

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Jonas  
BIALOPETRAVIČIUS

# Žvaigždžių spiečių analizė konvoliuciniais neuroniniais tinklais

**DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA**

Gamtos mokslai,  
Fizika (N 002)

---

VILNIUS 2020

Disertacija rengta 2015 – 2019 metais Vilniaus universitete. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas:

**dr. Donatas Narbutis** (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika – N 002).

Gynimo taryba:

Pirmininkas – **prof. dr. Arūnas Kučinskas** (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika – N 002).

Nariai:

**dr. Mindaugas Karčiauskas** (Universidad Complutense de Madrid, gamtos mokslai, fizika – N 002),

**dr. Šarūnas Mikolaitis** (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika – N 002),

**dr. Julius Sperauskas** (Vilniaus universitetas, gamtos mokslai, fizika – N 002),

**dr. Kastytis Zubovas** (Fizinių ir technologijos mokslų centras, gamtos mokslai, fizika – N 002).

Disertacija ginama viešame Gynimo tarybos posėdyje 2020 m. gruodžio mėn. 18 d. 11 val. Fizinių ir technologijos mokslų centro D401 auditorijoje. Adresas: Saulėtekio al. 3, LT-10257 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 266 1640; el. paštas: info@ftmc.lt

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus universiteto ir Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose bei VU interneto svetainėje adresu: <https://www.vu.lt/naujienos/ivykiu-kalendorius>

VILNIUS UNIVERSITY  
CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Jonas  
BIALOPETRAVIČIUS

# Analysis of Star Clusters with Convolutional Neural Networks

**SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION**

Natural Sciences,  
Physics (N 002)

---

VILNIUS 2020

This dissertation was written between 2015 – 2019 in Vilnius University. The research was supported by the Research Council of Lithuania.

Academic supervisor:

**dr. Donatas Narbutis** (Vilnius University, Natural Sciences, Physics – N 002).

This doctoral dissertation will be defended in a public meeting of the Dissertation Defence Panel:

Chairman – **prof. dr. Arūnas Kučinskis** (Vilnius University, Natural Sciences, Physics – N 002).

Members:

**dr. Mindaugas Karčiauskas** (Universidad Complutense de Madrid, Natural Sciences, Physics – N 002),

**dr. Šarūnas Mikolaitis** (Vilnius University, Natural Sciences, Physics – N 002),

**dr. Julius Sperauskas** (Vilnius University, Natural Sciences, Physics – N 002),

**dr. Kastytis Zubovas** (Center for Physical Sciences and Technology, Natural Sciences, Physics – N 002).

The dissertation will be defended at a public meeting of the Dissertation Defence Panel at 11 AM on 18th of December 2020 in meeting room D401 of the Center for Physical Sciences and Technology. Address: Saulėtekio av. 3, LT-10257, Vilnius, Lithuania, phone +370 5 266 1640; e-mail: info@ftmc.lt

The text of this dissertation can be accessed at the libraries of Vilnius University and the Center for Physical Sciences and Technology, as well as on the website of Vilnius University: [www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius](http://www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius)

# Turinys

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Ižanga</b>   | <b>6</b>  |
|          | Tikslas ir uždaviniai . . . . .                       | 8         |
|          | Ginami teiginiai . . . . .                            | 8         |
|          | Mokslinis naujumas . . . . .                          | 10        |
|          | Asmeninis indėlis . . . . .                           | 10        |
|          | Publikacijos disertacijos tema . . . . .              | 10        |
|          | Pranešimai konferencijose disertacijos tema . . . . . | 11        |
| <b>2</b> | <b>Spiečių amžius, masė ir dydis</b>                  | <b>12</b> |
| <b>3</b> | <b>Ekstinkcija ir spiečiaus/fono klasifikavimas</b>   | <b>18</b> |
| <b>4</b> | <b>M83 spiečių populiacijos analizė</b>               | <b>23</b> |
| <b>5</b> | <b>Pagrindiniai disertacijos rezultatai</b>           | <b>31</b> |
|          | Literatūros sąrašas                                   | 33        |
|          | Trumpai apie disertantą                               | 36        |

