

Gaia ali kako daleč so zvezde

dr. Tomaž Zwitter

Fakulteta za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani

Povzetek

Razumevanje strukture in razvoja vesolja ni mogoče, če ne poznamo oddaljenosti opazovanih objektov. Te ni lahko izmeriti, zato je bila še pred 25 leti lestvica vesoljskih razdalj precej negotova. V 90. letih je satelit Hipparcos Evropske vesoljske agencije metodološko neoporečno izmeril razdaljo do 118 tisoč bližnjih in relativno svetlih zvezd. Decembra 2013 je ista agencija izstrelila satelit Gaia, ki s svojimi uspehi v temeljih spreminja naše poznavanje vesolja. Lani smo objavili razdalje do dveh milijonov zvezd, čez dobro leto sledi objava veliko točnejših razdalj do več kot milijarde zvezd, v naslednjih letih pa se bodo točnim razdaljam do teh zvezd pridružile še meritve njihovih fizikalnih lastnosti in časovne spremenljivosti. Z združevanjem teh dognanj s komplementarnimi pregledi neba z Zemlje smo na pragu poznavanja podrobne slike strukture in nastanka naše Galaksije kot ene od tipičnih galaksij v vesolju.

Ključne besede: satelit Gaia, zvezde, merjenje razdalj v vesolju, satelit Hipparcos, naša Galaksija

Slika 1: Satelit Gaia na ozadju naše Galaksije.

Gaia or How Far Away Are the Stars?

Abstract

Understanding of the structure and evolution of the Universe requires knowledge of the distances of observed objects. This is no easy task, which is why even 25 years ago the cosmic distance scale was rather uncertain. In the nineties the Hipparcos satellite of the European Space Agency took precise measurements of the distance to 118 thousand of the closest and relatively bright stars. In December 2013 the same agency launched the Gaia mission. Its success is a game changer, as far as our understanding of the Universe is concerned. The distances to 2 million stars, which have been published a few months ago, will be followed next year by a list of much more accurate distances to over a billion objects. In the years to come, these will be joined by a publication of detailed physical properties and their temporal variability. By combining this unique dataset with complementary sky surveys from the ground, we are on the verge of obtaining a detailed picture of the structure and formation of our Galaxy, as one of the typical galaxies in our Universe.

Keywords: Gaia satellite, stars, measuring distances in space, Hipparcos satellite, our Galaxy

