje (plavo) i ekstinkciju (crveno) X-zračenja na prašini te za apsorpciju (crno) X-zračenja na plinu (glavnom vodik i helij) energija 0.1 - 10 keV. [Izvor: Draine, 2003 [9]]

baziramo naše razmatranje. Na slici 1.2 se mogu vidjeti dobiveni udarne presjeci za raspršenje i ekstinkciju X-zračenja na prašini te za apsorpciju X-zračenja na plinu (uglavnom vodik i helij) energija 0.1 - 10 keV. Za energije između 13.6 - 250 eV vidimo da je apsorpcija plina visoka te je stoga teško opaziti apsorpciju i raspršenje na prašini. No za energije iznad 250 eV se i raspršenje i ekstinkcija na prašini može proučavati za dovoljno visoku stupčastu gustoću (engl. *column density*) prašine na doglednici. Za energije veće od otprilike 800 eV vidimo da u ekstinkciji dominira prašina. Za sam se diferencijalni udarne presjek ispostavilo da je dobro opisan aproksimativnim izrazom:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \frac{\sigma_{ras}}{\pi\theta_{r,50}^2} \frac{1}{[1 + (\theta/\theta_{r,50})^2]^2} \quad (1.6)$$

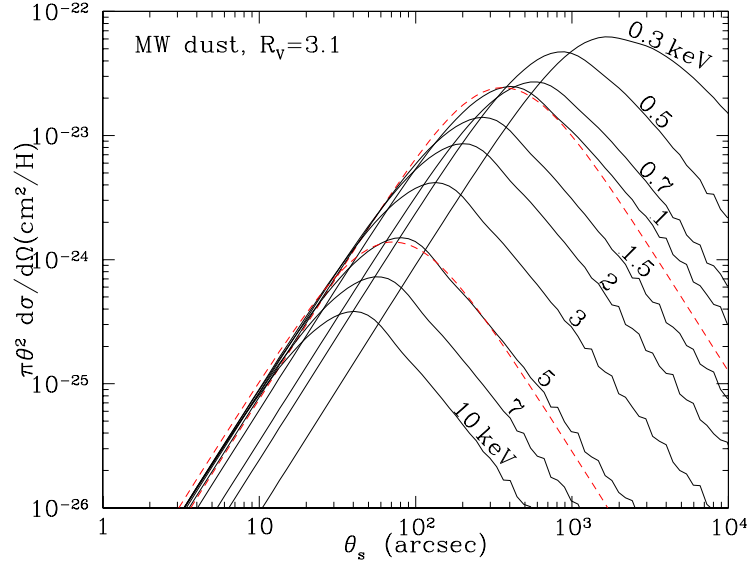
dok je ukupni udarne presjek za kuteve manje od θ dan s:

$$\sigma_{ras}(<\theta) = \sigma_{ras} \frac{(\theta/\theta_{r,50})^2}{1 + (\theta/\theta_{r,50})^2} \cdot \quad (1.7)$$

$\theta_{r,50}$ iz gornjih jednadžbi predstavlja medijan kuta raspršenja koji se u sklopu danog modela dobro aproksimira izrazom:

$$\theta_{r,50} \approx 360'' \left(\frac{\text{keV}}{E} \right). \quad (1.8)$$

Gornja jednadžba odgovara medijanu kuta raspršenja za radijus zrnaca od otprilike



Slika 1.3: Ovisnost veličine $\pi\theta^2 \frac{d\sigma}{d\Omega}$ o kutu raspršenja za nekoliko energija. Funkcija dostiže maksimum aproksimativno za medijan kuta raspršenja. Crvene crtkane linije prikazuju ovisnost $\sigma_{ras}(< \theta)$ o kutu raspršenja dobivene jednačbom 1.7 za energije 1 i 5 keV. [Izvor: Draine, 2003 [9]]

0.19 μm što je konzistentno s veličinom zrnaca koja imaju dominantan utjecaj u ekstinkciji vidljivog dijela spektra te polarizaciji svjetlosti zvijezda. Ova veličina zrnaca također sadrži većinu mase međuzvjezdane prašine te se očekuje da dominira i u raspršenju X-zračenja.

Što se tiče samog broja raspršenih fotona X-zračenja, korisno je promotriti sljedeću veličinu:

$$\frac{d\sigma_{ras}}{d \ln \Omega} = \Omega \frac{d\sigma}{d\Omega} = 2\pi(1 - \cos \theta) \frac{d\sigma}{d\Omega} \approx \pi\theta^2 \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (1.9)$$

koja je direktno proporcionalna broju raspršenih fotona po logaritamskom intervalu kuta raspršenja. Na slici 1.3 može se vidjeti graf ovisnosti ove veličine o kutu raspršenja za nekoliko energija u intervalu 0.3 - 10 keV. Vidimo da porastom energije broj raspršenih fotona brzo opada zbog čega očekujemo da će postojati i gornja granica energija za koje se raspršeni fotoni mogu detektirati.

1.2 Bljeskovi gama-zračenja

Ekstragalaktički bljeskovi gama-zračenja (engl. *gamma-ray burst*; *GRB*) su kratkotrajni visokoenergetski bljeskovi elektromagnetskog zračenja iz ekstragalaktičkih izvora. Najenergičnije zračenje ikad opaženo dolazi upravo iz ovakvih bljeskova te ukupna izračena energija u ovim pojavama iznosi $10^{50} - 10^{54}$ erg. Za detekciju blje-

skova gama-zračenja koristi se nekoliko teleskopa kao što su: Fermi [10], Swift [11], INTEGRAL [12], Konus [13] te Magic [14] i HESS [15] teleskopi za visoke energije (do reda veličine TeV). Bljesak se gama-zračenja može razložiti na dva dijela: prvotno promptno zračenje (engl. *prompt emission*) i naknadno zračenje (engl. *afterglow*). U promptnom se zračenju oslobodi većina energije bljeska u obliku gama-zračenja (10 - 1000 keV) u trajanju od $\sim 0.1 - 1000$ s. S druge strane, naknadno se zračenje detektira duž cijelog elektromagnetskog spektra (u X-, ultraljubičastom, vidljivom, infracrvenom, mikrovalnom i radiopodručju) i to danima (ponekad i mjesecima) nakon samog bljeska. Svi su dosadašnji bljeskovi nastali izvan Mliječnog puta, no smatra se da i unutar naše galaksije postoje kandidati koji bi u budućnosti mogli uzrokovati isti.

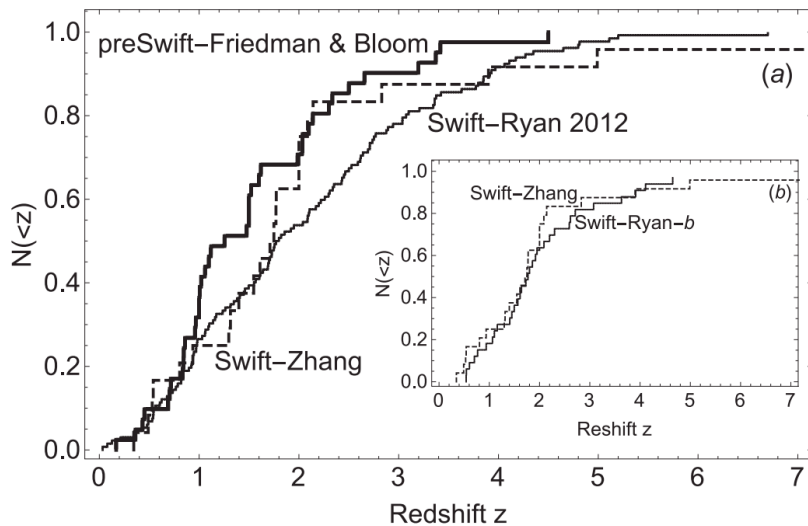
1.2.1 Udaljenosti opaženih bljeskova gama-zračenja

Prva se detekcija ovakvog bljeska dogodila u kasnim 60-im godinama prošlog stoljeća pomoću Vela satelita koji su lansirani u svrhu praćenja testiranja nuklearnog oružja u svemiru [Klebesadel et al, 1973 [16]]. Ubrzo nakon otkrića, lansirani su novi sateliti upravo u svrhu promatranja ovih pojava koje se od tada do danas nisu uspjele u potpunosti objasniti. U početku nije bilo jasno događaju li se ove pojave unutar naše galaksije ili izvan nje, no stvaranjem dovoljnog uzorka bljeskova, postala je jasna njihova izotropna raspodjela na nebu. Ovaj je rezultat upućivao na ekstragalaktičke izvore, no prvo se direktno mjerenje crvenog pomaka dogodilo tek 1997. godine kada je satelit BeppoSAX [17] odredio pozicije bljeskova sa vrlo visokom točnošću ($\leq 4'$), što je omogućilo početak opažanja ovih događaja i na dužim valnim duljinama. Prvo se takvo mjerenje crvenog pomaka odredilo promatranjem apsorpcijskih linija u optičkom dijelu spektra za bljesak GRB 970508 te je iznosilo $z = 0.835$ [Metzger et al, 1997 [18]].

Najnovija raspodjela crvenih pomaka bljeskova gama-zračenja detektiranih do 2017. godine može se vidjeti na slici 1.4.

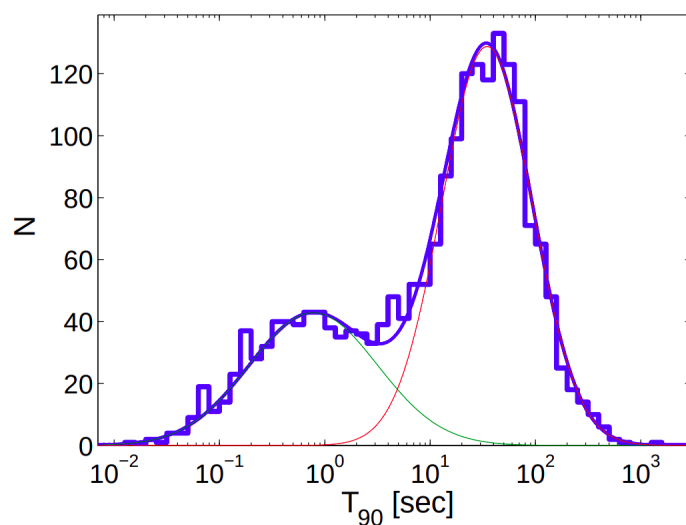
1.2.2 Vremenska i spektralna svojstva bljeskova gama-zračenja

Bljeskove gama-zračenja dijelimo na kratkotrajne i dugotrajne. Duljina bljeskova (T_{90}) je definirana kao vrijeme u kojem je detektirano između 5 i 95 posto ukupno



Slika 1.4: Kumulativne distribucije crvenih pomaka za nekoliko različitih uzoraka bljeskova gama-zračenja. [Izvor: Le & Mehta, 2017 [19]]

detektiranih fotona u energetsom intervalu 20 - 2000 keV [Nakar, 2007 [21]]. Svjetlosne krivulje bljeskova su varijabilne na vrlo kratkim vremenskim intervalima (do ~ 25 ms) [Bhat, 2013 [22]] što postavlja bitno ograničenje na teorijske modele koji opisuju emisiju ovih bljeskova. Iako su zbog spomenute varijabilnosti svjetlosne krivulje drugačije za svaki bljesak, iz histograma duljine trajanja bljeskova se mogu primijetiti dvije nezavisne distribucije kao što je prikazano na slici 1.5. Srednja vrijednost trajanja kratkotrajnih bljeskova je otprilike 0.8 s, dok je ista za dugotrajne bljeskove otprilike 30 s. Minimum distribucije se nalazi na oko 2 s te se obično uzima

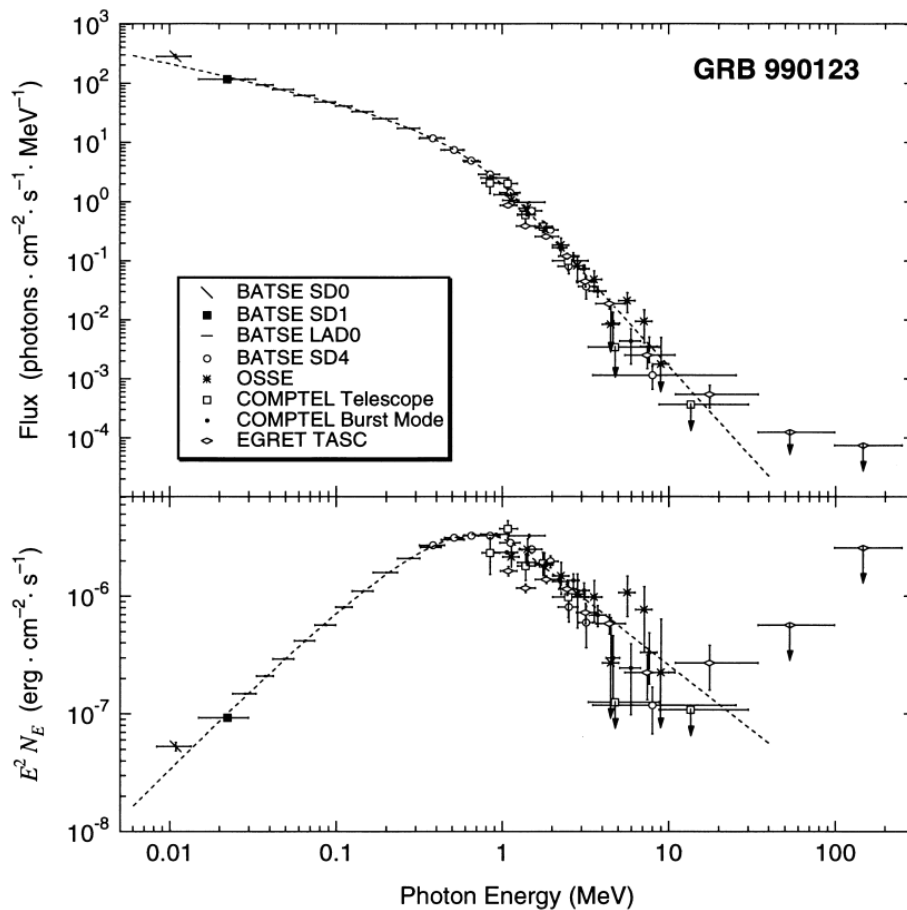


Slika 1.5: Histogram duljine trajanja bljeskova gama-zračenja. Plavi stepenasti histogram predstavlja 2041 bljesak gama-zračenja, crvena i zelena linija predstavljaju lognormalne distribucije dvaju populacija bljeskova [Horváth, 2002 [20]] te je njihov zbroj prikazan kontinuiranom plavom linijom. [Izvor: Nakar, 2007 [21]]

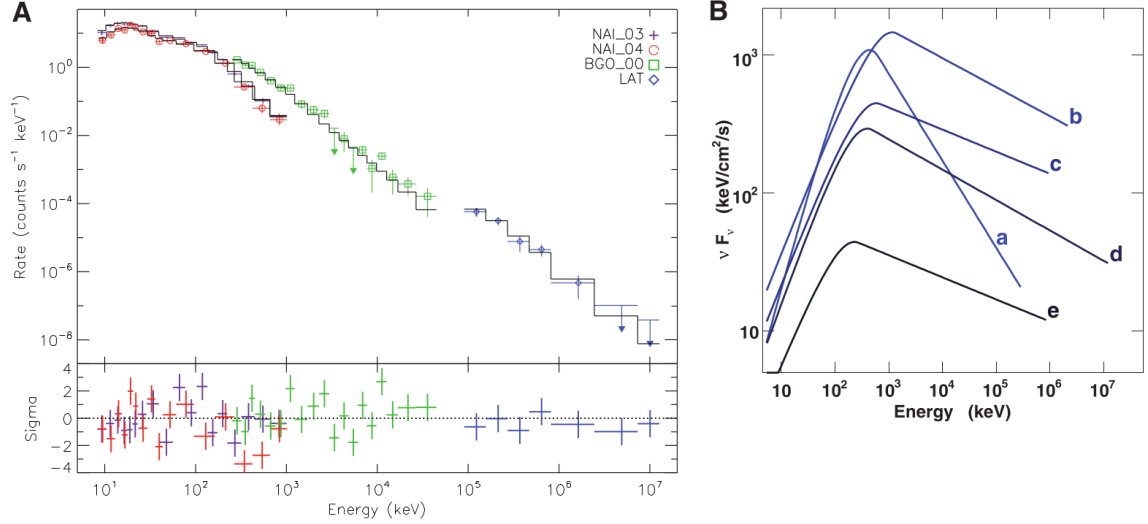
kao približna granica između ove dvije populacije. Ovakav je izbor dovoljno dobar za provođenje statističke analize populacija, no treba imati na umu da je nezanemariv broj kratkotrajnih bljeskova duži od 2 s i obratno.

Spektri bljeskova gama-zračenja su netermički te najvjerojatnije potječu od sinkrotronskog zračenja relativističkih elektrona akceleriranih prilikom disipacije energije u relativističkom mlazu. Primjer spektra se može vidjeti na slici 1.6. Spektri se često računaju preko cijelog trajanja bljeska te se nazivaju vremenski integriranim spektrima bljeskova gama zračenja [Kumar & Zhang, 2015 [23]]. No budući da je opažena snažna evolucija u spektrima nekih bljeskova, za razumijevanje fizičke pozadine ovih bljeskova potrebno je promatrati i vremenski razlučene spektre bljeskova.

Tipični se spektar bljeska gama-zračenja može opisati empirijskom Bandovom



Slika 1.6: Spektar bljeska gama-zračenja GRB 990123. [Izvor: Briggs et al., 1999 [24]]



Slika 1.7: Spektar bljeska gama-zračenja GRB 080916C.

(A) Spektralni histogram za jedan vremenski interval označen sa b na slici B.

(B) Model spektra za 5 vremenskih intervala označenih na slici 1.8.

[Izvor: Abdo et al., 2009 [26].]