# 1. Įžanga

Žvaigždžių spiečiai yra gravitaciškai susietos žvaigždžių grupės susiformavusios viename molekuliniam debesyje. Dėl to spiečiuose esančių žvaigždžių amžius ir cheminė sudėtis yra labai panašūs. Taipogi, dauguma visų žvaigždžių susidaro spiečiuose (Lada & Lada 2003). Dėl šių priežasčių spiečiai yra puikūs žvaigždžių dinamikos ir evoliucijos tyrimo objektai, o literatūroje galima rasti daugybę darbų, skirtų jų aptikimui ir parametrų nustatymui. Tarp jų yra tokie tyrimai, kaip Stochastically Lighting Up Galaxies (Krumholz et al. 2015) – studija, kurioje pateikiamas vienas iš brandžiausių programų paketų stochastiniam spiečių populiacijų modeliavimui ir parametrų nustatymui, bei The Panchromatic Hubble Andromeda Treasury (Dalcanton et al. 2012, PHAT) – viena iš didžiausių žvaigždžių spiečių apžvalgų, paremta Hubble kosminio teleskopo duomenimis.

Konvoliuciniai neuroniniai tinklai (KNT) yra vienas patikimiausių metodų skirtų nuotraukų apdorojimui. Šiuo metu taikant KNT dalį objektų suradimo ir klasifikavimo užduočių galima atlikti tiksliau nei tai padarytų žmonės (Russakovsky et al. 2015). KNT progresas aiškiausiai atsispindi vaizdinio atpažinimo varžybose, tokiose kaip ILVSCR<sup>1</sup> (Russakovsky et al. 2015), PASCAL VOC<sup>2</sup> (Ren et al. 2017) ir Microsoft COCO<sup>3</sup> (Lin et al. 2014).

Pastaruoju metu KNT vis plačiau taikomi ir astronomijoje. Vieni ryškiausių tokio pritaikymo pavyzdžių – galaktikų klasifikacija (Diele-

---

<sup>1</sup>ImageNet Large Scale Visual Recognition Competition

<sup>2</sup>The PASCAL (Pattern Analysis, Statistical Modelling and Computational Learning) Visual Object Classes

<sup>3</sup>Common Objects in Context

man et al. 2015; Huertas-Company et al. 2018; Domínguez Sánchez et al. 2018), gravitacinių lęšių paieška (Petrillo et al. 2017; Lanusse et al. 2018; Pourrahmani et al. 2018) ir trumpalaikių įvykių aptikimas (Cabrera-Vives et al. 2017; Lanusse et al. 2018; Sedaghat & Mahabal 2018). Pasitelkiant KNT taip pat atliekami ir astronominių vaizdų rekonstrukcijos (Flamary 2016), egzoplanetų identifikacijos (Shallue & Vanderburg 2018) ir taškinių išplitimo funkcijų modeliavimo (Herbel et al. 2018) tyrimai. Šis progresas, kartu su eksponentiškai augančiu dangaus apžvalgų duomenų kiekiu, motyvuoja tobulinti automatinio astrofizinių parametrų nustatymo metodus. Tačiau iki šiol KNT žvaigždžių spiečių parametrų nustatymo srityje dar nebuvo taikyti. Dauguma žvaigždžių spiečių analizės metodų remiasi integraline arba atskirų žvaigždžių fotometrija ir dėl to išnaudoja ne visą informaciją, esančią nuotraukų pikseliuose. Tuo tarpu tokios papildomos informacijos naudą parodė Whitmore et al. (2011).

Disertacijoje pristatomas žvaigždžių spiečių analizės metodas, naudojantis daugiabangių dangaus apžvalgų stebėjimų duomenis spiečių identifikavimui ir jų evoliucinių, struktūrinių, aplinkos parametrų bei kitų metrikų, leidžiančių identifikuoti spiečius vaizduose, nustatymui.