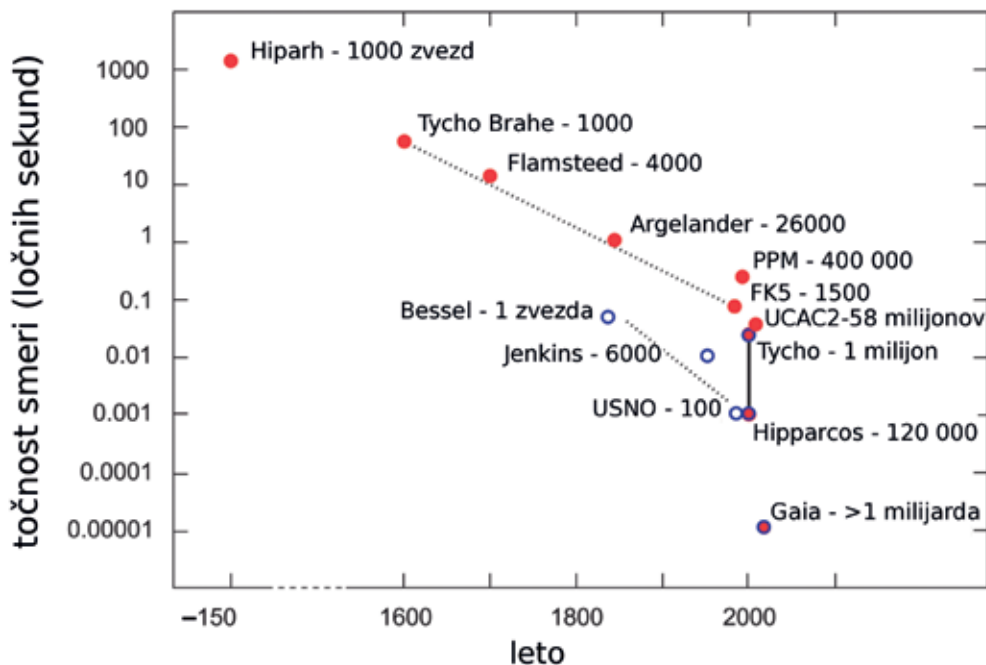
Ko opazujemo nočno nebo, nam je hitro jasno, v kateri smeri vidimo posamezno zvezdo. Če odmislimo vrtenje Zemlje, se zdi, kot da so zvezde z risalnimi žeblički pripete na nebesnem svodu. Vtis je seveda zavajajoč. Zvezde so, tako kot naše Sonce, krogle vročega in sevajočega plina in niso pri miru. V naši okolici so medsebojne hitrosti večine zvezd med 10 in 20 kilometri na sekundo. V primerjavi s hitrostmi, ki jih srečujemo na Zemlji, je to veliko. Ko pa se spomnimo, da je hitrost Zemlje, ki v enem letu potovanja okoli Sonca opiše krog s polmerom 150 milijonov kilometrov, enaka 30 kilometrom na sekundo, se hitrosti medsebojnega gibanja zvezd ne zdijo nekaj posebnega. Vtis o negibnih zvezdah na nebesnem svodu torej poraja domnevo, da so zvezde veliko bolj oddaljene od nas kot Sonce.

Uporaben trik za merjenje razdalj je opazovanje istega objekta z različnih opazovališč. Primerjamo lahko sliki levega in desnega očesa, za večje razdalje se bomo sprehodili po učilnici, razdaljo oddaljenih hribov pomerimo s primerjavo fotografij z opazovališč, ki so glede na smer opazovanega gorovja prečno zamaknjena za več kilometrov. Ker so zvezde daleč, želimo kar največji premik opazovališča. Gibanje Zemlje okoli Sonca nam omogoča, da se naše opazovališče premika z amplitudo polmera Zemljinega tira. Zaradi velike oddaljenosti je letni premik smeri proti zvezdi vseeno zelo majhen in je zato bistveno, da smer merimo čim natančneje.

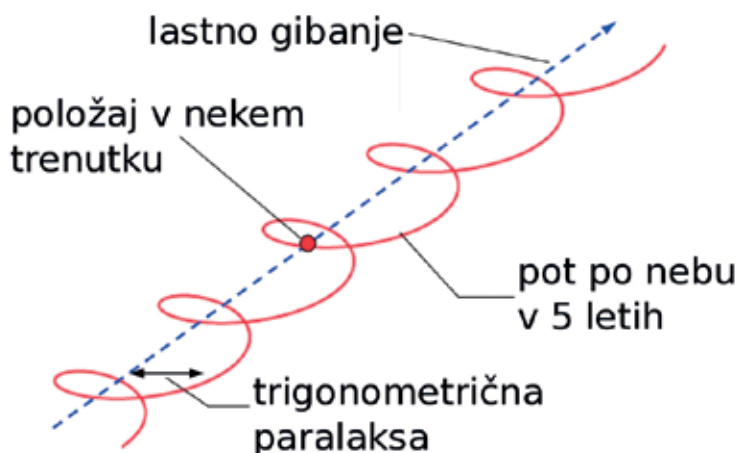
Premikanje zvezde po nebesnem svodu je sestavljeno iz dveh delov. Najprej je tu hitrost zvezde glede na Sonce, ki ima za posledico enakomerno drsenje smeri proti zvezdi, imenujemo ga lastno gibanje zvezde. Najbližjim in najhitrejšim zvezdam se zato smer spremeni za nekaj ločnih sekund letno, pri večini zvezd v naši okolici pa je