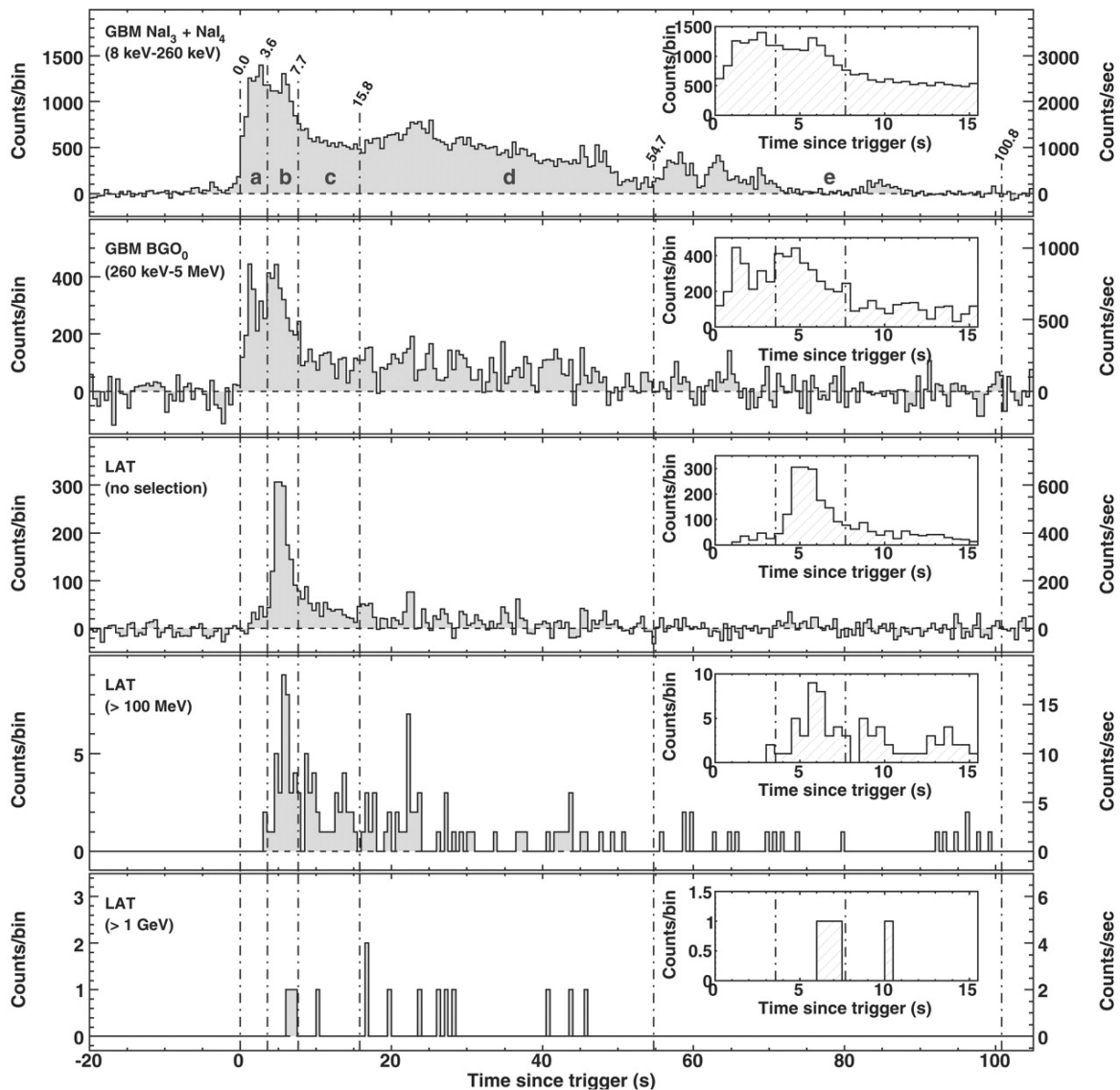
funkcijom [Band et al., 1993 [25]]:

$$N(E) = \begin{cases} A \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\alpha e^{-E/E_0} & \text{za } E < (\alpha - \beta)E_0, \\ A \left(\frac{(\alpha - \beta)E_0}{100 \text{ keV}} \right)^{\alpha - \beta} e^{\beta - \alpha} \left(\frac{E}{100 \text{ keV}} \right)^\beta & \text{za } E \geq (\alpha - \beta)E_0, \end{cases} \quad (1.10)$$

gdje je $N(E)dE$ broj fotona s energijom unutar intervala dE , a α i β su spektralni indeksi ispod i iznad energije prijeloma E_0 (engl. *break energy*) te su oba negativna. U visokoenergetskoj astrofizici se često računa $\nu F_\nu = E^2 N(E)$, odnosno spektralna distribucija energije (eng. *spectral energy distribution*). Maksimum $E^2 N(E)$ spektra se obično naziva vrh distribucije energije te se označava s E_{peak} . Tipične vrijednosti spektralnih parametara su: $\alpha \in [-0.5, -1.5]$, $\beta \simeq -2.25$ i $E_{\text{peak}} \in [50, 1500]$ keV.

Opaženi su i bljeskovi čiji spektar sadrži visokoenergetske gama fotone s energijama do 1 GeV, te u nekim slučajevima čak i do reda veličine 1 TeV. Primjer visokoenergetskog bljeska je GRB 080916C čiji se spektar nalazi na slici 1.7, a svjetlosne krivulje na slici 1.8.

Analizom se ovakvih spektara ograničavaju teorijski modeli koji opisuju nastanak ovih pojava. Trenutni model nastanka ove količine visokoenergetskih fotona predviđa sinkrotronsko zračenje relativističkih elektrona ubrzanih u procesu disipacije energije relativističkog mlaza. Postoji nekoliko modela za opis mehanizma disipacije energije, kao što su model internih udara (engl. *internal shock model*) ili



Slika 1.8: Svjetlosne krivulje bljeska gama zračenja GRB 080916C za nekoliko intervala energija. Vertikalnim linijama su prikazane odabrane granice vremenskih intervala koji se koriste za prikaz razvoja spektra u vremenu. [Izvor: Abdo et al., 2009 [26]]

model magnetske rekonekcije (engl. *magnetic reconnection*) [pogledati npr. Kumar & Zhang, 2015 [23]]. Fotoni sinkrotronskog zračenja mogu biti raspršeni i u inverznom Comptonovom procesu koji je izuzetno važan prilikom interpretacije najnovijih opažanja u GeV - TeV području energija. Trenutno najpopularniji model za opis naknadnog zračenja je model vanjskog udara (engl. *external shock model*). U ovom se modelu pretpostavlja da se relativistički mlaz na udaljenostima od $\sim 10^{15}$ m sudara s materijom koja okružuje centar eksplozije prilikom čega dolazi do disipacije energije. Budući da je preostala energija puno manja, naknadno se zračenje opaža na nižim frekvencijama od promptnog.

1.2.3 Nastanak bljeskova gama-zračenja

Vodeći modeli za fizikalni opis izvora nastanka bljeskova gama-zračenja ovise o dvije populacije bljeskova kao što je ranije spomenuto. Smatra se da kratkotrajni bljeskovi nastaju spajanjem dvaju neutronske zvijezde prilikom čega nastaje akrecijski disk materije te mlazovi materije i zračenja (u smjeru početne osi rotacije zvijezda) koje detektiramo kao kratkotrajne bljeskove. Primjer nekoliko nezavisnih detekcija spajanja dvaju neutronske zvijezde je bljesak gama zračenja GRB 170817A koji se još opazio i u vidljivom području te i kao gravitacijski val GW 170817 [Lamb, 2018 [27]].

Za dugotrajne se bljeskove gama zračenja vjeruje da potječu od supernova nastalih kolapsom masivne rotirajuće zvijezde (obično supernove tipa Ib/c). U ovom se scenariju također prilikom eksplozije formiraju akrecijski disk i pripadni mlazovi materije i zračenja koje detektiramo kao dugotrajne bljeskove.

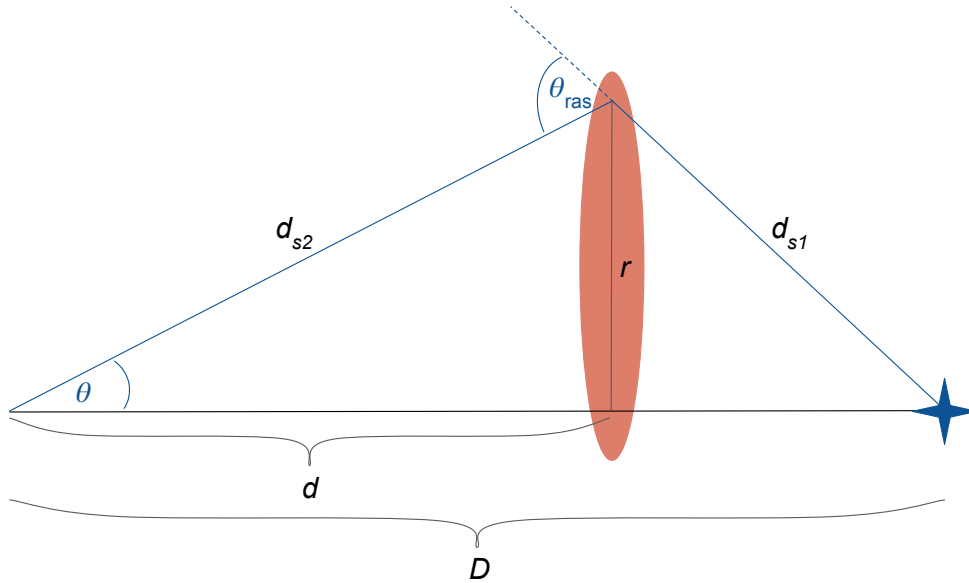
U ovom će nam radu bljeskovi gama zračenja poslužiti kao daleki (ekstragalaktički) izvori X-zračenja koje se potencijalno raspršuje na prašini u Mliječnom putu i stvara prsten X-zračenja oko početnog položaja bljeska gama-zračenja.

1.3 Raspršenje X-zračenja iz bljeskova gama-zračenja na prašini u Mliječnom putu

Ako se na doglednici između nas i bljeska gama-zračenja nalazi oblak prašine, puls se X-zračenja povezan s bljeskom može raspršiti na zrcima prašine (za detalje pogledati poglavlje 1.1.2) te biti preusmjeren prema nama. Ova je situacija skicirana na slici 1.9. Kao što je ranije spomenuto, raspršenje se na prašini može proučavati za energije $\gtrsim 0.2$ keV (slika 1.2) te za energije manje od neke granične vrijednosti (slika 1.3). U praksi se ispostavlja da je spomenuta gornja granica otprilike jednaka 2 do 5 keV, no ista ovisi o više parametara (stupčastoj gustoći prašine, ulaznom toku fotona itd.) te se razlikuje za različita opažanja. Medijan kuta raspršenja je za ovaj energetska interval jednak otprilike (jednadžba 1.8):

$$\theta_{r,50}(E \sim 1keV) = 360'' = 6' . \quad (1.11)$$

Vidimo da je kut raspršenja (θ_{ras} sa slike 1.9) reda veličine nekoliko kutnih minuta zbog čega se i u opažanjima raspršenje detektira za male vrijednosti kuta θ (slika



Slika 1.9: Skica raspršenja pulsa X-zračenja iz bljeska gama-zračenja na prašini u Mliječnom putu.

1.9). Detektori X-zračenja čiji će se podaci koristiti u ovom radu detektiraju pojedinačno svaki foton koji upadne na područje detektora. Ovime se dobiva informacija o energiji fotona, vremenu upada fotona na detektor te položaj na detektoru gdje je foton detektiran. Vrijeme upada fotona se obično mjeri s obzirom na početak bljeska, dok nam položaj fotona u detektoru daje informaciju o kutu θ sa slike 1.9. U nastavku ćemo izvesti vezu između ovih veličina koja će nam pomoći u određivanju udaljenosti do samog oblaka prašine.

Raspišimo prvo geometrijske relacije koje se mogu direktno iščitati sa slike 1.9:

$$\begin{aligned}\cos \theta &= \frac{d}{d_{s2}} \\ \tan \theta &= \frac{r}{d} \\ d_{s1}^2 &= r^2 + (D - d)^2.\end{aligned}\tag{1.12}$$

Nadalje, ukupni put koji raspršeni fotoni prođu na putu do nas je dan s:

$$d_s = d_{s1} + d_{s2} = \frac{d}{\cos \theta} + \sqrt{d^2 \tan^2 \theta + (D - d)^2}.\tag{1.13}$$

Pošto je kut θ mali, kako je raspravljeno ranije, možemo upotrijebiti aproksimaciju

malog kuta:

$$\begin{aligned}\cos \theta &\simeq 1 - \frac{\theta^2}{2} \\ \tan \theta &\simeq \theta\end{aligned}\tag{1.14}$$

nakon čega za put raspršenih fotona dobivamo:

$$d_s = d \left(1 + \frac{\theta^2}{2} \right) + \sqrt{d^2 \theta^2 + (D - d)^2}.\tag{1.15}$$

Razlog kašnjenja raspršenih fotona na detektor je upravo duži put koji isti moraju prijeći gibajući se jednakom brzinom c . Kašnjenje je stoga dano s:

$$t - t_0 = \frac{d_s - D}{c} = \frac{1}{c} \left[d \left(1 + \frac{\theta^2}{2} \right) + \sqrt{d^2 \theta^2 + (D - d)^2} - D \right].\tag{1.16}$$

U našem se slučaju izvor zračenja (bljesak gama-zračenja) nalazi u vrlo udaljenim galaksijama za razliku od oblaka prašine na kojem promatramo raspršenje zbog čega možemo iskoristiti aproksimaciju:

$$d \theta \ll D - d\tag{1.17}$$

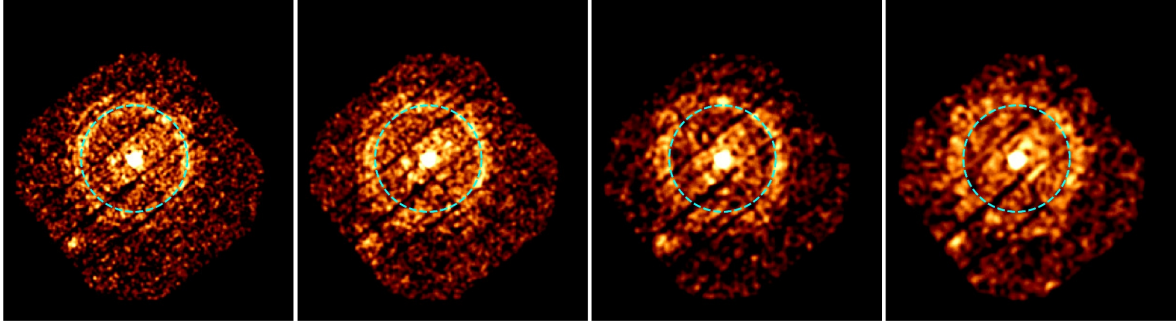
nakon čega dobivamo konačan rezultat:

$$\boxed{t - t_0 = \frac{d}{2c} \theta^2}.\tag{1.18}$$

Vidimo da su dvije dobro poznate veličine iz mjerenja povezane upravo jednim slobodnim parametrom: udaljenošću do prašine. Na ovom će se rezultatu temeljiti metoda određivanja udaljenosti oblaka prašine detaljnije opisana u poglavlju 4.1.

1.4 Dosadašnja mjerenja udaljenosti uz pomoć opažanja prstenova X-zračenja

Do danas su se odredile udaljenosti oblaka prašine za 6 bljeskova gama-zračenja koristeći podatke sa Swift XRT [11] ili XMM-Newton [28] teleskopa. Primjer vremenske evolucije prstena X-zračenja kojom se određuje udaljenost oblaka prašine prikazan je na slici 1.10 za bljesak gama-zračenja GRB 160623A [Pintore et al.,



Slika 1.10: Evolucija prstena X-zračenja u vremenu za bljesak gama-zračenja GRB 160623A. Svaka slika prikazuje interval vremena opažanja s time da vrijeme protječe s lijeva na desno. Crkana linija na svakoj od slika prikazuje poziciju prstena u prvom vremenskom intervalu. [Izvor: Pintore et al., 2017 [29]]

Ime bljeska	l [°]	b [°]	Udaljenost do prašine [pc]	Teleskop	Literatura
GRB 031203	255.74	-4.80	870 ± 5 1384 ± 9	XMM-Newton	[30], [31]
GRB 050713A	112.15	18.83	364 ± 7	XMM-Newton	[30]
GRB 050724	350.37	15.10	139 ± 9	Swift XRT	[32]
GRB 061019	181.74	4.26	930 ± 40	Swift XRT	[33]
GRB 070129	157.20	-44.70	150 290	Swift XRT	[33]
GRB 160623A	84.20	-2.70	528.1 ± 1.2 679.2 ± 1.9 789.0 ± 2.8 952 ± 5 1539 ± 20 5079 ± 64	XMM-Newton	[29]

Tablica 1.2: Tablica bljeskova gama-zračenja pomoću kojih se odredila udaljenost do oblaka prašine u Mliječnom putu.

2017 [29]]. Na slici se jasno vidi vremensko širenje prstena opisano jednadžbom 1.18.

U tablici 1.2 nalazi se lista svih bljeskova za koje je provedena analiza te za koje su se odredile pripadne udaljenosti jednog ili više oblaka na njihovim doglednicama. Za više informacija o samoj metodi određivanja udaljenosti pogledati poglavlje 4.1.

1.5 Motivacija

Cilj je ovog rada istražiti jesu li oblaci prašine na kojima se raspršuje X-zračenje iz bljeskova gama-zračenja vidljivi u drugim nezavisnim mjerenjima međuzvezdane tvari. U ovu ćemo svrhu koristiti 3D raspodjele prašine dobivene pomoću preciznih

mjerenja udaljenosti i ekstinkcije u vidljivom području spektra za veliki broj zvijezda (pogledati poglavlje 2.2). Također ćemo koristiti promatranja međuzvezdane materije pomoću radioteleskopa LOFAR [34] koji mapira magnetiziranu i ioniziranu međuzvezdanu tvar te promatranja satelita Planck [35] koji detektira emisijsko infracrveno zračenje prašine na nebeskoj sferi (pogledati poglavlje 2.3).