Sukurta metodas buvo validuotas naudojant M31 galaktikos PHAT duomenis (Dalcanton et al. 2012) bei M83 galaktikos apžvalgą (Blair et al. 2014). Spiečių amžiaus, masės ir dydžio nustatymas pademonstruotas naudojant M31 galaktikos vaizdus. Tuo tarpu ekstinkcijos nustatymas ir spiečių paieškos metodai pademonstruoti naudojant M83 galaktikos vaizdus. Naujuoju metodu aptikta žvaigždžių spiečių populiacija panaudota tiriant M83 žvaigždžių spiečių erdvinio pasiskirstymo savybes. Skirtingų apžvalgų duomenys buvo naudojami siekiant parodyti, kad naujasis metodas gali būti taikomas įvairioms galaktikoms tirti be daug papildomo žmogaus darbo.

Disertacija susideda iš įžangos, keturių pagrindinių skyrių ir išvadų. Pirmame skyriuje apžvelgiame dabartinius žvaigždžių spiečių paieškos ir analizės metodus. Antrame skyriuje KNT pritaikomas nustatyti

žvaigždžių spiečių amžių, masę ir dydį. Trečiame skyriuje metodas išplėstas ekstinkcijos nustatymui ir žvaigždžių spiečių identifikavimui. Ketvirtame skyriuje pristatomas žvaigždžių spiečių paieškos metodas ir šio metodo taikymas M83 galaktikos spiečių kandidatų analizei.

## **Tikslas ir uždaviniai**

Tikslas: sukurti metodą, leidžiantį vienu metu nustatyti spiečių evoliucinius, struktūrinius ir aplinkos parametrus bei lokalizuoti spiečius daugiabanguose stebėjimuose.

Šiam tikslui pasiekti buvo suformuluoti tokie uždaviniai:

1. Sukurti konvoliuciniais neuroniniais tinklais paremtą metodą spiečių amžiaus, masės, dydžio ir ekstinkcijos parametrų nustatymui.
2. Surasti būdą išreikšti išsigimimus tarp nustatomų parametrų.
3. Sukurti metodą spiečių paieškai daugiabanguose galaktikų stebėjimuose.
4. Sukurti programinę įrangą dirbtinių spiečių nuotraukoms, skirtoms konvoliucinių neuroninių tinklų mokymui, generuoti.
5. Pademonstruoti žvaigždžių spiečių suradimo ir parametrų nustatymo veikimą naudojant M83 galaktikos Hubble kosminio teleskopo stebėjimus.

## **Ginami teiginiai**

1. Sukurtas konvoliucinis neuroninis tinklas, leidžiantis nustatyti žvaigždžių spiečių evoliucinius (amžius, masę), struktūrinius



(dydis) ir aplinkos (ekstinkcija) parametrus, bei atvaizduoti išsigimimus tarp jų, kuris gali būti mokomas naudojant vos 50000 dirbtinių spiečių su minimalia žmogaus priežiūra.

2. Nustatyta, kad išsigimimai tarp amžiaus ir ekstinkcijos parametru yra minimalūs naudojant tris Hubble kosminio teleskopo fotometrinius filtrus (F336W, F438W ir F814W) M83 galaktikos spiečiams, kurių amžius  $\log_{10}(t/\text{yr}) < 8$ , o masė yra tarp  $\log_{10}(M/M_{\odot}) = 3.5$  ir  $5.5$ .
3. Buvo pasiūlytas naujas metodas, leidžiantis panaudoti konvoliucinius neuroninius tinklus spiečių kandidatų paieškai, besiremiantis spiečiaus stebėjimo tikėtimumo bei išsiskyrimo iš fono įverčiais ir surandantis  $\sim 90\%$  dirbtinių spiečių M83 galaktikoje, kurių amžius  $\log_{10}(t/\text{yr}) = 7$  ir masė  $\log_{10}(M/M_{\odot}) = 4$ .
4. Naudojant F336W, F438W ir F814W Hubble kosminio teleskopo filtrų M83 galaktikos stebėjimus buvo surasta 3380 žvaigždžių spiečių kandidatų bei nustatyti jų amžiai, masės, dydžiai ir ekstinkcijos.
5. Vidutinis M83 galaktikos žvaigždžių spiečių kandidatų, senesnių negu  $\log_{10}(t/\text{yr}) \geq 8.5$ , tankis ties 0.5 kpc nuotoliu nuo galaktikos centro yra  $\log(\rho_h/(M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3})) = 3.5$  ir link išorės mažėja iki  $\log(\rho_h/(M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3})) = 2$  ties 5 kpc atstumu.
6. M83 spiečių kandidatų imtyje stebimas amžiaus gradientas spiralinių vijų atžvilgiu: daugiausia jaunų ( $\log_{10}(t/\text{yr}) < 7$ ) spiečių kandidatų stebima ties  $\sim 0.4$  kpc spiralinių vijų priekyje, tuo tarpu daugiausia senesnių ( $7 \leq \log_{10}(t/\text{yr}) < 7.7$ ) spiečių kandidatų randama ties  $\gtrsim 0.7$  kpc, kas atitinka spiralinių vijų tankio bangų teoriją.