premik stokrat ali tisočkrat manjši. Drug del premikanja zvezde je njeno opletanje okrog enakomerno drsečega gibanja. Nastane zaradi kroženja Zemlje okoli Sonca. Amplituda tega opletanja, ki mu pravimo trigonometrična paralaksa, omogoča izračun oddaljenosti zvezde. Trigonometrična paralaksa je vedno zelo majhna in zato težko merljiva. Leta 1838 je prvemu na ta način uspelo določiti razdaljo do kake zvezde astronomu, matematiku in fiziku Friedrichu Besslu. Za zvezdo 61 v ozvezdju Laboda je ugotovil, da njena smer opleta s trigonometrično paralakso 0,314 ločne sekunde, kar ustreza oddaljenosti 10,3 svetlobnih let in je blizu danes sprejeti vrednosti 11,4 svetlobnih let. Ker o gibanju Zemlje okoli Sonca vemo praktično vse, je trigonometrična paralaksa konceptualno zelo čista metoda za merjenje razdalje. Profesionalni astronomi tako razdalj do zvezd ne izražajo v metrih ali svetlobnih letih, ampak v parsekih (pc), pri čemer je parsek razdalja, ki ustreza trigonometrični paralaksi ene ločne sekunde. Lahko uporabimo tudi predpone: 1 kpc = 1000 pc, 1 Mpc = 10^6 pc. Sta pa profesionalna in popularna enota po velikosti podobni: en parsek meri $3 \cdot 10^{16}$ m, medtem ko je svetlobno leto enako $9 \cdot 10^{15}$ m.

Meritev smeri s točnostjo do stotinke ločne sekunde je zahtevno opravilo, ki ga na Astronomskem-geofizikalnem observatoriju na Golovcu vadijo tudi naši študentje. Pri tem se opiram na primerjavo položaja z domnevno bolj oddaljenimi zvezdami na isti sliki, za katere domnevamo, da so njihovi premiki nezaznavno majhni. Meritev, točnejša od stotinke ločne sekunde, z zemeljskega površja ni izvedljiva, saj se smeri proti zvezdam, ko jih gledamo skozi plasti zraka z različnim lomnim količnikom, nenehno spreminjajo. Rešitev je opazovanje s satelita. Meritve smeri, točnejše od stotinke ločne sekunde,



Slika 2: Napredek v natančnosti merjenja položajev (zapolnjene rdeče pike) in oddaljenosti (modro obrobne pike) zvezd. Številka ob imenu je število zvezd v posameznem seznamu.



Slika 3: Smer proti zvezdi se spreminja zaradi premege lastnega gibanja zvezde in zaradi opletajočega paralaktičnega gibanja, ki je posledica Zemljinega kroženja okoli Sonca.

nujno potrebujemo, saj stotinka ločne sekunde ustreza razdalji komaj 100 pc, središče naše Galaksije pa je od nas oddaljeno 8 kpc ali 25 tisoč svetlobnih let. Meritve razdalj onkraj neposredne okolice Sonca torej res zahtevajo opazovanje iz vesolja.