Usporedba će prvo biti napravljena za 6 bljeskova gama-zračenja s detekcijom prstena iz tablice 1.2 nakon čega će se potražiti detekcija ekspanirajućeg prstena i za nekoliko drugih selektiranih bljeskova na temelju multifrekvencijske analize međuzvezdane tvari u tom području. Koristeći 3D raspodjele ekstinkcije, proučit će se raspodjela prašine na doglednicama ovih bljeskova što će se koristiti kao predviđanje za mogućnost detekcije prstena. Za samu će se detekciju prstena koristiti podaci Swift satelita koji detektira X-zračenje iz bljeskova gama-zračenja te pomoću kojih su se već detektirali neki prstenovi iz tablice 1.2. Na kraju će se navedeni rezultati usporediti s predviđanjima podataka telekopa LOFAR i satelita Planck u smjerovima ovih bljeskova.

Ovim će se postupkom napraviti usporedba nekoliko nezavisnih načina mjerenja udaljenosti međuzvezdane tvari na temelju čega će se probati predvidjeti detekcija novih prstenova X-zračenja oko bljeskova gama-zračenja.

2 Podaci

2.1 Podaci X-zračenja satelita Swift

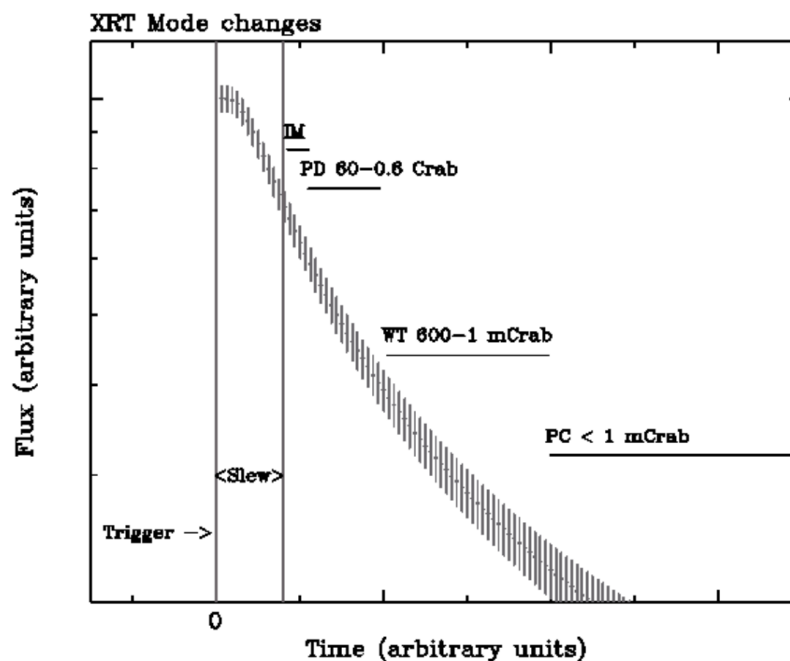
Swift je satelit lansiran 2004. godine u svrhu proučavanja bljeskova gama-zračenja. Na satelitu se nalaze tri glavna instrumenta [Gehrels, 2004 [11]]: širokokutni detektor bljeskova gama-zračenja (engl. *Burst Alert Telescope; BAT*) te uskokutni teleskopi s detektorima za X-zračenje (engl. *X-ray Telescope; XRT*) i ultraljubičastu i vidljivu svjetlost (engl. *UV/Optical Telescope; UVOT*). Širokokutni detektor gama-zračenja detektira promptno zračenje novonastalog bljeska na temelju čega mu određuje poziciju s preciznošću od otprilike 3'. Nakon toga se satelit automatski okreće prema ovoj poziciji u roku od 20 do 70 sekundi te s preciznošću od otprilike 5" određuje točnu poziciju bljeska koristeći detektor X-zračenja. Najpreciznija (otprilike 0.3") se pozicija mjeri detektorom ultraljubičastog i vidljivog zračenja nakon čega slijedi prikupljanje podataka naknadnog zračenja bljeska gama-zračenja ovim teleskopima.

Podaci koji se koriste u ovom radu su podaci detektora X-zračenja koji su javno dostupni na web-stranici Swift satelita¹. Detektor X-zračenja ima nekoliko načina rada:

- Slika duge i kratke ekspozicije (engl. *Image Long and Short, IM*)
- Fotodioda niske stope i akumulacijska fotodioda (engl. *Low rate, LR and Piled-up Photodiode, PU*)
- Kompresirano vremensko promatranje (engl. *Windowed Timing, WT*)
- Brojač fotona (engl. *Photon Counting, PC*).

Načini rada teleskopa se automatski mijenjaju s obzirom na jačinu toka zračenja iz promatranog izvora kao što je prikazano na slici 2.1, a njihove se glavne značajke mogu pronaći u tablici 2.1. U tablici se tok zračenja izražava u jedinicama Crab po uzoru na intenzitet Maglice Rakovice, engl. *Crab Nebula*, koje se u astrofizici koriste za mjerenje intenziteta X-zračenja te u rasponu energija 2 - 10 keV iznose: 1 Crab = 15 keV cm⁻² s⁻¹.

¹https://www.swift.ac.uk/swift_portal/



Slika 2.1: Graf ovisnosti toka zračenja u vremenu s označenim vremenskim intervalima u kojima se koristi pripadni način rada teleskopa X-zračenja. [Izvor: The SWIFT XRT Data Reduction Guide [36]]

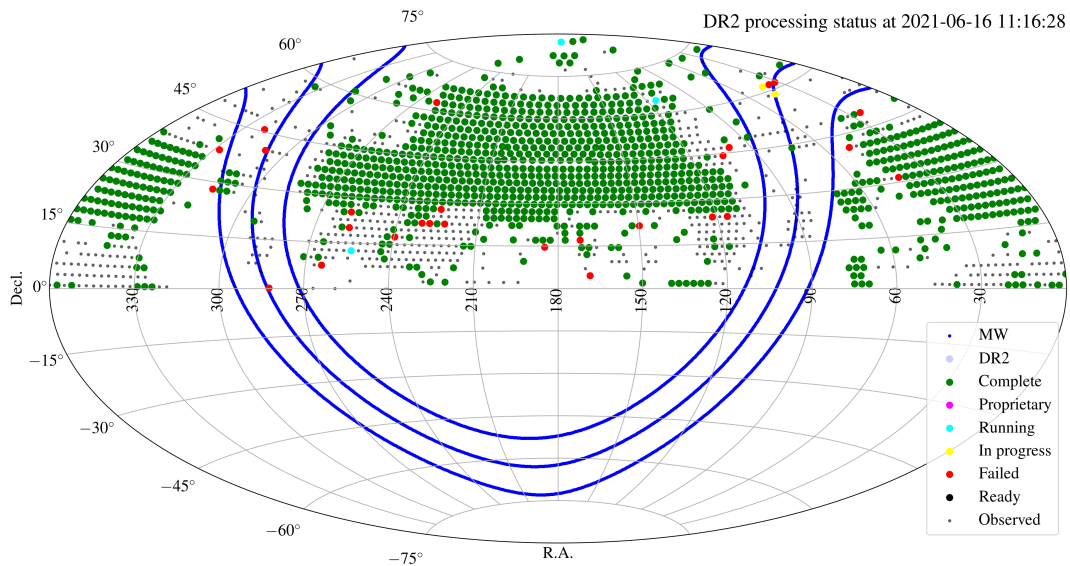
Način rada	Mogućnost fotografiranja	Mogućnost mjerenja spektra	Vremenska rezolucija	Granični tok
PU i LR	Ne	Da	0.14 ms	0.6 - 60 Crab
WT	1D	Da	1.7 ms	1 - 600 mCrab
PC	2D	Da	2.5 s	< 1 mCrab
IM	2D	Ne Ne	0.1 s (Kratki) 2.5 s (Dugi)	> 140 mCrab < 5.6 mCrab

Tablica 2.1: Glavne značajke pojedinih načina rada teleskopa X-zračenja na Swift satelitu. [Izvor: The SWIFT XRT Data Reduction Guide [36]]

U ovom će se radu u svrhu traženja detekcije prstena oko bljeskova gama-zračenja koristiti podaci rada brojača fotona koji se koristi za mali broj upadnih fotona u vremenu. Tipična ekspozicija iznosi 2.5 s te na detektor upadne prosječno 1 foton po pikselu (na području bljeska). Ovakvim mjerenjem dobivamo informacije o energiji upadnih fotona, položaju upadanja na detektor i vrijeme detekcije koje su nam potrebne za detekciju prstena (pogledati poglavlje 1.3).

Selekcija bljeskova gama-zračenja za koje će se tražiti detekcija prstena je napravljena na temelju nekoliko kriterija:

- Ozračenost (engl. *fluence*) u području energija 15-150 keV veća od 10^{-5} ergs/cm²,



Slika 2.2: Područje neba opaženo teleskopom LOFAR. Zelene točke označavaju mjesta na kojima je izvršeno promatranje te čiji su podaci spremni za upotrebu. [Izvor: LOFAR Surveys: Current observation and processing status [37]]

- Stupčasta gustoća na doglednici veća od 10^{21} cm^{-3} .

Gornji nam kriteriji osiguravaju da bljesak bude dovoljno sjajan te da sloj prašine bude dovoljno gust kako bi se uočilo raspršenje fotona te formacija prstena. Dodatan uvjet koji smo uzeli pri selekciji ovih bljeskova je da položaj na kojem se dogodio bljesak upada u područje neba opaženo teleskopom LOFAR prikazano na slici 2.2. Selekcija se provela na bljeskovima koji su se dogodili prije 2015. godine čime su odabrana 3 nova bljeska. Ovi se bljeskovi zajedno s bljeskovima za koje je prsten već detektiran nalaze u tablici 2.2.

2.2 3D raspodjele ekstinkcije

Udaljenosti oblaka prašine dobivenih promatranjem prstenova oko bljeskova gama-zračenja usporedit će se s 3D raspodjelom prašine u našoj okolini dobivenom promatranjem ekstinkcije zvijezda u vidljivom području spektra. Očekujemo dobro slaganje ovih udaljenosti iz razloga što očekujemo da je ista populacija zrnaca zaslužna za raspršenje vidljivog i X-zračenja (pogledati poglavlje 1.1.2). Za dobivanje ovakve raspodjele potreban je velik broj zvijezda s dobro određenim udaljenostima i ukupnim iznosima ekstinkcije na doglednici. Samo se mapiranje bazira na tomografskoj inverziji ukupne ekstinkcije ovakvih zvijezda u diferencijalnu ekstinkciju u 3D prostoru uzimajući u obzir prostorne korelacije gustoće međuzvezdane tvari u svim

Ime bljeska	l [°]	b [°]	Udaljenost do prašine [pc]	Teleskop	Literatura
GRB 031203	255.74	-4.80	870 ± 5 1384 ± 9	XMM-Newton	[30], [31]
GRB 050713A	112.15	18.83	364 ± 7	XMM-Newton	[30]
GRB 050724	350.37	15.10	139 ± 9	Swift XRT	[32]
GRB 061019	181.74	4.26	930 ± 40	Swift XRT	[33]
GRB 070129	157.20	-44.70	150 290	Swift XRT	[33]
GRB 160623A	84.20	-2.70	528.1 ± 1.2 679.2 ± 1.9 789.0 ± 2.8 952 ± 5 1539 ± 20 5079 ± 64	XMM-Newton	[29]
GRB 080319B	62.55	66.88	-	Swift XRT	-
GRB 140206A	145.62	41.00	-	Swift XRT	-
GRB 140419A	173.78	35.52	-	Swift XRT	-

Tablica 2.2: Tablica bljeskova gama-zračenja koji se koriste u ovom radu.

smjerovima.

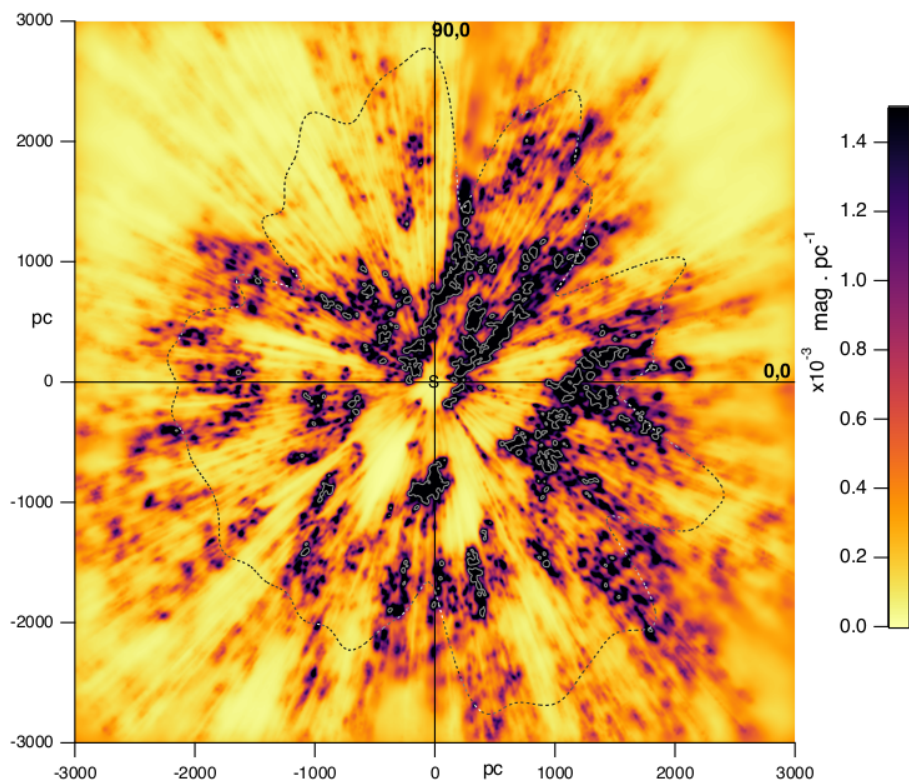
Postoji nekoliko ovakvih raspodjela prašine dobivenih različitim metodama te različitih veličina i rezolucija. U ovom će se radu koristiti dvije 3D raspodjele ekstinkcije od kojih jedna dostiže maksimalnu udaljenost od 3 kpc s najboljom rezolucijom od 25 pc (Lallement et al., 2019 [38]) dok druga postiže maksimalnu udaljenost od 0.4 kpc s rezolucijom od 2 pc (Leike et al., 2020 [39]).

U Lallement et al. (2019) se za 3D rekonstrukciju raspodjele ekstinkcije koriste fotometrijska mjerenja dobivena iz *Gaia* DR2 [40] podataka kombiniranim s 2MASS [41] podacima. Prilikom selekcije zvijezda koristili su se brojni kriteriji kako bi se osigurala bolja preciznost fotometrijskih podataka uz što se još uzela granica od 20% na preciznost mjerenja paralakse. Konačan broj zvijezda nakon primjena ovih kriterija iznosi otprilike 27 340 000.

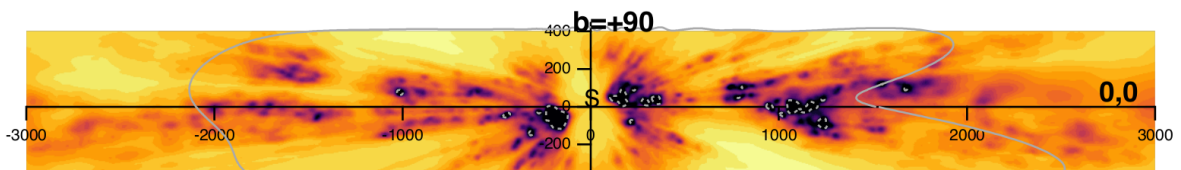
Iznosi ekstinkcije pojedinih zvijezda su određeni proučavajući fotometrijska mjerenja u različitim filterima prilikom čega se dobiva informacija o razlici tokova zračenja na većim i manjim valnim duljinama. Ova je veličina direktno proporcionalna ekstinkciji jer znamo da je ekstinkcija jača za kratke valne duljine zbog čega će i razlika tokova npr. plave i crvene svjetlosti biti veća. Ekstinkcija se na kraju određuje

korištenjem spomenute proporcionalnosti te pripadnih empirijskih zakona.

Inverzija iz ukupnih ekstinkcija u diferencijalnu se ekstinkciju dobila primjenom hijerarhijskog algoritma koji je prilagođen velikim setovima podataka i nehomogenoj raspodjeli objekata. U svakom se koraku algoritma povećava prostorna rezolucija na kojoj se provodi regularizirana Bayesova inverzija (engl. *Regularized Bayesian inversion*) u svim radijalnim smjerovima uzimajući rezultat iz prethodnog koraka za početnu točku. Konačna najbolja postignuta rezolucija je 25 pc na udaljenostima do otprilike 1 kpc od Sunca, dok na većim udaljenostima rezolucija pada na 300 - 500 pc ovisno o smjeru gledanja što se može vidjeti na slikama 2.3 i 2.4. Konačni su podaci



Slika 2.3: Presjek podataka diferencijalne ekstinkcije 3D mape Lallement et al. 2019 [38] duž galaktičke ravnine. Siva crtkana linija predstavlja granicu do koje je dobivena najbolja rezolucija od 25 pc.



Slika 2.4: Presjek podataka diferencijalne ekstinkcije 3D mape Lallement et al. 2019 [38] duž ravnine okomite na galaktičku u smjeru galaktičkog centra. Siva crtkana linija predstavlja granicu do koje je dobivena najbolja rezolucija od 25 pc.

dani u obliku kocke veličine $6 \times 6 \times 0.8 \text{ kpc}^3$ s centrom na položaju Sunca izraženi u diferencijalnoj ekstinkciji na valnoj duljini od 5500 \AA (oznaka: dA_0/dr). Podaci su javno dostupni na internetu².