## Mokslinis naujumas

1. Pirmą kartą konvoliuciniai neuroniniai tinklai pritaikyti žvaigždžių spiečių suradimo ir parametrų nustatymo uždaviniui spręsti.
2. Pasiūlytas ir patikrintas būdas atvaizduoti žvaigždžių spiečių parametrų išsigimimą konvoliucinio neuroninio tinklo aktyvacijoje.
3. Pasiūlytas būdas atsižvelgti į keleto fotometrinių filtrų ir visų pikselių informaciją nustatant žvaigždžių spiečių parametrus.
4. Sukurtas ir patikrintas nuoseklus metodas atlikti žvaigždžių spiečių kandidatų paiešką ir jų evoliucinių, struktūrinių ir aplinkos parametrų nustatymą.
5. Naudojant F336W, F438W ir F814W Hubble kosminio teleskopo filtrų M83 galaktikos stebėjimus buvo surasti 3380 žvaigždžių spiečių kandidatai bei nustatyti jų amžiai, masės, dydžiai ir eks-tinkcijos.

## Asmeninis indėlis

Adaptavau konvoliucinius neuroninius tinklus žvaigždžių spiečių analizei, atlikau dirbtinių žvaigždžių spiečių modeliavimą ir parašiau visą su šiuo darbu susijusį programinį kodą. Astronominių apžvalgų duomenų paruošimas, rezultatų analizė ir straipsnių rašymas buvo komandinio darbo su bendraautoriais rezultatas.

## Publikacijos disertacijos tema

1. **J. Bialopetravičius**, D. Narbutis, V. Vansevičius, Deriving star cluster parameters with convolutional neural networks. I. Age,

mass, and size, *Astronomy & Astrophysics*, 2019, 621, A103, doi: 10.1051/0004-6361/201833833.

2. **J. Bialopetravičius**, D. Narbutis, Deriving star cluster parameters with convolutional neural networks. II. Extinction and cluster/background classification, *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 633, A148, doi: 10.1051/0004-6361/201936185.
3. **J. Bialopetravičius**, D. Narbutis, Study of star clusters in the M83 galaxy with a convolutional neural network, *The Astronomical Journal*, 2021, spaudoje, arXiv: 2010.11126, doi: 10.3847/1538-3881/abf5.

## **Pranešimai konferencijose disertacijos tema**

1. **J. Bialopetravičius**, D. Narbutis, V. Vansevičius, Deep learning based star cluster parameter inference, 2019, *Machine Learning Prague*, Praha, standinis pranešimas.
2. **J. Bialopetravičius**, D. Narbutis, V. Vansevičius, Žvaigždžių spiečių parametrų nustatymas giliais konvoliuciniais neuroniniais tinklais, 2019, 9-oji LMA jaunųjų mokslininkų konferencija „Fizinių ir technologijos mokslų tarpdalykiniai tyrimai“, Vilnius, standinis pranešimas.
3. **J. Bialopetravičius**, D. Narbutis, V. Vansevičius, Deriving star cluster parameters with convolutional neural networks, 2019, *Open Readings*, Vilnius, standinis pranešimas.
4. **J. Bialopetravičius**, Deep learning for object detection in space, 2017, *Artificial Intelligence Group Meetup*, Vilnius, žodinis pranešimas.