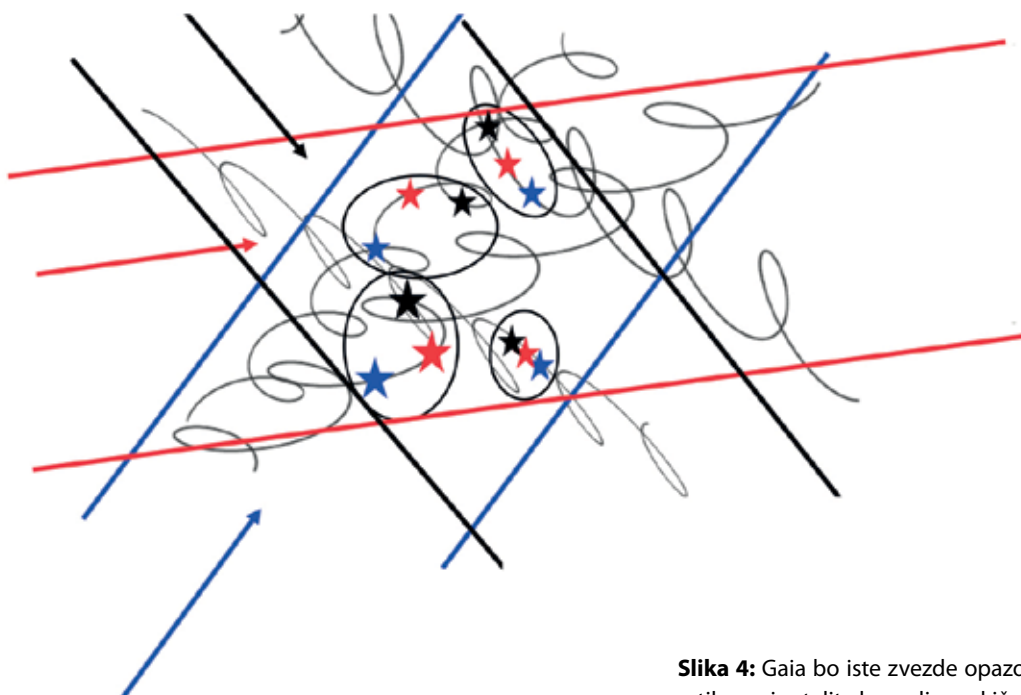
Ledino je na začetku 90. let prebil satelit Hipparcos Evropske vesoljske agencije. Trigonometrične paralakse 118 tisoč zvezd je meril s tipično natančnostjo od ene do treh tisočink ločne sekunde in tako določil razdalje do relativno svetlih zvezd, ki so oddaljene do nekaj nad 100 pc. S poznanimi razdaljami do teh zvezd v Sončevi okolici so lahko umerili izsev nekaterih standardnih tipov zvezd. Tako je lahko Hipparcos določil velikostno skalo celotnega vesolja, ki se je kot posledica teh meritev »povečalo« za deset odstotkov. To je pomenilo tudi, da so zvezde, ki jim v sredicah zmanjkuje vodika in se zato (podobno, kot se bo to zgodilo s Soncem čez pet milijard let) selijo med orjakinje, v resnici dlje in so zato v resnici svetlejše in mlajše. Tako je Hipparcos razjasnil nerodnost, ko so se nekatere zvezde zdele starejše od vesolja, za katero danes vemo, da je staro $13,80 \pm 0,02$ milijarde let, kar je približno trojna starost Zemlje in Sonca.

Hipparcos je tako veliko točnost dosegel zato, ker je meril zunaj Zemljine atmosfere. Poleg tega so se izognili primerjavi z domnevno bolj oddaljenimi zvezdami na istem posnetku. Pri natančnih meritvah namreč gibanje Zemlje vpliva na položaje veliko zvezd pa tudi napaka meritve se, ko sestavljamo posnetke po nebesni krogli, neprijetno povečuje. Hipparcos je zato lastno gibanje in trigonometrično paralakso razbral iz hkratnih meritev položajev zvezd v dveh smereh na nebu, ki sta bili več deset stopinj narazen. Način je bil podoben ogromnemu šestilu, ki je zelo natančno merilo za kotno razdaljo med zvezdami v eni in drugi smeri. Končni rezultat velikega števila meritev s »šestilom« po celotni nebesni krogli je bila globalna določitev položajev in razdalj do opazovanih zvezd.