Za konstrukciju Leike et al. (2020) mape, koristio se katalog zvijezda iz Anders et al. (2019) [42] koji je dobiven korištenjem nekoliko setova podataka: *Gaia* DR2 [40], ALLWISE [43], PANSTARRS [44] i 2MASS [41]. Iz kataloga su se uzele udaljenosti i ekstinkcije zvijezda unutar kocke $800 \times 800 \times 600 \text{ pc}^3$ sa središtem u Suncu. Nadalje, korištenjem nekoliko kriterija, osiguran je odabir zvijezda s precizno određenim udaljenostima i ekstinkcijama. Konačan broj zvijezda nakon selekcije iznosi 5 096 642.

3D rekonstrukcija za ovu se mapu računala paralelnim računanjem 8 oktanata na koje se podijelila početna kocka podataka. Za svaki se oktant računala diferencijalna ekstinkcija koristeći Gaussijsko varijacijsko zaključivanje (engl. *Gaussian variational inference; MGVI*) [Knollmüller & Enßlin, 2019 [45]] koje stvara uzorak rješenja diferencijalne ekstinkcije uzimajući vrijednosti parametara u okolici postavljenih očekivanih vrijednosti modela te optimizirajući ih u svakom koraku srednjim gradijentom ovih uzoraka. Model uzima pretpostavke da je diferencijalna ekstinkcija pozitivna te prostorno korelirana. Konačne se kocke na kraju ponovno spajaju u jednu konačnog volumena $740 \times 740 \times 540 \text{ pc}^3$ s rezolucijom od 2 pc , dok je ekstinkcija izražena u jedinicama prirodnog logaritma u filteru zelene svjetlosti (engl. *G-band*) kojem je srednja vrijednost na 4640 \AA . Kocka je javno dostupna na internetu³ te i u sklopu Python paketa *Dustmaps*⁴ koji se koristio u ovom radu.

Kako bismo dobili raspodjelu prašine na doglednicama bljeskova gama-zračenja iz tablice 2.2 koristeći Lallement et al. (2019) podatke koristila se linearna interpolacija u smjerovima bljeskova primijenjena direktno na kocku podataka diferencijalne ekstinkcije. S druge strane, za raspodjelu prašine duž doglednica ovih bljeskova iz Leike et al. (2020) podataka koristio se Python paket *Dustmaps* koji nam unosom pripadnih koordinata daje srednju vrijednost diferencijalne ekstinkcije duž doglednice kao i pripadnu grešku.

²<http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/625/A135>

³<https://doi.org/10.5281/zenodo.3750926> ili na CDS <http://cds.u-strasbg.fr/>

⁴<https://github.com/gregreen/dustmaps>

Za promatranje okoline ovih doglednica koristit će se još i 2D grafovi dobiveni presjekom Lallement et al. kocke okomito na ravninu galaksije. Za ove su se presjeke opet koristile linearne interpolacije podataka duž paralelnih linija usmjerenih prema ($l = l_{GRB}$, $b = 0$) za različite visine s obzirom na ravninu galaksije.

Korištenjem navedenih grafova usporedit će se mjerenja udaljenosti oblaka prašine već detektiranih prstenova X-zračenja s mjerenjima udaljenosti preko ekstinkcije zvijezda te će se pokušati predvidjeti detekcija prstena X-zračenja na novoselektiranim bljeskovima gama-zračenja iz tablice 2.2.

2.3 Ostali podaci

Osim podataka X-zračenja sa Swift satelita te 3D raspodjela ekstinkcije, u radu će se za potrebe promatranja prašine u smjerovima novoselektiranih bljeskova gama-zračenja s mogućom detekcijom prstena X-zračenja koristiti još dva seta podataka: podaci sinkrotronskog zračenja prikupljeni radioteleskopom LOFAR te podaci infracrvenog emisijskog zračenja prašine teleskopa Planck.

2.3.1 Podaci radioteleskopa LOFAR

Sinkrotronsko zračenje u svemiru nastaje akceleracijom relativističkih elektrona u lokalnom magnetskom polju. Nastalo zračenje je polarizirano te dominira u radiovalnom području elektromagnetskog spektra. Na putu do nas, ovo zračenje prolazi kroz međuzvjezdanu tvar gdje mu se polarizacija zakreće zbog efekta Faradayeve rotacije. Kut zakretanja je direktno proporcionalan jačini komponente magnetskog polja duž doglednice i gustoći elektrona što nam omogućava praćenje raspodjele ionizirane materije u međuzvjezdanoj tvari.

Radioteleskop LOFAR (engl. *Low-Frequency Array*) [34] detektira sinkrotronsko zračenje u području radiozračenja između 10 – 240 MHz. Podaci su dani u obliku tzv. Faradayevih kocki kojoj su dvije dimenzije prostorne dok je treća dimenzija Faradayeva dubina. Faradayeva je dubina definirana s [Bretjens & Bruyn, 2005 [46]]:

$$\frac{\phi}{\text{rad/m}^2} = 0.81 \int \frac{n_e}{\text{cm}^{-3}} \frac{\vec{B} \cdot d\vec{l}}{\mu\text{G} \cdot \text{pc}} \quad (2.1)$$

gdje je n_e gustoća elektrona, a \vec{B} lokalno magnetsko polje u kojem se događa Faradayeva rotacija te se pripadni integral izvrjednjuje duž doglednice. Faradayeva

dubina je stoga direktna mjera jačine zakretanja polarizacije zračenja prolaskom kroz dani medij. Faradayeva nam kocka daje informaciju o intenzitetu polariziranog zračenja definiranog kao:

$$P(\phi) = \sqrt{Q^2(\phi) + U^2(\phi)} \quad (2.2)$$

gdje su $Q(\phi)$ i $U(\phi)$ Stokesovi parametri kojima se opisuje polarizacija zračenja.

Podaci radioteleskopa LOFAR omogućuju nam proučavanje raspodjele ionizirane međuzvezdane tvari pomoću polariziranog sinkrotronskog zračenja iz područja u kojima prevladava neutralna materija. Ovi će se podaci usporediti s podacima Planck satelita te mjerenjima udaljenosti oblaka prašine kako bi se istražilo mapiraju li ova neovisna mjerenja isto područje neutralne međuzvezdane tvari.

2.3.2 Podaci Planck satelita

Glavna je misija Planck satelita [35] proučavanje mikrovalnog pozadinskog zračenja (engl. *Cosmic microwave background radiation; CMB*) zbog čega se promatranja provode od mikrovalnih do infracrvenih valnih duljina. Pošto prašina u međuzvezdanoj tvari zrači upravo u infracrvenom području (pogledati poglavlje 1.1), Planck satelit nam daje informaciju o 2D raspodjeli prašine u našoj galaksiji.

Osim same raspodjele prašine, proučavajući polarizaciju emisijskog zračenja možemo dobiti i informaciju o komponenti magnetskog polja okomitoj na doglednicu. Ne sferična zrnca prašine se u lokalnom magnetskom polju ponašaju kao sitne magnetne iglice zbog čega se iste orijentiraju u smjeru samog polja. Ovo poravnavanje zrnaca prašine rezultira u poravnavanju polarizacije emitiranog infracrvenog zračenja okomito na lokalno magnetsko polje. Zbog ovog se efekta promatranjem Stokesovih parametara može dobiti informacija o orijentaciji magnetskog polja s obzirom na nebesku sferu.

U radu se koristi javno dostupna⁵ 2D mapa neba u infracrvenom području sa središtem na frekvenciji 353 GHz. Podaci sadrže informaciju o Stokesovim parametrima Q i U u HEALPix formatu kojima će se odrediti smjer magnetskog polja na promatranim dijelovima neba.

⁵<https://pla.esac.esa.int/#home>

3 Usporedba metoda mjerenja udaljenosti do oblaka prašine

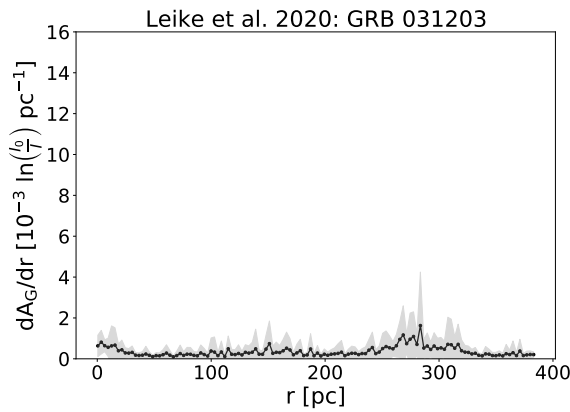
3.1 Usporedba dosadašnjih mjerenja

Za usporedbu udaljenosti oblaka prašine dobivenih metodom praćenja evolucije prstena oko bljeskova gama-zračenja s 3D raspodjelama ekstinkcije, napravili su se grafovi raspodjele ekstinkcije duž doglednice svakog bljeska iz tablice 1.2 s označenim pripadnim udaljenostima te 2D presjeci Lallement et al. (2019) kočke za bolju predodžbu okoline. U grafovima raspodjele diferencijalne ekstinkcije na doglednicama bljeskova, crvenim su vertikalnim linijama označene udaljenosti dobivene promatranjem prstenova oko bljeskova gama-zračenja, narančastim isprekidanim linijama njihove pripadne pogreške te plavim isprekidanim vertikalnim linijama na grafovima Lallement et al. (2019) podataka označene su maksimalne udaljenosti Leike et al. (2020) podataka za pripadne doglednice. Leike et al. (2020) podaci uz samu raspodjelu srednje vrijednosti diferencijalne ekstinkcije nude i pripadne greške koje su na grafovima označene sivom bojom. Na 2D grafovima diferencijalne ekstinkcije prikazani su presjeci Lallement et al. (2019) podataka okomiti na ravninu galaksije. Visina na grafu označava položaj s obzirom na ravninu galaksije, crvena linija označava dogledincu do bljeska, a točke na ovoj liniji pripadne udaljenosti do oblaka prašine iz tablice 1.2.

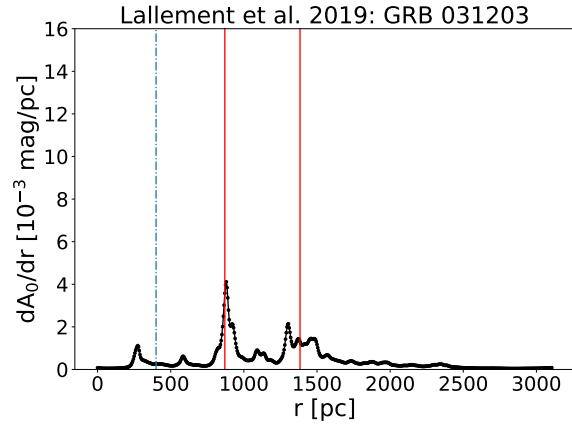
Grafovi raspodjela diferencijalne ekstinkcije za bljeskove gama-zračenja iz tablice 1.2 nalaze se na slikama 3.1 do 3.18. Možemo primijetiti da se Leike et al. (2020) i Lallement et al. (2019) podaci vrlo dobro slažu duž doglednica većine bljeskova gama-zračenja. Jedino u slučaju bljeska GRB 050724 vidimo veću razliku što je moguća posljedica lošije rezolucije Lallement et al. (2019) podataka (25 pc na relevantnim udaljenostima) s obzirom na Leike et al. (2020) podatke (2 pc).

Također vidimo da se položaji vrhova u raspodjelama ekstinkcije dobro slažu s mjerenjima udaljenosti preko bljeskova gama-zračenja. U slučaju bljeska GRB 070129 zanimljivo je primijetiti kako su se pomoću bljeska dobile udaljenosti dvaju oblaka prašine. Iako obje raspodjele ekstinkcije pokazuju blago povišenje na mjestu bližeg oblaka, ne bismo očekivali detekciju ovog prstena s obzirom na ostale primjere. U radu Vianello et al. (2007) [33] može se vidjeti kako je doprinos ovog

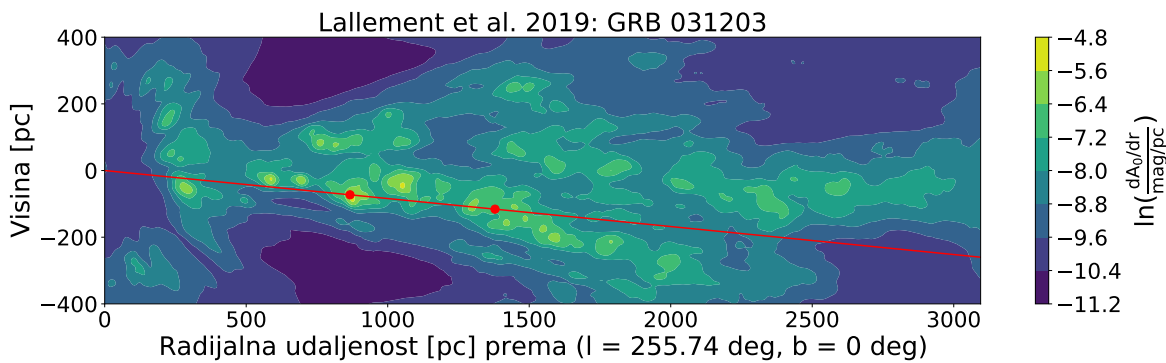
oblaka vrlo teško vidljiv i u podacima X-zračenja te da ga se uspjelo detektirati iz razloga što je prilagodba na podatke time postala nešto bolja. Također ne treba odbaciti ni mogućnost da se na tom položaju nalaze zrnca prašine koja nešto jače raspršuju X-zračenje, a nešto manje vidljivu svjetlost nego u ostalim primjerima.



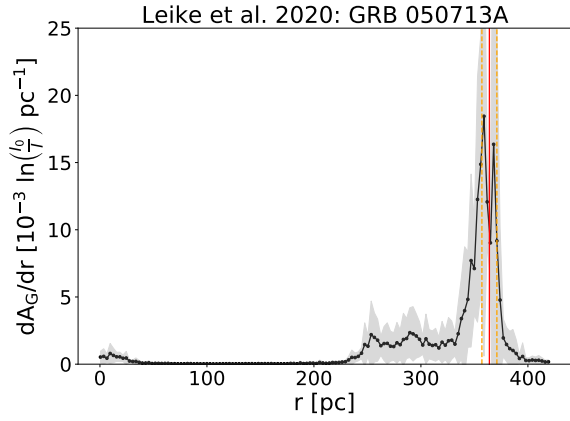
Slika 3.1: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Leike et al. (2020) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 031203. Srednja vrijednost diferencijalne ekstinkcije označena je crnom linijom dok su pripadne pogreške označene sivom bojom.



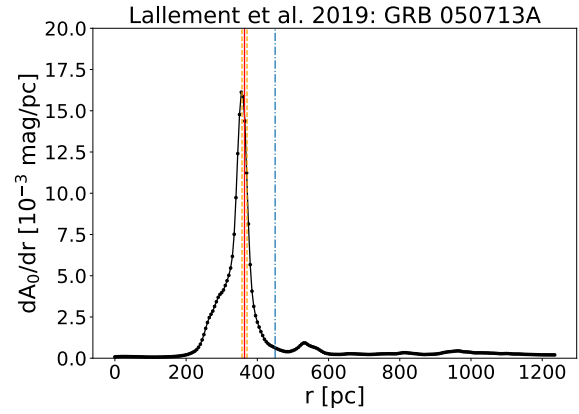
Slika 3.2: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 031203. Crvene vertikalne linije predstavljaju udaljenosti oblaka prašine iz tablice 1.2, a crtkana plava vertikalna linija predstavlja maksimalnu udaljenost Leike et al. (2020) podataka na doglednici (slika 3.1).



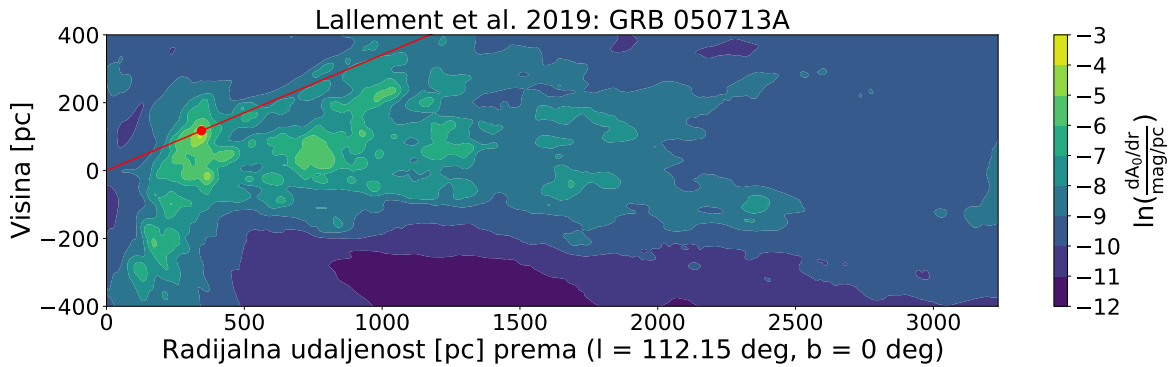
Slika 3.3: 2D presjek raspodjele ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) okomito na ravninu galaksije u smjeru bljeska gama-zračenja GRB 031203. Visina se mjeri s obzirom na položaj ravnine galaksije. Crvena linija predstavlja doglednicu bljeska, a crvene točke položaje udaljenosti oblaka prašine iz tablice 1.2.



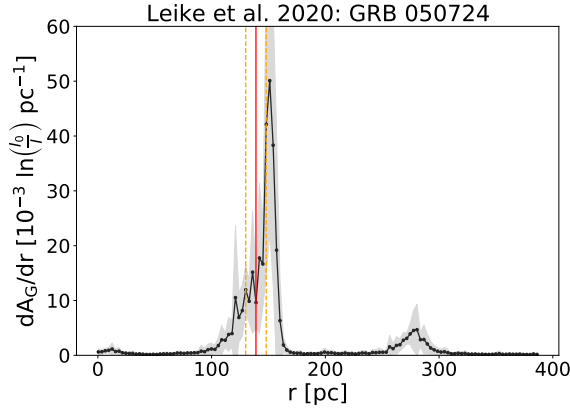
Slika 3.4: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Leike et al. (2020) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 050713A. Srednja vrijednost diferencijalne ekstinkcije označena je crnom linijom dok su pripadne pogreške označene sivom bojom. Crvena vertikalna linija predstavlja udaljenost oblaka prašine iz tablice 1.2, a narančaste isprekidane vertikalne linije njenu pripadnu pogrešku.