## 2. Spiečių amžius, masė ir dydis

Pirmiausia buvo kurtas KNT, skirtas amžiaus, masės ir dydžio nustatymui M31 galaktikos PHAT apžvalgos spiečiams. Neuroniniam tinklui apmokyti reikalingi dideli kiekiai duomenų su tikslia informacija apie prognozuojamus parametrus. Turint žvaigždžių spiečių nuotraukas ir šias nuotraukas atitinkančius parametrus, neuroninį tinklą galima mokyti siekiant, kad šie parametrai būtų prognozuojami tiesiai iš vaizdų. To siekiant buvo sukurta dirbtinių žvaigždžių spiečių duomenų bazė su amžiaus režiais  $\log(t/\text{yr}) = [6.6, 9.5]$ , masės režiais  $\log(M/M_{\odot}) = [2.0, 4.0]$  ir dydžiais pagal Elson-Fall-Freeman modelį (Elson et al. 1987) parinktais taip, kad parametrai  $a$  ir  $\gamma$  būtų režiuose  $a = [0.05, 6.4]$  arcsec ir  $\gamma = [2.05, 8.0]$ . Šie spiečiai buvo piešiami M31 galaktikos atstumu (785 pc) ir talpinami ant tikrų fonų iš Nr. 19, 20, 21 ir 22 mozaikų regionų, gautų iš PHAT archyvo<sup>1</sup>. Įvairūs šių parametru rinkiniai ir juos atitinkančios sugeneruotos spiečių nuotraukos pavaizduotos 1 pav.

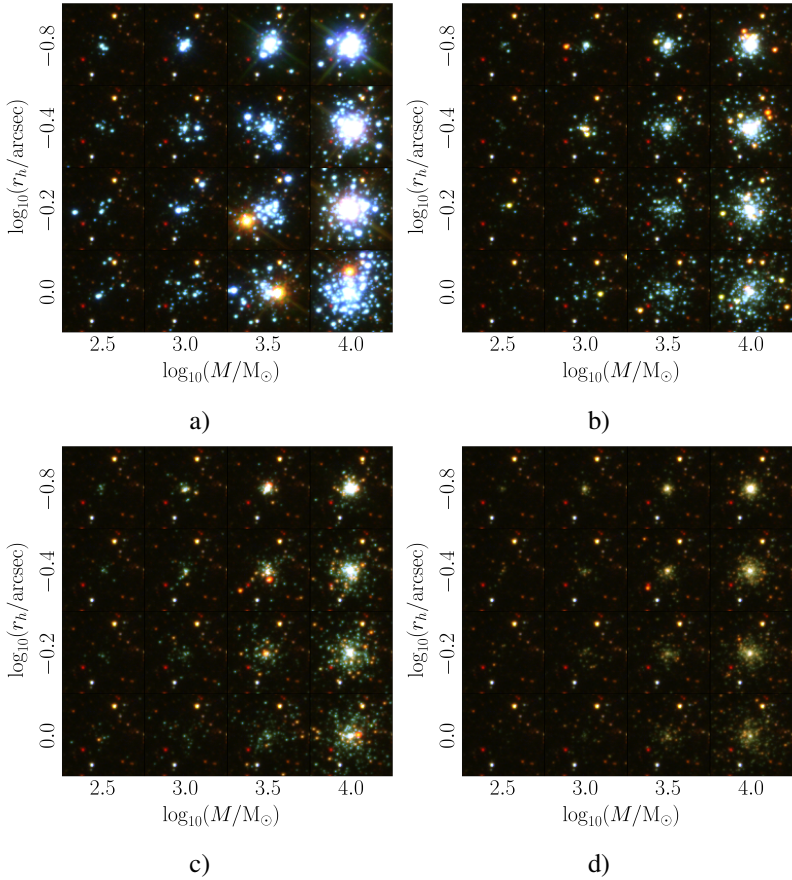
Konvoliuciniai neuroniniai tinklai savo pavadinimą gavo pagal juose naudojamus konvoliucinius filtrus, išdėliotus sluoksniais. Šių filtrų svoriai nėra fiksuoti, bet surandami neuroninio tinklo mokymo metu. Tai leidžia efektyviai apdoroti vaizdus, atsižvelgiant į dvimatę jų struktūrą. Šiame darbe buvo naudojama ResNet (He et al. 2016) KNT architektūra, kurioje yra papildomų sujungimų tarp nutolusių tinklo sluoksnių. Kadangi KNT dažnai būna gilūs (turintys daug konvoliucinių sluoksnių), šis sprendimas palengvina tinklo mokymą, leidžiant gradientams lengviau sklirti. Šiame darbe buvo naudojamas ResNet-50 KNT variantas, modifikuotas žvaigždžių spiečių nuotraukų apdorojimui ir parametru