V osnovi enak način merjenja uporablja tudi Hipparcosov naslednik, satelit Gaia Evropske vesoljske agencije,

ki so ga 19. decembra 2013 z raketo Sojuz izstrelili iz Francoske Gvajane. Gaia ima na krovu dva enaka teleskopa z zbiralnima zrcaloma pravokotne oblike velikosti 1,45 m x 0,5 m. Med teleskopoma je kot 106,5 stopinj, odboji na dodatnih zrcalih pa združijo sliki obeh teleskopov v skupno goriščno ravnino. Tako Gaia izjemno natančno meri kote med pari zvezd, ki so na nebu približno 106 stopinj vsaksebi. Teleskopa sta usmerjena pravokotno na os vrtenja satelita, ki napravi en obrat v šestih urah. Obenem os s periodo 63 dni precesira po stožcu, ki oklepa s smerjo proti Soncu stalni kot 45 stopinj. Tako v »šestilo« pridejo vedno novi pari zvezd, končni cilj pa je globalna določitev položajev in gibanj zvezd v prostoru.

Gaia v primerjavi s Hipparcosom prinaša revolucionarne izboljšave v točnosti, števila opazovanih zvezd in popolnosti dobljenih informacij. Točnost tu pomeni, da je meritev kota med dvema zvezdama, ki sta na nebu približno 106 stopinj vsaksebi, stokrat boljše od Hipparcosovih rezultatov. Meritev z referenčno natančnostjo stotisočinke ločne sekunde pomeni, da se zmotimo kvečjemu za kot, ki ga oklepa debelina človeškega lasu, če bi ga gledali z razdalje nekaj tisoč kilometrov. To seveda ni enostavno doseči, saj je treba položaj središča zvezde določiti približno na eno tritisočinko velikosti točke posameznega detektorja CCD, in to ob tem, da je v goriščni ravnini 106 takih detektorjev, ki ob formatu 4500 x 1966 točk sestavljajo gigantsko kamero s skoraj milijardo točkami. Takšna točnost je dosegljiva le s satelitom, ki je izdelan iz silicijevega karbida, materiala prihodnosti, ki je izjemno tog, temperaturno neraztegljiv in lahek, neroden je le za oblikovanje. Ko bodo čez desetletje iz tega materiala izdelali nova letala, se boste spomnili, da smo se ta material naučili obdelovati za potrebe satelitov Gaia in Herschel Evropske vesoljske agencije. Kljub izjemnim lastnostim novega materiala mora Gaia delovati v čim bolj stalnih opazovalnih pogojih. Zato so jo izstrelili v bližino druge Lagrangeeve točke, ki je približno 1,5 milijona kilometrov oddaljena od Zemlje v smeri proč od Sonca. Skupni gravitacijski privlak Zemlje in Sonca zagotavlja, da satelit ostaja v tem položaju in tako skupaj



Slika 4: Gaia bo iste zvezde opazovala večkrat, zaradi precesije vrtilne osi satelita bo polje vsakič prečesala v drugi smeri. Barve označujejo položaje istih štirih zvezd ob treh opazovanjih.

z Zemljo obkroži Sonce enkrat letno. Prednost tega položaja je tudi v tem, da sta Zemlja in Luna dovolj daleč in gledata proti satelitu s svojo temno stranjo. Obenem pa satelit stalno vidi Sonce, kar je pomembno za njegovo temperaturno stabilnost in za proizvodnjo elektrike.

Gaia opazuje več tisočkrat temnejše zvezde od satelita Hipparcos. Takih zvezd je seveda veliko in so lahko dokaj daleč. Tako Gaia meri več kot milijardo zvezd, tudi takih na razdaljah 10 kpc, torej onkraj središča naše Galaksije. Končno pa Gaia ne meri le položaja in gibanja zvezd, ampak tudi njihovo barvo, za zvezde, svetlejšje od 12. magnitude, pa spektroskopsko določa tudi astrofizične parametre, kot sta temperatura in okvirna kemična sestava. Podatkovni tok je izjemen, v treh letih od izstrelitve je bilo skupaj zaznanih dve milijardi opazovanih objektov v 53 milijardah prehodov preko goriščne ravnine, pri tem smo dobili 618 milijard meritev položaja, 12,2 milijarde spektrov in 132 milijard meritev njihovega sija. Oddaljenost 1,5 milijona kilometrov od Zemlje pomeni, da je maksimalna hitrost pretoka podatkov s satelita na mrežo teleskopov Deep Space Network le od tri do osem megabitov na sekundo, kar je podobno vašemu domačemu internetu. Torej je razumljivo, da smo potrebovali več let za optimizacijo tega podatkovnega toka, saj skušamo spraviti na Zemljo čim več podatkov, njihova pretirana obdelava na satelitu bi namreč onemogočila kasnejše izboljšave.