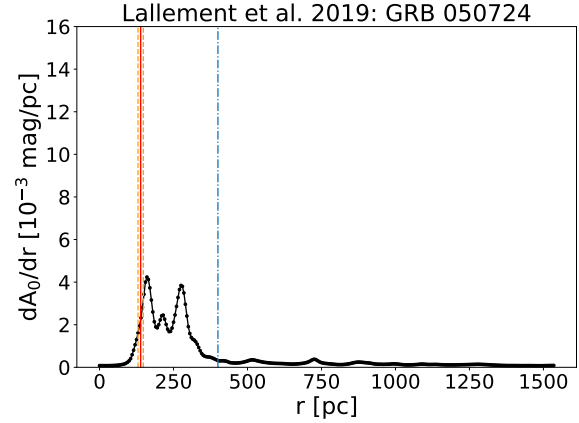
Slika 3.5: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 050713A. Crvena vertikalna linija predstavlja udaljenost oblaka prašine iz tablice 1.2, narančaste isprekidane vertikalne linije njenu pripadnu pogrešku, a crtkana plava vertikalna linija predstavlja maksimalnu udaljenost Leike et al. (2020) podataka na doglednici (slika 3.4).



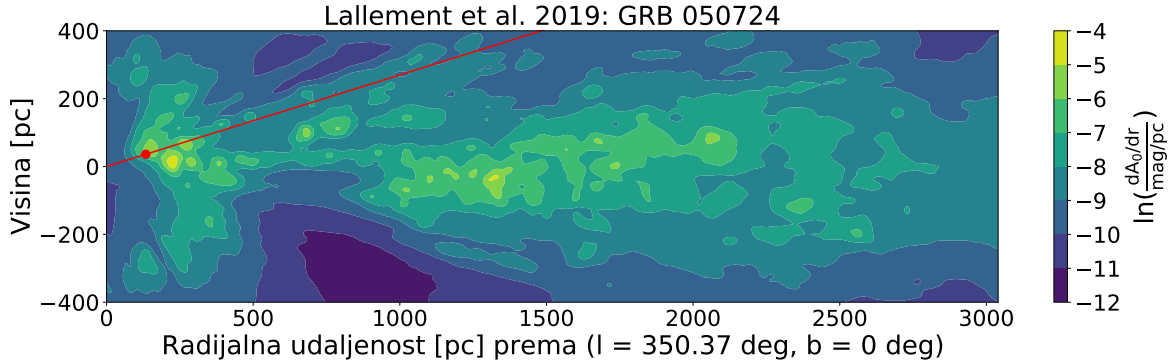
Slika 3.6: 2D presjek raspodjele ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) okomito na ravninu galaksije u smjeru bljeska gama-zračenja GRB 050713A. Visina se mjeri s obzirom na položaj ravnine galaksije. Crvena linija predstavlja doglednicu bljeska, a crvene točke položaje udaljenosti oblaka prašine iz tablice 1.2.



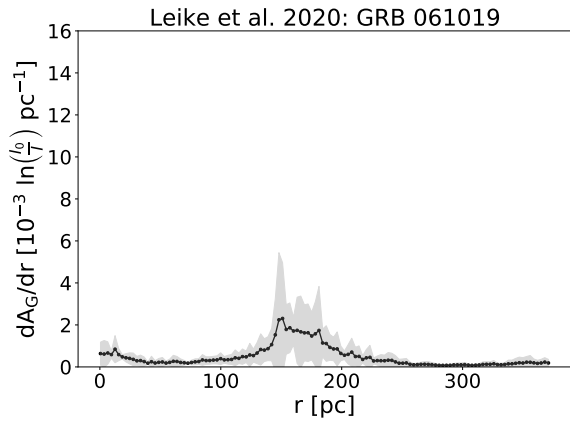
Slika 3.7: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Leike et al. (2020) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 050724. Srednja vrijednost diferencijalne ekstinkcije označena je crnom linijom dok su pripadne pogreške označene sivom bojom. Crvena vertikalna linija predstavlja udaljenost oblaka prašine iz tablice 1.2, a narančaste isprekidane vertikalne linije njenu pripadnu pogrešku.



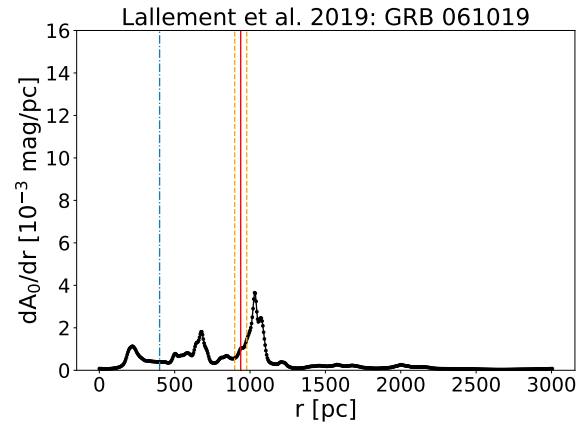
Slika 3.8: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 050724. Crvena vertikalna linija predstavlja udaljenost oblaka prašine iz tablice 1.2, narančaste isprekidane vertikalne linije njenu pripadnu pogrešku, a crtkana plava vertikalna linija predstavlja maksimalnu udaljenost Leike et al. (2020) podataka na doglednici (slika 3.7).



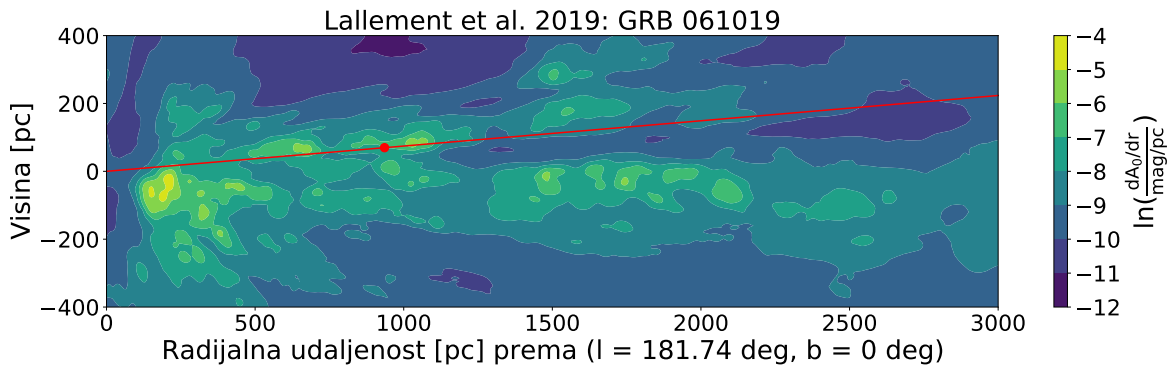
Slika 3.9: 2D presjek raspodjele ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) okomito na ravninu galaksije u smjeru bljeska gama-zračenja GRB 050724. Visina se mjeri s obzirom na položaj ravnine galaksije. Crvena linija predstavlja doglednicu bljeska, a crvene točke položaje udaljenosti oblaka prašine iz tablice 1.2.



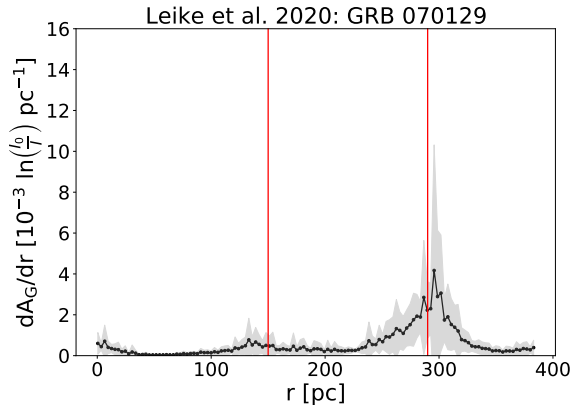
Slika 3.10: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Leike et al. (2020) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 061019. Srednja vrijednost diferencijalne ekstinkcije označena je crnom linijom dok su pripadne pogreške označene sivom bojom.



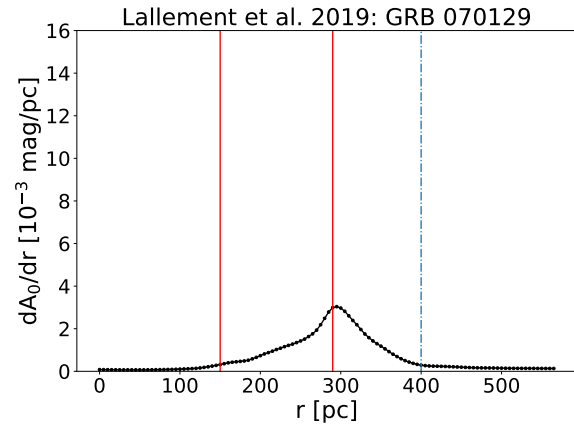
Slika 3.11: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 061019. Crvena vertikalna linija predstavlja udaljenost oblaka prašine iz tablice 1.2, narančaste isprekidane vertikalne linije njenu pripadnu pogrešku, a crtkana plava vertikalna linija predstavlja maksimalnu udaljenost Leike et al. (2020) podataka na doglednici (slika 3.10).



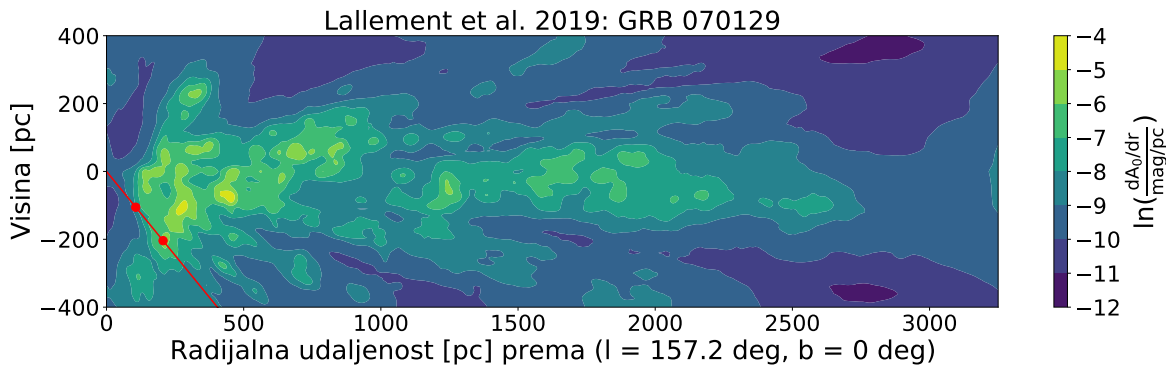
Slika 3.12: 2D presjek raspodjele ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) okomito na ravninu galaksije u smjeru bljeska gama-zračenja GRB 061019. Visina se mjeri s obzirom na položaj ravnine galaksije. Crvena linija predstavlja doglednicu bljeska, a crvene točke položaje udaljenosti oblaka prašine iz tablice 1.2.



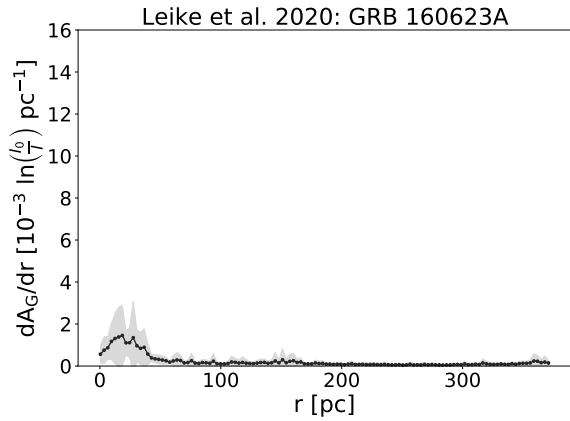
Slika 3.13: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Leike et al. (2020) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 070129. Srednja vrijednost diferencijalne ekstinkcije označena je crnom linijom dok su pripadne pogreške označene sivom bojom. Crvene vertikalne linije predstavljaju udaljenosti oblaka prašine iz tablice 1.2.



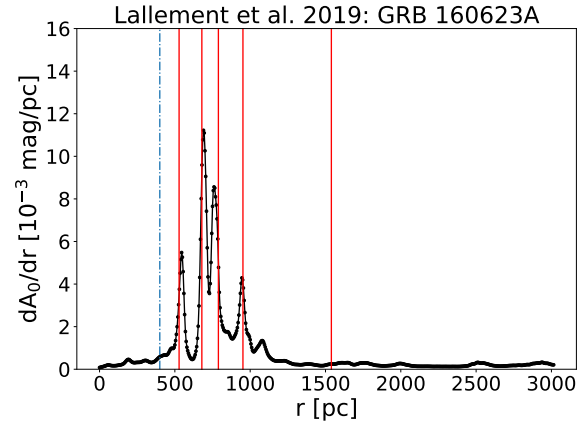
Slika 3.14: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 070129. Crvene vertikalne linije predstavljaju udaljenosti oblaka prašine iz tablice 1.2, a crtkana plava vertikalna linija predstavlja maksimalnu udaljenost Leike et al. (2020) podataka na doglednici (slika 3.13).



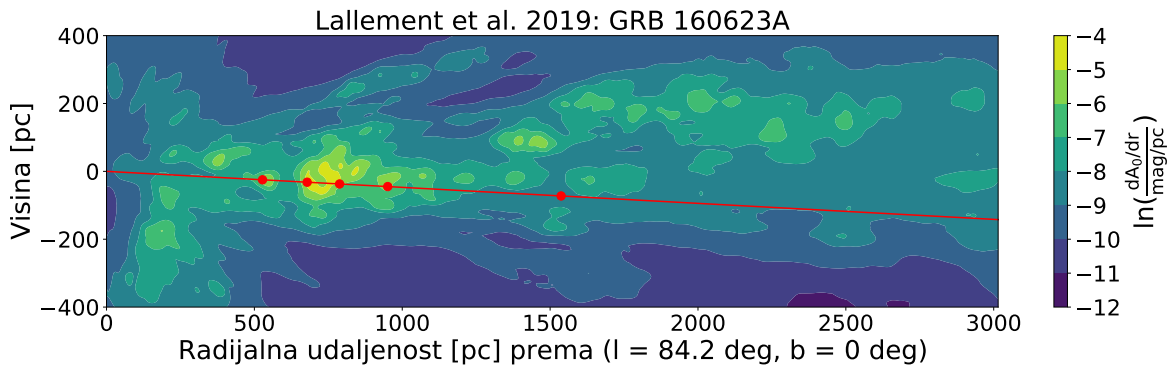
Slika 3.15: 2D presjek raspodjele ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) okomito na ravninu galaksije u smjeru bljeska gama-zračenja GRB 070129. Visina se mjeri s obzirom na položaj ravnine galaksije. Crvena linija predstavlja doglednicu bljeska, a crvene točke položaje udaljenosti oblaka prašine iz tablice 1.2.



Slika 3.16: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Leike et al. (2020) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 160623A. Srednja vrijednost diferencijalne ekstinkcije označena je crnom linijom dok su pripadne pogreške označene sivom bojom.



Slika 3.17: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 160623A. Crvene vertikalne linije predstavljaju udaljenosti oblaka prašine iz tablice 1.2, a crtkana plava vertikalna linija predstavlja maksimalnu udaljenost Leike et al. (2020) podataka na doglednici (slika 3.16).



Slika 3.18: 2D presjek raspodjele ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) okomito na ravninu galaksije u smjeru bljeska gama-zračenja GRB 160623A. Visina se mjeri s obzirom na položaj ravnine galaksije. Crvena linija predstavlja doglednicu bljeska, a crvene točke položaje udaljenosti oblaka prašine iz tablice 1.2.

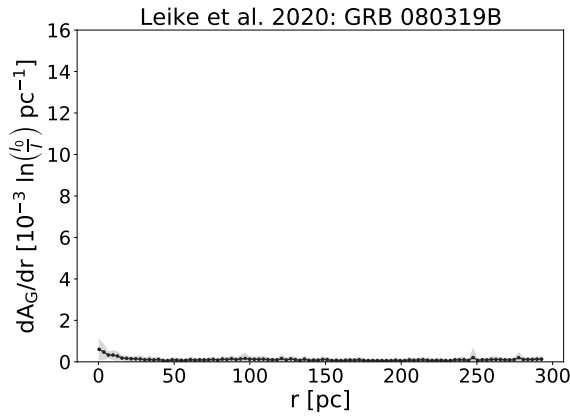
Iako je većina udaljenosti iz tablice 1.2 u skladu s raspodjelama ekstinkcije, postoji jedna udaljenost koja nema ovu potvrdu. Radi se o petom oblaku prašine na doglednici bljeska gama-zračenja GRB 160623A. U ovom slučaju se ne vidi nikakav porast u raspodjeli diferencijalne ekstinkcije na pripadnoj udaljenosti. Ovo je vjerojatno posljedica lošije rezolucije Lallement et al. (2019) podataka na većim udaljenostima zbog manjeg broja dalekih zvijezda s precizno određenom ekstinkcijom i udaljenošću. Manjak ovakvih zvijezda uzrokuje prividno širenje strukture raspodjele prašine koja je u stvarnosti možda više lokalizirana. Ovaj se efekt može primijetiti na 2D grafovima na velikim udaljenostima.

Možemo zaključiti da se raspodjele diferencijalne ekstinkcije vrlo dobro slažu s mjerenjima udaljenosti do oblaka prašine promatranjem prstenova X-zračenja oko bljeskova gama-zračenja. U sljedećem ćemo potpoglavlju stoga pogledati doglednice nekoliko bljeskova za koje se prsten još nije detektirao no koji zadovoljavaju potrebne kriterije za formaciju istog.