---

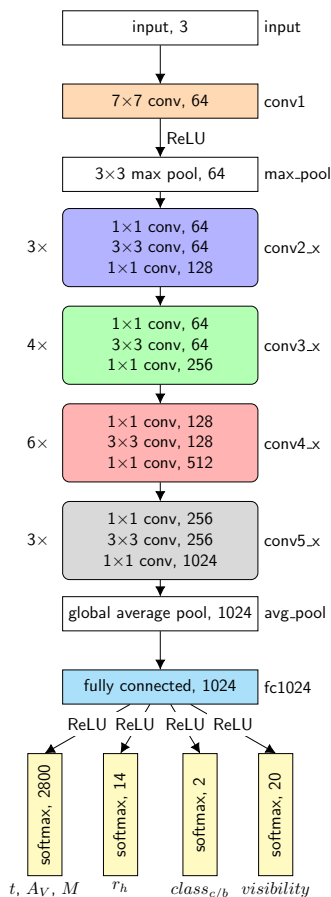
<sup>1</sup><https://archive.stsci.edu/prepds/phat/>

nustatymui. Tinklo galutinės versijos diagrama pateikta 2 pav., tačiau pavaizduoti ekstinkcijos,  $class_{c/b}$  ir  $visibility$  parametrai bus naudojami tik vėlesniuose eksperimentuose.

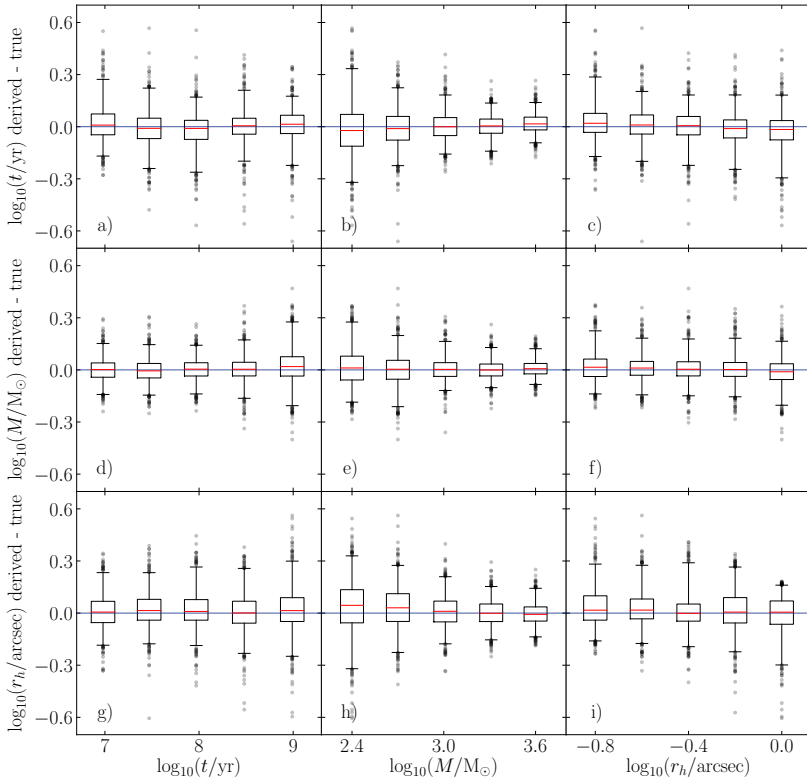
Apmokius KNT prognozuoti spiečių amžių, masę ir dydį, metodas buvo validuotas su atskira dirbtinių spiečių imtimi. To rezultatai matomi 3 pav. Amžiaus klaidų standartinis nuokrypis yra  $\sim 0.1$  dex visame amžiaus intervale, masės šiek tiek didesnis lengvesniems spiečiams –  $\sim 0.15$  dex, ir mažesnis masyviausiems –  $\sim 0.05$  dex, tuo tarpu dydžio –  $\sim 0.1$  dex visame dydžių intervale. Metodas taip pat testuotas su tikrais de Meulenaer et al. (2017) katalogo spiečiais, šie rezultatai pavaizduoti 4 pav. Parametrai nustatomi panašiai, kaip ir de Meulenaer et al. (2017) kataloge, tačiau šio skyriaus eksperimentuose nėra atsižvelgiama į ekstinkciją, taigi ir palyginimas yra riboto naudingumo.