Gaia zvezde z meritvijo smeri in oddaljenosti umešča v tridimenzionalni prostor. Za razkritje dinamike in zgodovine naše Galaksije manjka še njihova hitrost. Prečno

gibanje glede na Zemljo ob poznani razdalji izračunamo iz počasnega vrtenja smeri proti zvezdi s časom. Manjka še radialna hitrost približevanja oziroma oddaljevanja, ki jo Gaia izlušči z meritvijo Dopplerjevega premika s spektroskopom na krovu. Meritev brez poznavanja tipa zvezde ne bi bila dovolj natančna pa tudi sicer bi o naravi zvezd radi izvedeli kaj več, zato Gaia pomeri še porazdelitev jakosti svetlobe zvezde po vidnem in bližnjem infrardečem območju. Rezultat je popolna kinematična prostorska slika zvezd različnih tipov, iz katere lahko ugotovimo preteklost in sklepamo o prihodnosti našega galaktičnega doma. Poleg zvezd Gaia opazuje tudi desetisoče objektov v našem osončju in na stotisoče drugih galaksij. Med drugim lepo vidi kroženje zvezd v bližnjih galaksijah.

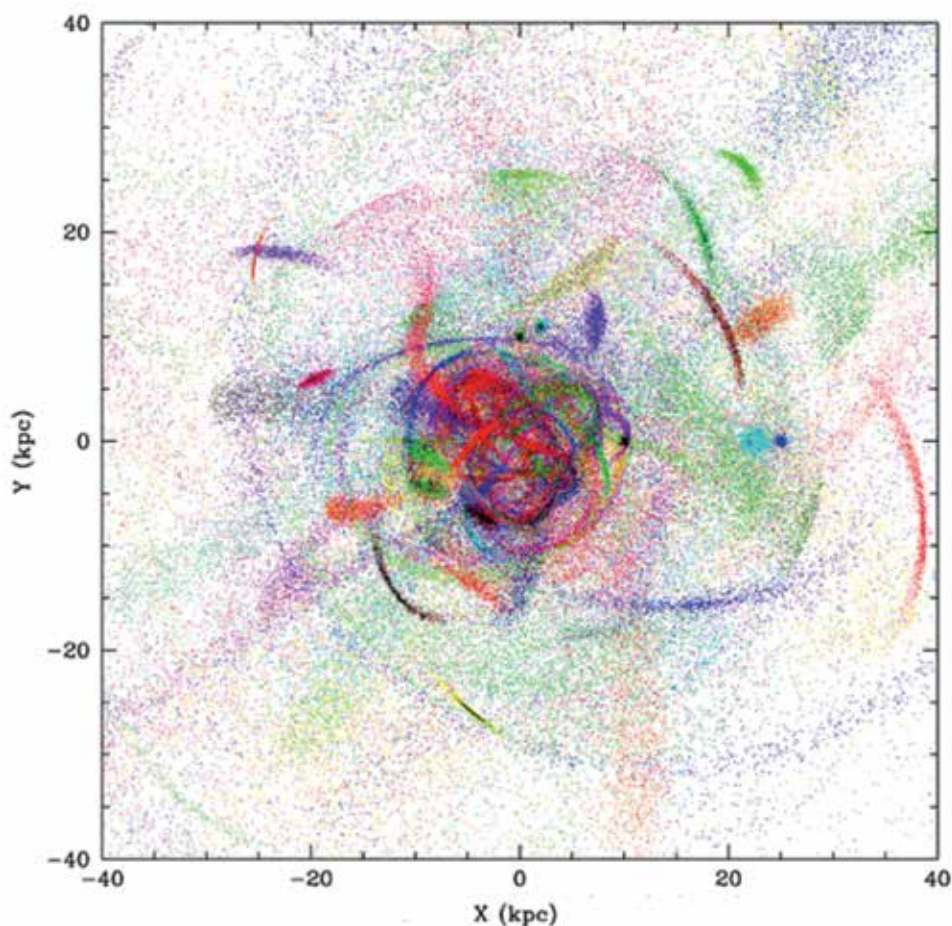
Seveda niti Gaia ne zmore vsega. Podrobna določitev kemične sestave zvezd ali iskanje primerov zvezd, ki se nahajajo v kratkoživih fazah zvezdne evolucije, je zato glavni cilj podrobnih spektroskopskih pregledov, narejenih s teleskopi na Zemlji. Pregled neba RAVE z meritvami radialne hitrosti in podrobno karakterizacijo zvezd tako predstavlja edinstveno dopolnitev trenutnih rezultatov misije Gaia, medtem ko bosta pregleda Gaia-ESO in Galah izjemno pomembna v prihodnje. Prvi je pomeril kemično sestavo več kot sto tisoč zvezd, ki so za tovrstno meritev s satelitom Gaia pretemne, drugi pa meri podrobno kemično zastopanost kar 28 elementov periodnega sistema za približno milijon zvezd.