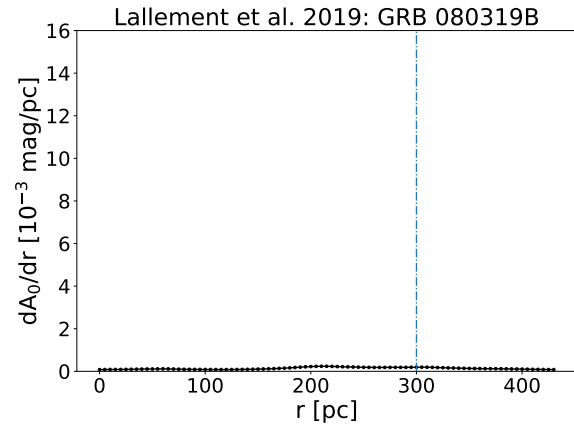
3.2 Predviđanja 3D raspodjela ekstinkcije

Napravili su se grafovi raspodjela diferencijalne ekstinkcije duž triju selektiranih bljeskova gama-zračenja koji zadovoljavaju potrebne kriterije za tvorbu prstena (pogledati poglavlje 2.1) te se nalaze na dnu tablice 2.2. Pripadni se grafovi nalaze na slikama 3.19 do 3.27.

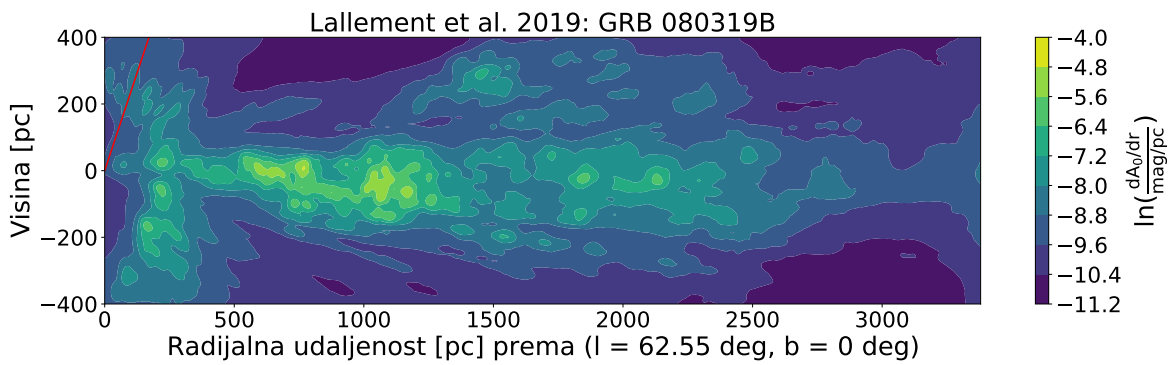
Raspodjele ekstinkcije za dva od ovih bljeskova ne predviđaju nikakav oblak prašine na doglednici (na zastupljenim udaljenostima), no za bljesak GRB 140206A obje raspodjele predviđaju prašinu na udaljenostima 300 - 400 pc. Za ovaj se bljesak stoga odlučilo analizirati podatke X-zračenja satelita Swift kako bi se potražila moguća detekcija prstena na ovim udaljenostima. Rezultati analize su prikazani u poglavlju 4.



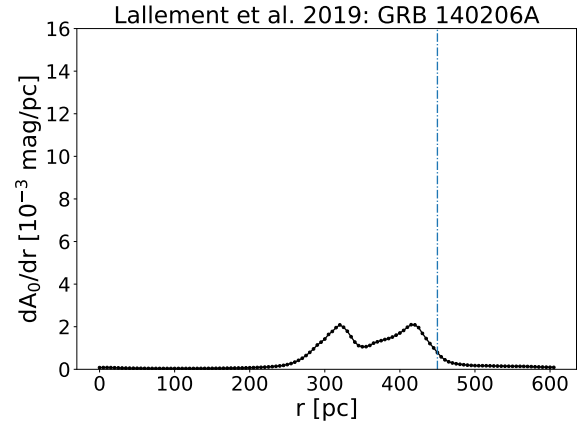
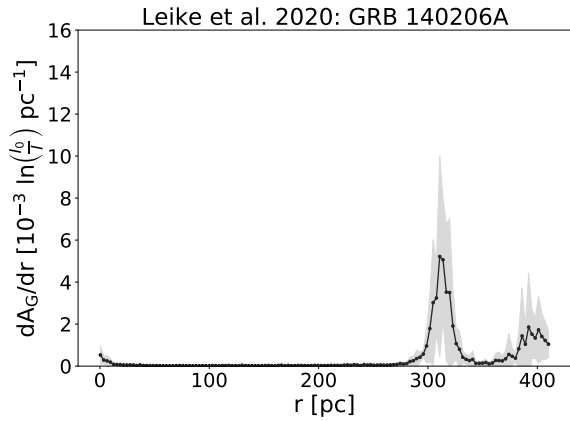
Slika 3.19: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Leike et al. (2020) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 080319B. Srednja vrijednost diferencijalne ekstinkcije označena je crnom linijom dok su pripadne pogreške označene sivom bojom.



Slika 3.20: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 080319B. Crtkana plava vertikalna linija predstavlja maksimalnu udaljenost Leike et al. (2020) podataka na doglednici (slika 3.19).

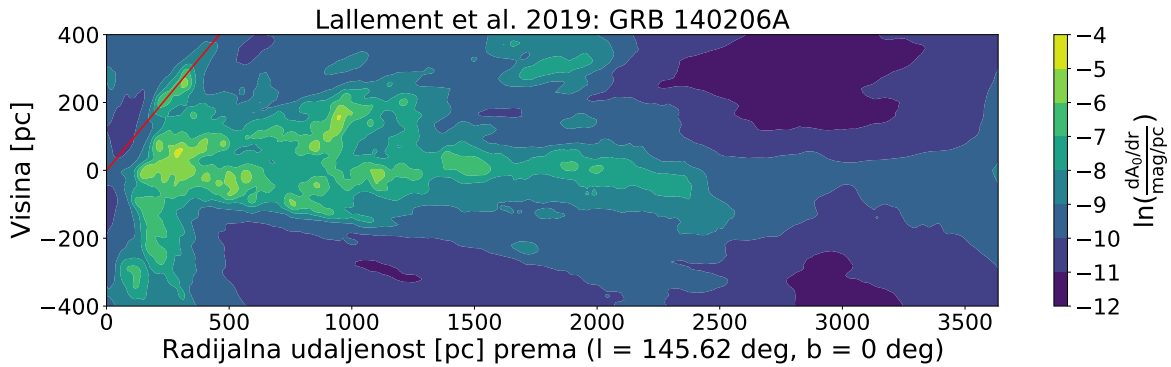


Slika 3.21: 2D presjek raspodjele ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) okomito na ravninu galaksije u smjeru bljeska gama-zračenja GRB 080319B. Visina se mjeri s obzirom na položaj ravnine galaksije, a crvena linija predstavlja doglednicu bljeska.

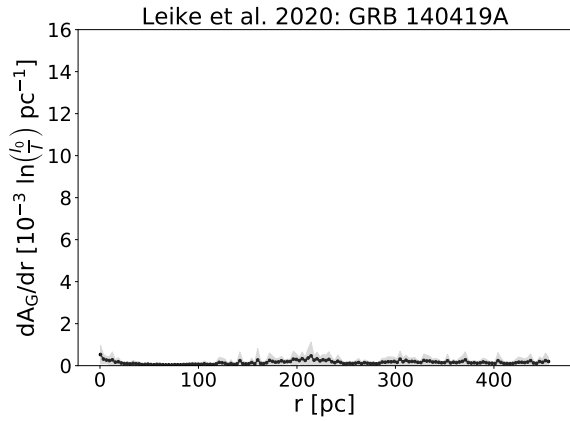


Slika 3.22: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Leike et al. (2020) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 140206A. Srednja vrijednost diferencijalne ekstinkcije označena je crnom linijom dok su pripadne pogreške označene sivom bojom.

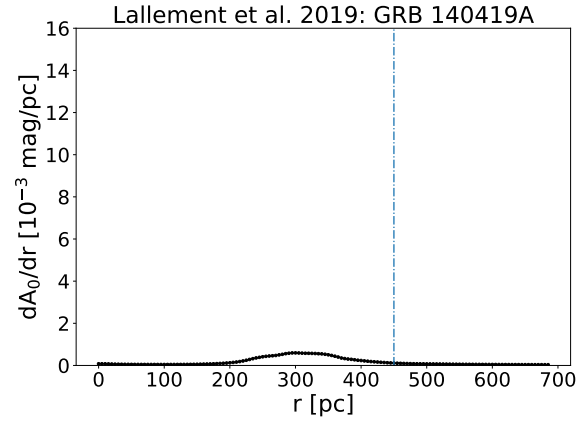
Slika 3.23: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 140206A. Crtkana plava vertikalna linija predstavlja maksimalnu udaljenost Leike et al. (2020) podataka na doglednici (slika 3.22).



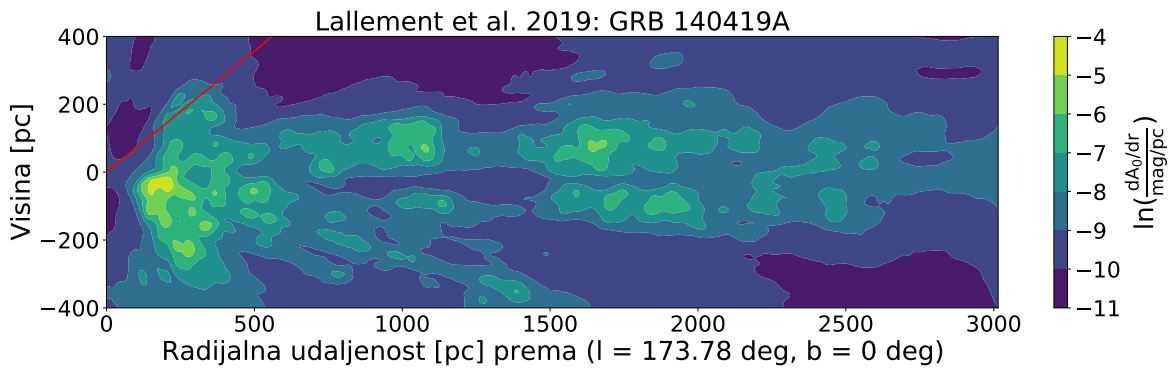
Slika 3.24: 2D presjek raspodjele ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) okomito na ravninu galaksije u smjeru bljeska gama-zračenja GRB 140206A. Visina se mjeri s obzirom na položaj ravnine galaksije, a crvena linija predstavlja doglednicu bljeska.



Slika 3.25: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Leike et al. (2020) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 140419A. Srednja vrijednost diferencijalne ekstinkcije označena je crnom linijom dok su pripadne pogreške označene sivom bojom.



Slika 3.26: Raspodjela diferencijalne ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) duž doglednice bljeska gama-zračenja GRB 140419A. Crtkana plava vertikalna linija predstavlja maksimalnu udaljenost Leike et al. (2020) podataka na doglednici (slika 3.25).



Slika 3.27: 2D presjek raspodjele ekstinkcije podataka Lallement et al. (2019) okomito na ravninu galaksije u smjeru bljeska gama-zračenja GRB 140419A. Visina se mjeri s obzirom na položaj ravnine galaksije, a crvena linija predstavlja doglednicu bljeska.

4 GRB 140206A

4.1 Metoda detekcije prstena

Metoda detekcije prstena koja se koristi u ovom radu bazira se na metodi koja se koristila u člancima Tiengo & Mereghetti (2006) [30] i Pintore et al. (2017) [29]. Umjesto promatranja slika prstena u vremenu kao primjerice na slici 1.10, konstruira se takozvana dinamička slika (engl. *dynamical image*). Za to nam je potrebna promjena koordinata svakog fotona iz x_i , y_i i t_i (koordinate položaja na detektoru te vrijeme detekcije danog fotona) u [Tiengo & Mereghetti, 2006 [30]]:

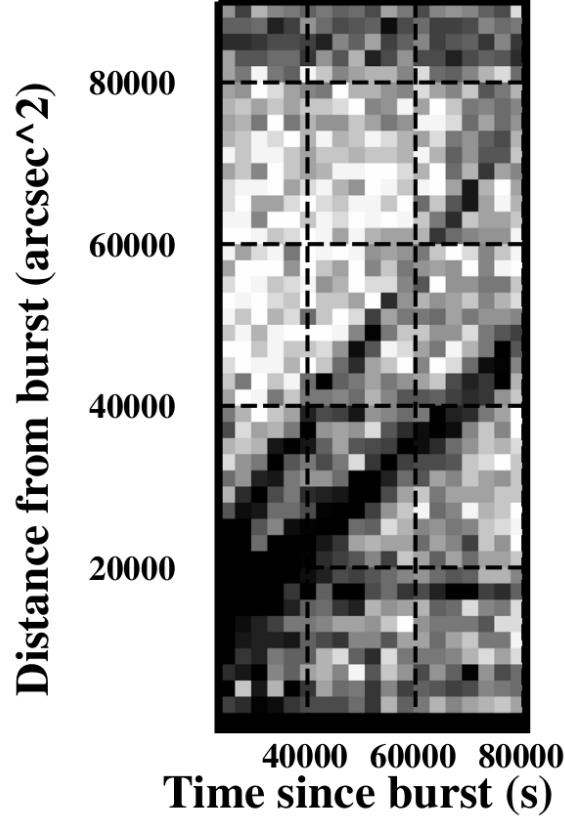
$$\begin{aligned} X_i &\equiv t_i - t_0 = T_i \\ Y_i &\equiv (x_i - x_B)^2 + (y_i - y_B)^2 = \Theta_i^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

gdje je t_0 vrijeme detekcije bljeska, a x_B i y_B koordinate bljeska na detektoru. Svaka točka na dinamičkoj slici odgovara kutnoj udaljenosti od pozicije bljeska gama-zračenja te vremenu zakašnjenja s obzirom na isti. Fiksirani nebeski objekti se na ovoj slici prikazuju kao horizontalne linije, dok se vremenski evoluirajući prsten s centrom u poziciji bljeska prikazuje kao nagnuti pravac čiji je koeficijent inverzno proporcionalan udaljenosti do prašine na kojoj se događa raspršenje (pogledati poglavlje 1.3). Primjer dinamičke slike se može vidjeti na slici 4.1. Na slici su jasno vidljiva dva nagnuta pravca koji odgovaraju dvama prstenovima formiranih raspršenjem na prašini udaljenoj otprilike 900 pc i 1400 pc.

Kako bi se odredila udaljenost oblaka prašine, za svaki se detektirani foton računa sljedeća veličina [Tiengo & Mereghetti, 2006 [30]]:

$$D_i = \frac{2cT_i}{\Theta_i^2} = 827 T_i[\text{s}] \Theta_i^{-2}[\text{arcsec}^{-2}] \text{ pc} . \quad (4.2)$$

Raspršeni fotoni koji formiraju prsten zadovoljavaju jednadžbu 1.18 za razliku od pozadinskih fotona iz drugih izvora u promatranom polju. Zbog ovoga će se crtanjem distribucije $n(D)$ vrijednosti D_i , prsten prikazati kao vrh centriran na udaljenosti oblaka prašine d . Primjer ovakve distribucije za bljesak gama-zračenja GRB 031203 se nalazi na slici 4.2. Distribucija udaljenosti $n(D)$ u ovoj se metodi računa grupiranjem vrijednosti D_i tako da u svakom intervalu bude neki zadani broj N detekcija nakon čega se ovaj broj dijeli s duljinom pojedinog intervala. Pogreška je stoga jed-



Slika 4.1: Dinamička slika bljeska gama-zračenja GRB 031203 dobivena koristeći podatke s XMM-Newton teleskopa. [Izvor: Tiengo & Mereghetti, 2006 [30]]

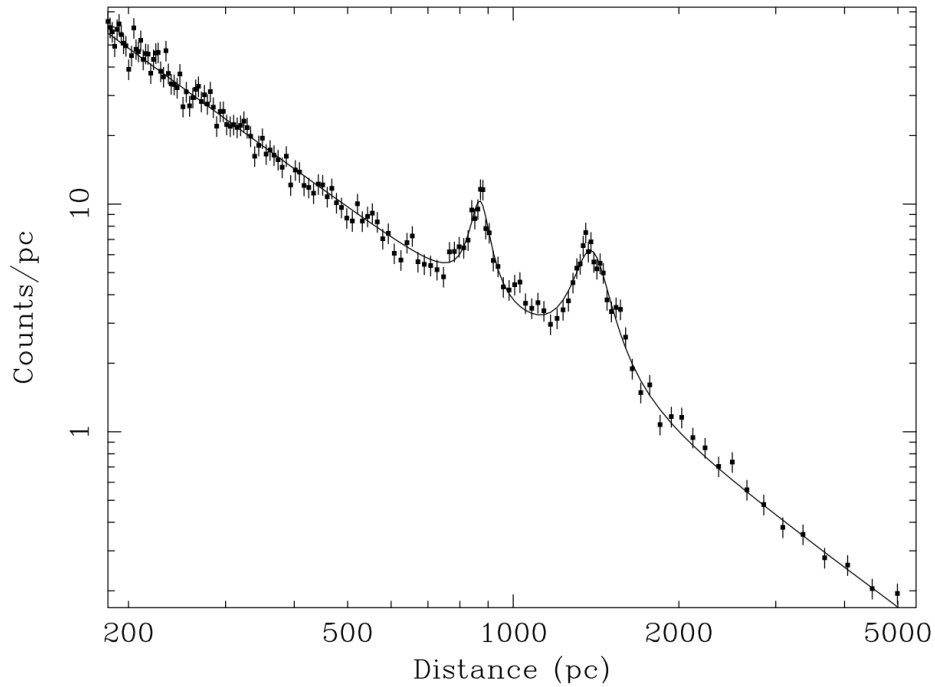
naka pogreški prilikom brojanja N fotona, odnosno jednaka je \sqrt{N} . Drugim riječima, vrijedi:

$$n_j(D) = \frac{N}{D_j^{\max} - D_j^{\min}} \pm \frac{\sqrt{N}}{D_j^{\max} - D_j^{\min}} \quad (4.3)$$

gdje je $n_j(D)$ jedna točka na grafu na slici 4.2, a D_j^{\max} i D_j^{\min} najveći i najmanji iznos D_i koji spada u dani j -ti interval. Uniformna pozadina daje doprinos proporcionalan D^{-2} u rasponu od $D_{\min} = 2cT_{\max}/\Theta_{\max}^2$ do $D_{\max} = 2cT_{\min}/\Theta_{\min}^2$, gdje T_{\min} , T_{\max} , Θ_{\min} i Θ_{\max} označavaju kvadratni dio dinamičke slike iz kojeg su uzeti promatrani fotoni. Prilagodba se stoga radi uzimajući zbroj zakona potencije (za čiji se indeks očekuje vrijednost otprilike -2) i jednog ili više Lorentziana kojima se određuju konačne udaljenosti oblaka prašine na doglednici. Funkcija prilagodbe je stoga jednaka:

$$f(x) = Ax^k + \sum_i \frac{A_i^L}{\pi} \frac{\frac{1}{2}w_i}{(x - x_{0i})^2 + (\frac{1}{2}w_i)^2} \quad (4.4)$$

gdje suma ide po oblacima prašine duž doglednice. U gornjoj jednadžbi srednja vrijednost Lorentziana x_{0i} odgovara udaljenosti oblaka prašine od nas, dok je njegova



Slika 4.2: Distribucija $n(D)$ za bljesak gama-zračenja GRB 031203 dobivena uzimajući fotone sa $1' < \Theta < 10'$ iz dinamičke slike (slika 4.1). Podaci su grupirani tako da se u svakom intervalu nalazi 100 detekcija. Prilagodba se sastoji od zbroja zakona potencije (engl. *power-law*) s indeksom -1.77 i dva Lorentziana centrirana u 870 pc i 1384 pc. [Izvor: Tiengo & Mereghetti, 2006 [30]]

širina w_i povezana s nekoliko parametara: duljinom pulsa bljeska gama-zračenja, širinom oblaka duž doglednice te kutnom rezolucijom samog detektora.

Primjer prikazan na slikama 4.1 i 4.2 prikazuje primjenu ove metode na podatke sa XMM-Newton satelita. Pošto se u ovom radu koriste podaci sa Swift satelita, treba se uzeti u obzir bitna razlika u orbitama ovih satelita. Period orbite XMM-Newton satelita iznosi 2789.9 minute, dok isti za Swift iznosi samo 95.74 minute. Swift satelit stoga u jednom danu napravi otprilike 15 orbita oko Zemlje zbog čega isti često ne može snimati jedan dio neba kontinuirano duž vremena koje nam je potrebno za detekciju prstena (prosječno nekoliko sati). Zbog ovog će nam podaci sa Swift satelita biti podijeljeni na disjunktne intervale u vremenu na koje ćemo odvojeno morati primjenjivati gore objašnjenu metodu. Odnosno, za svaki će se interval pojedinačno računati distribucije $n(D)$ na koje će se istovremeno prilagođavati individualni zakoni potencije (pozadina se mijenja između intervala) i Lorentziani s individualnim amplitudama, no s fiksiranom srednjom vrijednošću (udaljenošću do prašine) i širinom.

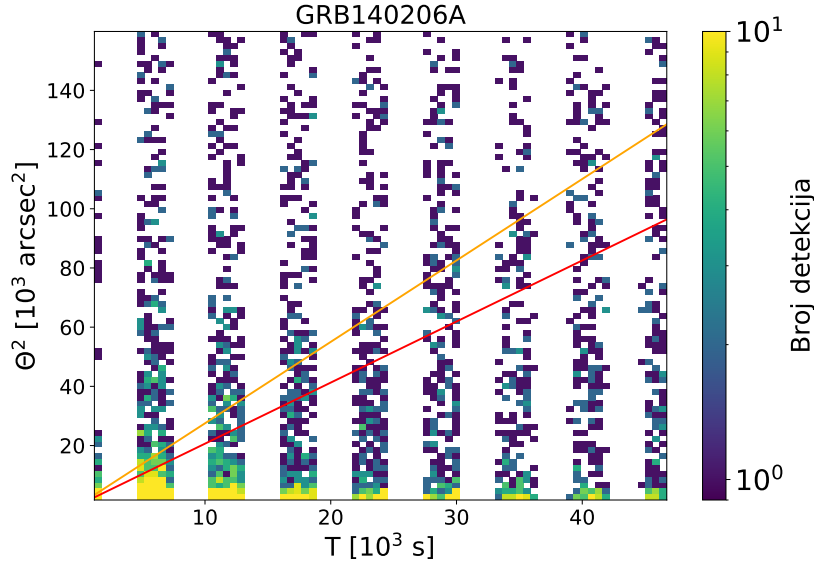
4.2 *Rezultati detekcije prstena oko bljeska gama-zračenja GRB 140206A*

Prateći metodu objašnjenu u prijašnjem poglavlju 4.1, pokušala se pronaći detekcija prstena X-zračenja oko bljeska gama-zračenja GRB 140206A. Analiza se provela za tri intervala energija: [0.2, 2] keV, [0.2, 3] keV i [0.2, 5] keV. Najbolji se rezultat dobio za energetski interval [0.2, 5] keV te će se pripadni rezultati prikazati u ovom poglavlju.

Analizirali su se podaci iz prvog opažanja koje u sebi sadrži 9 orbita satelita Swift (do otprilike 13 sati nakon bljeska). Skinuti su se podaci prvo morali kalibrirati, pročistiti, a zatim i filtrirati za što se koristio programski paket *HEASoft*⁶. Za kalibraciju se i čišćenje koristila naredba *xrtpipeline* koja koristi najnovije skripte za pročišćavanje podataka te kao rezultat izbacuje novu (pročišćenu i kalibriranu) datoteku događaja (engl. *event file*). Nadalje, za filtriranje podataka iz dobivene datoteke, koristila se naredba *xselect* kojom su se filtrirale energije u željenim intervalima te takozvane ocjene (engl. *grades*) podataka u rangu 0 - 12. Ocjene se koriste za prepoznavanje događaja uzrokovanih nabijenim česticama i za dobivanje potrebne rezolucije u energiji te se definiraju u rasponu diskretnih vrijednosti 0 - 32 [The SWIFT XRT Data Reduction Guide [36]]. Filtrirani su podaci spremljeni u novu datoteku događaja koja se nadalje koristi za analizu pronalaska prstena koristeći programski jezik *Python*.

Za dobivanje dinamičke slike ovog bljeska koristili su se podaci između 40" i 400" od položaja bljeska kako bi se minimizirao doprinos zračenja iz samog bljeska te rubni efekti. Pripadna se dinamička slika nalazi na slici 4.3. Gledajući slike 3.22 i 3.23 očekujemo raspršenje na prašini koja se nalazi na udaljenostima otprilike 300 pc i 400 pc te su doprinosi ovakvih slojeva prašine označeni narančastom i crvenom linijom na dinamičkoj slici. Duž narančaste se linije može vidjeti mogući lagani doprinos u nekoliko orbita Swift teleskopa između otprilike 15 000 i 37 000 sekundi. U orbitama prije 15 000 s je mogući prsten preblizu samog bljeska te je zasjenjen. S druge strane, prsten se u nekom trenutku raspline (kada kut promatranog raspršenja postane prevelik i nepovoljan) zbog čega smo odabrali gornju granicu vremena kojeg promatramo po zadnjem intervalu u kojem se vidi signal. Vidljivost signala se

⁶<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/heasoft/>



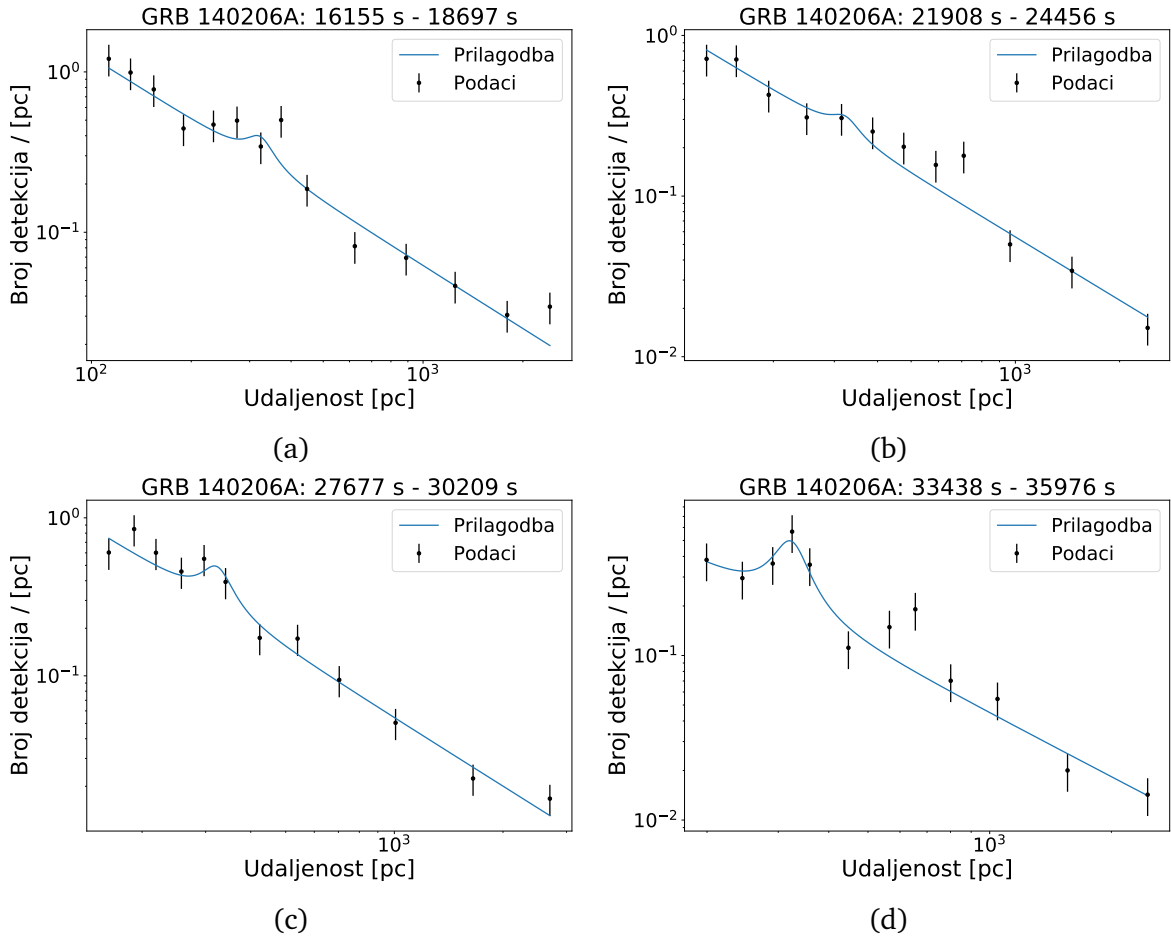
Slika 4.3: Dinamička slika bljeska gama-zračenja GRB 140206A dobivena selekcijom podataka između 40" i 400" od položaja bljeska. Narančasta i crvena linija prikazuju prstenove koji bi se formirali raspršenjem na prašini na udaljenosti 300 i 400 pc, respektivno.

promatrala pomoću distribucija udaljenosti kao na slici 4.2. Nadalje, uzimajući 4 orbite koje spadaju u ovaj interval u vremenu, napravila se istovremena prilagodba distribucija udaljenosti uzimajući $N = 20$ za prva tri intervala te $N = 15$ za zadnji interval. U zadnjem intervalu je broj detekcija manji pa je potrebno uzeti i manji broj N kako bi se sačuvala informacija o signalu prstena. Vezani parametri prilikom prilagodbe su srednja vrijednost Lorentziana (udaljenost oblaka) te širina Lorentziana pošto su isti povezani s fizikalnim veličinama raspršenja. Parametri zakona potencije se mijenjaju među orbitama što nije neočekivano jer je to zapravo potpis pozadine koja je promjenjiva. Velike greške ovih parametara su posljedica promatranja kratkog vremenskog intervala, odnosno malog broja detekcija zbog čega su odstupanja od zakona potencije veća.

Rezultati prilagodbe se nalaze na slici 4.4, a pripadni se parametri nalaze u tablici

(a)	(b)	(c)	(d)
$A_a = 500 \pm 200$	$A_b = 500 \pm 200$	$A_c = 1100 \pm 700$	$A_d = 300 \pm 300$
$k_a = -1.30 \pm 0.08$	$k_b = -1.30 \pm 0.08$	$k_c = -1.4 \pm 0.1$	$k_d = -1.3 \pm 0.2$
$A_a^L = 20 \pm 10$	$A_b^L = 10 \pm 10$	$A_c^L = 30 \pm 20$	$A_d^L = 40 \pm 20$
$x_0 = d = (320 \pm 10) \text{ pc}$			
$w = (80 \pm 40) \text{ pc}$			

Tablica 4.1: Parametri prilagodbi sa slike 4.4. Korištene su oznake iz jednadžbe 4.4.



Slika 4.4: Distribucije udaljenosti za 4 promatrane orbite s pripadnim prilagodbama. Uzeti su podaci između 100 i 3000 pc kako bi se smanjio utjecaj nehomogenosti pozadine (varijacija koeficijenta zakona potencije).

4.1. Dobivena udaljenost oblaka je dobro određena s relativnom pogreškom od 3.1% te je u skladu s predviđanjima 3D raspodjela ekstinkcije sa slika 3.22 i 3.23. S druge strane, treba pogledati koliko je naš signal značajan s obzirom na pozadinu. Relativne greške amplituda Lorentziana su redom $R_{A_a^L} = 50\%$, $R_{A_b^L} = 100\%$, $R_{A_c^L} = 66.7\%$ i $R_{A_d^L} = 50\%$. Ove pogreške su velike što znači da naš signal nije jako značajan s obzirom na pozadinu te možemo zaključiti da je prsten, ako uopće postoji, vrlo slabo vidljiv.

Iako je sama detekcija prstena iz podataka X-zračenja nedovoljno pouzdana, u prilog ovom rezultatu ide predviđanje oblaka prašine iz 3D raspodjela ekstinkcije na jednakoj udaljenosti. Za dobivanje dodatnih informacija o ovom području, pogledali smo i podatke LOFAR i Planck teleskopa čiji su rezultati prikazani u idućem potpoglavlju.

4.3 Okolina položaja bljeska gama-zračenja GRB 140206A iz podataka LOFAR i Planck teleskopa

Kako bi se napravila usporedba podataka Planck i LOFAR teleskopa, uzeli su se podaci iz okolice položaja bljeska gama-zračenja GRB 140206A veličine $10^\circ \times 10^\circ$ za oba seta podataka. Pripadna Faradayeva kocka je dio mozaika koji će uskoro biti objavljen u članku Erceg et al. te sadrži raspon Faradayevih dubina od -30 rad/m^2 do 30 rad/m^2 . Za samu usporedbu, iz Faradayeve se kocke izračunao maksimum polariziranog intenziteta duž osi Faradayeve dubine za svaki prostorni piksel čime se dobila 2D slika maksimalnih vrijednosti polariziranog intenziteta na spomenutom području. Ovime dobivamo informaciju o orijentiranosti depolarizacijskih kanala (engl. *depolarization canals*) koji definiraju područja na nebu bez polariziranog zračenja. Depolarizacijski kanali su većinom linearne strukture te nastaju u mediju u kojem su istovremeno prisutni relativistički i termalni elektroni [Shukurov & Berkhuisen, 2003 [47]]. Zbog prisutnosti se relativističkih elektrona duž danog medija emitira sinkrotronsko zračenje koje je istovremeno zbog prisutnosti termičkih elektrona izloženo Faradayevoj rotaciji do izlaska iz medija. Ovaj se efekt naziva diferencijalna Faradayeva rotacija (engl. *differential Faraday rotation*) čija je posljedica depolarizacija svjetlosti. Depolarizacijski kanali su stoga potpis ionizirane međuzvezdane tvari. S druge strane, sinkrotronska emisija koju opažamo nastaje u dijelovima međuzvezdane tvari u kojoj nema puno termalnih elektrona i općenito ionizirane tvari, odnosno nastaje u neutralnim područjima međuzvezdane tvari [Van Eck et al., 2017 [48]]. Ovo su područja koja nas zanimaju iz razloga što se većina prašine nalazi upravo u neutralnoj međuzvezdanoj tvari [Planck Collaboration, 2011 [49]].