Septembra 2016 je Gaia javno objavila prvo zbirko podatkov. To je bila preliminarna meritev smeri proti dobri

milijardi zvezd, dobrima dvema milijonoma zvezd pa smo lahko s kombinacijo opazovanj satelitov Hipparcos in Gaia določili tudi oddaljenost. Točnost teh rezultatov je za zdaj še na ravni Hipparcosa, vseeno pa je to daleč najpopolnejša zvezdna karta doslej in tudi razdalje so sedaj poznane za dvajsetkrat več zvezd. Že aprila 2018 sledi naslednja objava z veliko točnejšo določitvijo razdalje in gibanja za več kot milijardo zvezd, in to s točnostjo nekaj stotisočink ločne sekunde, ob tem pa tudi radialne hitrosti kakih petih milijonov zvezd.

Slovenci smo v misiji Gaia aktivni od leta 2000, ko smo sodelovali pri določanju njenih znanstvenih zahtev, zlasti na področju dvojnih zvezd. V preteklih letih smo prispevali del računalniške kode za obdelavo podatkov s spek-

troskopa na krovu. Ker smo edina skupina, ki sodeluje tudi v vseh zgoraj omenjenih spektroskopskih pregledih neba, kar je predvsem posledica znanja avtomatizacije obdelave in interpretacije spektroskopskih podatkov, smo tudi vezni člen med temi pregledi in misijo Gaia. Doslej se je na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani z misijo Gaia raziskovalno ukvarjalo 14 kolegic in kolegov. Akademska in raziskovalna sfera pa tudi sicer uspešno sodeluje z Evropsko vesoljsko agencijo. Poleg dela na projektih je tu še izobraževanje študentov, ki so tako v stiku z najnaprednejšimi tehnologijami in se navajajo na delo v tekmovalnem in ustvarjalnem mednarodnem okolju, rezultat pa je tudi marsikateri odmeven doktorat ali objava.



Slika 5: Simulirana projekcija haloja naše Galaksije na galaktično ravnino, izhodišče je v središču Galaksije, Sonce pa na položaju (8,0). Barve označujejo današnje položaje zvezd iz vsake od 50 pritlikavih galaksij, ki jih je naša Galaksija ujela v zadnjih desetih milijardah let in sedaj sestavljajo njen halo. Z rekonstrukcijo galaktičnih tirnic posameznih zvezd bo Gaia lahko sledila preteklim zajetjem pritlikavih galaksij in tako ugotovila razmere, v katerih je naša Galaksija nastala. Sliko so pripravili Amina Helmi in člani projekta Spaghetti survey.