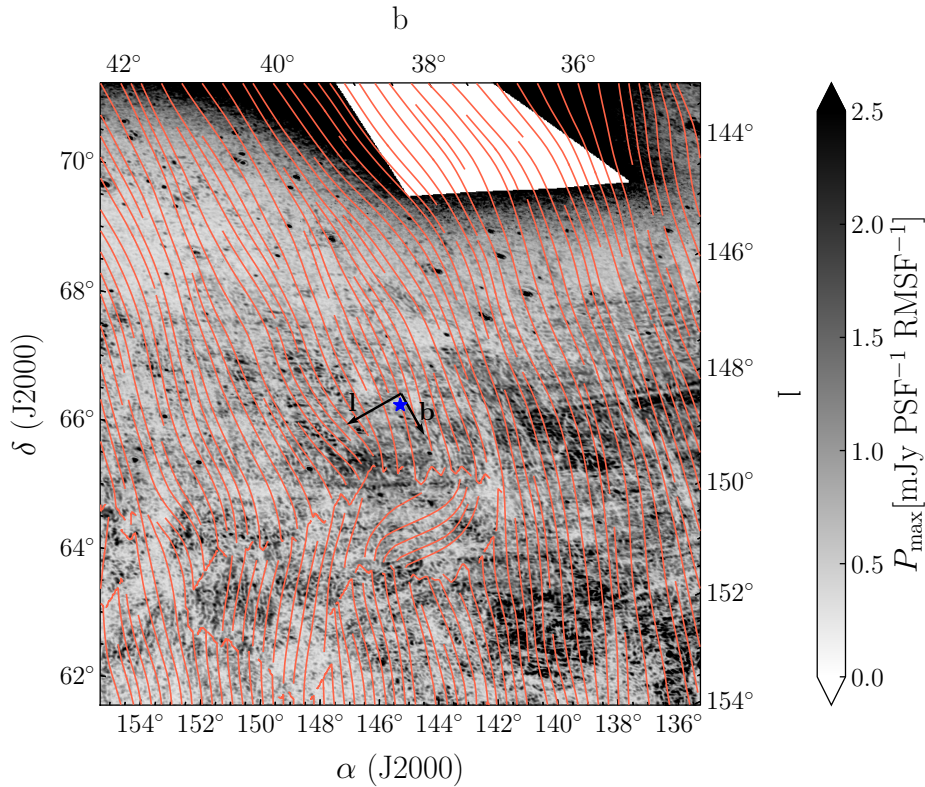
S druge strane, iz Planckovih se podataka za isti dio neba koristeći Stokesove parametare Q i U dobila orijentacija magnetskog polja koristeći jednadžbu:

$$2\psi = \arctan \frac{Q}{U} \quad (4.5)$$

gdje je ψ kut orijentacije polarizacije svjetlosti. Orijetacija se magnetskog polja nadalje dobila koristeći:

$$\chi = \psi + \frac{\pi}{2}. \quad (4.6)$$

Poravnavanje depolarizacijskih kanala s orijentacijom magnetskog polja je već ra-



Slika 4.5: Graf maksimalnog intenziteta polariziranog sinkrotronskog zračenja s magnetskim silnicama dobivenim iz emisijskog zračenja prašine na području $10^\circ \times 10^\circ$ oko položaja bljeska gama-zračenja GRB 140206A (plava zvjezdica na grafu).

nije opaženo u radu Jelić et al. (2018) [50] u polju 3C 196. Poravnavanje ovih struktura nam govori da je sinkrotronsko zračenje koje uzrokuje prozore depolarizacije pod utjecajem magnetskog polja te da je to magnetsko polje upravo ono koje uzrokuje poravnavanje zrnaca prašine. Odnosno, ovaj efekt daje indicaciju da depolarizacijski kanali nastaju u istoj međuzvezdanoj tvari u kojoj se nalazi i emitirajuća prašina.

Ovaj se efekt potražio i na polju u okolici bljeska gama-zračenja GRB 140206A izradom grafa koji obuhvaća raspodjelu maksimalnog polariziranog intenziteta iz Faradayeve kocke te silnice magnetskog polja dobivene promatranjem emisijskog zračenja zrnaca prašine iz podataka Planck satelita. Pripadni se graf nalazi na slici 4.5. Na grafu se može vidjeti relativno dobro poravnavanje depolarizacijskih kanala s orijentacijom magnetskog polja iz čega možemo zaključiti da sinkrotronska emisija koju promatramo vjerojatno nastaje u istoj neutralnoj međuzvezdanoj tvari u kojoj se nalazi emitirajuća prašina. Nadalje, s obzirom da polarizirano sinkrotronsko zračenje koje opažamo LOFAR teleskopom nastaje na udaljenosti $\lesssim 500$ pc (zračenje izvana se većinom depolarizira, pogledati npr. Turić et al., 2021 [51]) možemo reći da je

emisija prašine opažana Planck teleskopom vjerojatno nastala također na udaljenostima manjim od 500 pc. Ovo ide u korist predviđanjima 3D raspodjela ekstinkcije te X-zračenja satelita Swift koja predviđaju oblak prašine na udaljenosti od otprilike 320 pc.

5 Zaključak

Međuzvezdana se prašina može promatrati na razne načine zbog čega je bitno testirati njihovu međusobnu konzistentnost. Ovaj je rad u tu svrhu istražio konzistentnost mjerenja udaljenosti do oblaka prašine koristeći prsten X-zračenja koji se formira oko bljeskova gama-zračenja raspršenjem na prašini u Mliječnom putu s nekoliko drugih nezavisnih mjerenja međuzvezdane tvari. Koristile su se dvije 3D raspodjele međuzvezdane prašine dobivene promatranjima ekstinkcije u vidljivom području velikog broja zvijezda u našoj okolini te promatranja ionizirane međuzvezdane tvari radioteleskopa LOFAR i promatranja infracrvenog emisijskog zračenja prašine teleskopa Planck.

Usporedba dvaju 3D raspodjela ekstinkcije (Lallement et al. (2019) [38] i Leike et al. (2020) [39]) dala je vrlo dobro slaganje ovih raspodjela uzimajući u obzir razlike u njihovim rezolucijama. Također se dobilo vrlo dobro poklapanje ovih raspodjela s dosadašnjim mjerenjima udaljenosti pomoću promatranja prstenova X-zračenja oko bljeskova gama-zračenja što nam je omogućilo predviđanje moguće nove detekcije prstena X-zračenja oko bljeskova za koje se isti još nije pronašao. U ovu smo svrhu selektirali bljeskove gama-zračenja koristeći kriterije koji osiguravaju dovoljnu količinu prašine na doglednici te dovoljno sjajan bljesak. Provođenjem selekcije odabrana su tri bljeska gama-zračenja za koja su se prvo promotrile doglednice koristeći 3D raspodjele ekstinkcije. Za jedan su od ovih bljeskova (GRB 140206A) raspodjele pokazale vrh diferencijalne ekstinkcije na udaljenosti od otprilike 300 pc zbog čega smo odlučili provesti analizu podataka X-zračenja satelita Swift u svrhu pronalaska prstena.

Analiza podataka X-zračenja je dala vrlo dobro određenu udaljenost (3.1%) oblaka prašine na udaljenosti od 320 pc što se vrlo dobro slaže s predviđanjima 3D raspodjela ekstinkcije. Nažalost, relativne pogreške jakosti našeg signala su vrlo velike ($\geq 50\%$) što znači da isti nije mnogo značajniji od varijacija pozadine. Kako bi se dalje istražila prašina na doglednici ovog bljeska koristili su se podaci radioteleskopa LOFAR i teleskopa Planck.

Usporedbom orijentacije depolariziranih kanala sinkrotronskog zračenja iz podataka LOFAR radioteleskopa s orijentacijom magnetskog polja dobivenom teleskopom Planck, dobilo se dobro slaganje. Ovaj nam rezultat daje indiciju da je emisija

promatrana radioteleskopom LOFAR povezana s emisijom koju promatra teleskop Planck, odnosno da iste vjerojatno nastaju u istom oblaku međuzvezdane tvari. Znajući da radioteleskop LOFAR promatra emisiju nastalu na udaljenostima $\lesssim 500$ pc, ovaj nam rezultat daje dobru podršku prijašnjem rezultatu o oblaku prašine na udaljenosti od 320 pc.

Provedenom analizom možemo zaključiti da je metoda mjerenja udaljenosti promatranjem vremenske evolucije prstena X-zračenja oko bljeskova gama-zračenja konzistentna s mjerenjima udaljenosti korištenjem promatranja ekstinkcija zvijezda u vidljivom području spektra. Ovaj rezultat nam omogućava nov način predviđanja formacije prstenova X-zračenja koji se može koristiti zajedno s kriterijima stupčaste gustoće i toka zračenja za selekciju novih kandidata bljeskova gama-zračenja. 3D raspodjele ekstinkcije nam daju dodatne korisne informacije kao što su gustoća oblaka te njihov položaj za razliku od same stupčaste gustoće. Predviđa se da će ovakav napredak u selekciji bljeskova gama-zračenja ubrzati pronalaženje novih prstenova X-zračenja koji nam omogućavaju vrlo precizno mjerenje udaljenosti do oblaka prašine. Nadalje, ovakvim bi preciznim mjerenjima mogli u budućnosti unaprijediti i same 3D raspodjele ekstinkcije.

Literatura

- [1] Draine, B. T. Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium, 2011.
- [2] Swinburne University of Technology, <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/d/Dust+Grain>, 29.5.2021.
- [3] Dresselhaus, M. S. SOLID STATE PHYSICS PART II Optical Properties of Solids, 1999.
- [4] Weingartner, J. C.; Draine, B. T. Dust Grain-Size Distributions and Extinction in the Milky Way, Large Magellanic Cloud, and Small Magellanic Cloud. // ApJ. Vol. 548, 1 (2001), str. 296–309.
- [5] Li, A.; Draine, B. T. Infrared Emission from Interstellar Dust. II. The Diffuse Interstellar Medium. // ApJ. Vol. 554, 2 (2001), str. 778–802.
- [6] Li, A.; Draine, B. T. Do the Infrared Emission Features Need Ultraviolet Excitation? The Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Model in UV-poor Reflection Nebulae. // ApJ. Vol. 572, 1 (2002), str. 232–237.
- [7] Draine, B. T. Scattering by Interstellar Dust Grains. I. Optical and Ultraviolet. // ApJ. Vol. 598, 2 (2003), str. 1017–1025.
- [8] Draine, B. T.; Tan, J. C. The Scattered X-Ray Halo around Nova Cygni 1992: Testing a Model for Interstellar Dust. // ApJ. Vol. 594, 1 (2003), str. 347–362.
- [9] Draine, B. T. Scattering by Interstellar Dust Grains. II. X-Rays. // ApJ. Vol. 598, 2 (2003), str. 1026–1037.
- [10] Ritz, S. M.; Gehrels, N.; McEnery, J. E. et al. Fermi (formerly GLAST) Mission Overview. American Astronomical Society Meeting Abstracts #213 2009 Vol. 213 of American Astronomical Society Meeting Abstracts str. 468.01.
- [11] Gehrels, N.; Chincarini, G.; Giommi, P. et al. The Swift Gamma-Ray Burst Mission. // ApJ. Vol. 611, 2 (2004), str. 1005–1020.
- [12] Winkler, C.; Pace, O.; Volonté, S. INTEGRAL - the International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory.. // ESA Journal. Vol. 17, 3 (1993), str. 207–223.

- [13] Aptekar, R. L.; Frederiks, D. D.; Golenetskii, S. V. et al. Konus-W Gamma-Ray Burst Experiment for the GGS Wind Spacecraft. // *Space Science Reviews*. Vol. 71, 1-4 (1995), str. 265–272.
- [14] Lorenz, E.; Martinez, M. The Magic telescope. // *Astronomy & Geophysics*. Vol. 46, 6 (2005), str. 6.21–6.25.
- [15] Ormes, J. F.; Streitmatter, R. E. A High Energy Space Station (HESS) Array for Studying Extremely Energetic Cosmic Rays. Jones, W. V.; Wefel, J. P. (editors) *Cosmic Ray and High Energy Gamma Ray Experiments for the Space Station Era 1985* str. 340.
- [16] Klebesadel, R. W.; Strong, I. B.; Olson, R. A. Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin. // *ApJL*. Vol. 182 (1973), str. L85.
- [17] Boella, G.; Butler, R. C.; Perola, G. C. et al. BeppoSAX, the wide band mission for X-ray astronomy. // *A&AS*. Vol. 122 (1997), str. 299–307.
- [18] Metzger, M. R.; Djorgovski, S. G.; Kulkarni, S. R. et al. Spectral constraints on the redshift of the optical counterpart to the γ -ray burst of 8 May 1997. // *Nature*. Vol. 387, 6636 (1997), str. 878–880.
- [19] Le, T.; Mehta, V. Revisiting the redshift distribution of gamma-ray bursts in the swift era. // *The Astrophysical Journal*. Vol. 837, 1 (2017), str. 17.
- [20] Horváth, I. A further study of the BATSE Gamma-Ray Burst duration distribution. // *A&A*. Vol. 392 (2002), str. 791–793.
- [21] Nakar, E. Short-hard gamma-ray bursts. // *PhysRep*. Vol. 442, 1-6 (2007), str. 166–236.
- [22] Bhat, P. N. Variability Time Scales of Long and Short GRBs. // arXiv e-prints. Vol. arXiv (2013), str. arXiv:1307.7618.
- [23] Kumar, P.; Zhang, B. The physics of gamma-ray bursts & relativistic jets. // *PhysRep*. Vol. 561 (2015), str. 1–109.
- [24] Briggs, M. S.; Band, D. L.; Kippen, R. M. et al. Observations of GRB 990123 by the Compton Gamma Ray Observatory. // *ApJ*. Vol. 524, 1 (1999), str. 82–91.

- [25] Band, D.; Matteson, J.; Ford, L. et al. BATSE Observations of Gamma-Ray Burst Spectra. I. Spectral Diversity. // *ApJ*. Vol. 413 (1993), str. 281.
- [26] Abdo, A. A.; Ackermann, M.; Arimoto, M. et al. Fermi Observations of High-Energy Gamma-Ray Emission from GRB 080916C. // *Science*. Vol. 323, 5922 (2009), str. 1688.
- [27] Lamb, G. P.; Kobayashi, S. GRB 170817A as a jet counterpart to gravitational wave trigger GW 170817. // *MNRAS*. Vol. 478, 1 (2018), str. 733–740.
- [28] Lumb, D. H.; Schartel, N.; Jansen, F. A. X-ray Multi-mirror Mission (XMM-Newton) observatory. // *Optical Engineering*. Vol. 51, 1 (2012), str. 011009–011009–11.
- [29] Pintore, F.; Tiengo, A.; Mereghetti, S. et al. Behind the dust curtain: the spectacular case of GRB 160623A. // *MNRAS*. Vol. 472, 2 (2017), str. 1465–1472.
- [30] Tiengo, A.; Mereghetti, S. Dust-scattered X-ray halos around gamma-ray bursts: GRB 031203 revisited and the new case of GRB 050713A. // *A&A*. Vol. 449, 1 (2006), str. 203–209.
- [31] Vaughan, S.; Willingale, R.; O’Brien, P. T. et al. The Discovery of an Evolving Dust-scattered X-Ray Halo around GRB 031203. // *ApJL*. Vol. 603, 1 (2004), str. L5–L8.
- [32] Vaughan, S.; Willingale, R.; Romano, P. et al. The Dust-scattered X-Ray Halo around Swift GRB 050724. // *ApJ*. Vol. 639, 1 (2006), str. 323–330.
- [33] Vianello, G.; Tiengo, A.; Mereghetti, S. Dust-scattered X-ray halos around two Swift gamma-ray bursts: GRB 061019 and GRB 070129. // *A&A*. Vol. 473, 2 (2007), str. 423–427.
- [34] van Haarlem, M. P.; Wise, M. W.; Gunst, A. W. et al. Lofar: The low-frequency array. // *A&A*. Vol. 556 (2013), str. A2.
- [35] Mandolesi, N.; Villa, F.; Valenziano, L. The planck satellite. // *Advances in Space Research*. Vol. 30, 9 (2002), str. 2123–2128.
- [36] Capalbi, M.; Perri, M.; Saija, B. et al. The SWIFT XRT Data Reduction Guide, 2005.

- [37] LOFAR Surveys: Current observation and processing status, <https://lofar-surveys.org/status.html>, 16.6.2021.
- [38] Lallement, R.; Babusiaux, C.; Vergely, J. L. et al. Gaia-2MASS 3D maps of Galactic interstellar dust within 3 kpc. // *A&A*. Vol. 625 (2019), str. A135.
- [39] Leike, R. H.; Glatzle, M.; Enßlin, T. A. Resolving nearby dust clouds. // *A&A*. Vol. 639 (2020), str. A138.
- [40] Gaia Collaboration; Brown, A. G. A.; Vallenari, A. et al. Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties. // *A&A*. Vol. 616 (2018), str. A1.
- [41] Skrutskie, M. F.; Cutri, R. M.; Stiening, R. et al. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). // *AJ*. Vol. 131, 2 (2006), str. 1163–1183.
- [42] Anders, F.; Khalatyan, A.; Chiappini, C. et al. Photo-astrometric distances, extinctions, and astrophysical parameters for Gaia DR2 stars brighter than $G = 18$. // *A&A*. Vol. 628 (2019), str. A94.
- [43] Cutri, R. M.; Wright, E. L.; Conrow, T. et al. VizieR Online Data Catalog: AllWISE Data Release (Cutri+ 2013). // *VizieR Online Data Catalog*. II/328.
- [44] Chambers, K. C.; Magnier, E. A.; Metcalfe, N. et al. The Pan-STARRS1 Surveys. // *arXiv e-prints*. Vol. arXiv (2016), str. arXiv:1612.05560.
- [45] Knollmüller, J.; Enßlin, T. A. Metric Gaussian Variational Inference. // *arXiv e-prints*. Vol. arXiv (2019), str. arXiv:1901.11033.
- [46] Brentjens, M. A.; de Bruyn, A. G. Faraday rotation measure synthesis. // *A&A*. Vol. 441, 3 (2005), str. 1217–1228.
- [47] Shukurov, A.; Berkhuijsen, E. M. Faraday ghosts: depolarization canals in the Galactic radio emission. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. Vol. 342, 2 (2003), str. 496–500.
- [48] Van Eck, C. L.; Haverkorn, M.; Alves, M. I. R. et al. Faraday tomography of the local interstellar medium with LOFAR: Galactic foregrounds towards IC 342. // *A&A*. Vol. 597 (2017), str. A98.

- [49] Planck Collaboration Planck early results. xxiv. dust in the diffuse interstellar medium and the galactic halo. // A&A. Vol. 536 (2011), str. A24.
- [50] Jelić, V.; Prelogović, D.; Haverkorn, M. et al. Magnetically aligned straight depolarization canals and the rolling Hough transform. // A&A. Vol. 615 (2018), str. L3.
- [51] Turić, L.; Jelić, V.; Jaspers, R. et al. Multi-tracer analysis of straight depolarization canals in the surroundings of the 3C 196 field. // Predano u A&A.