1 pav. Dirbtinių spiečių ant tuko fono pavyzdžiai. Spiečių amžius: (a)  $\log(t/\text{yr}) = 7.0$ , (b) 8.0, (c) 8.5, (d) 9.0. Ašyse kinta spiečių masės ir  $r_h$  reikšmės. Spalvų reikšmės normalizuotos arcsinh funkcija. Visiems spiečiams naudotas vienodas fonas.

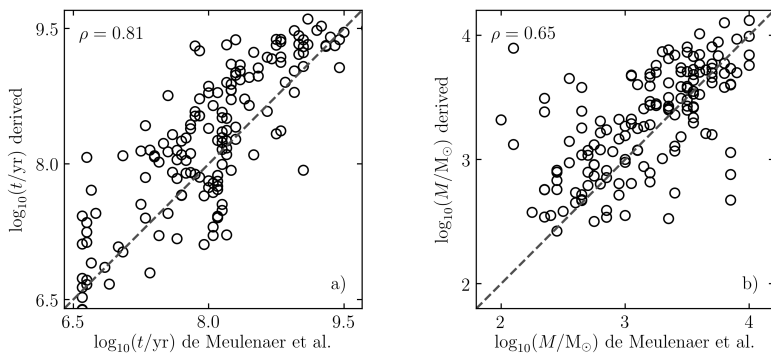


2 pav. Blokinė KNT diagrama. Tinklo įvestis yra trijų spalvos kanalų nuotraukos (pavaizduota viršuje), o išvestis: amžius, masė, dydis, eks-tinkcija,  $class_{c/b}$  ir  $visibility$ . Kiekvienas blokas su aštriais kampais reprezentuoja vieną neuroninio tinklo sluoksnį, tuo tarpu blokai užapvalintais kampais reprezentuoja sluoksnių grupes. Skaičius kairėje nurodo kiek kartų ši sluoksnių grupė pakartojama. Paskutinis skaičius, pavaizduotas kiekviename bloke, nurodo kiek kanalų tas sluoksnis sugeneruoja. Žodis „ReLU“ nurodo vietas tinkle, kur pritaikomos rektifikuotos tiesinės funkcijos tarp skirtingų tinklo blokų.



3 pav. Skirtumai tarp tikrųjų ir su KNT nustatytų parametų (amžiaus, masės ir dydžio) dirbtiniams spiečiams. Parametų reikšmės horizontalioje ašyje diskretizuotos, su 0.5 dex ilgio intervalais amžiui ir 0.3 dex – masei. Dėžučių plotis atitinka pusę minėtų intervalų ilgio. Dydžio ( $r_h$ ) reikšmės papildomai nediskretizuojamos. Linijos per dėžutės vidurį atitinka daromų klaidų medianą. Dėžutės apima klaidas nuo pirmo iki trečio kvartilio. Ūsai apima intervalą tarp 2 ir 98 percentilių. Visi rezultatai virš arba žemiau ūsų piešiami kaip individualūs taškai.





4 pav. KNT ir de Meulenaer et al. (2017) nustatytų amžiaus (a) ir masės (b) parametų palyginimai 157 PHAT žvaigždžių spiečiams. Koreliacijos koeficientas  $\rho$  kiekvienam parametrai pavaizduotas iliustracijų kairiame viršutiniame kampe.

### 3. Ekstinkcija ir spiečiaus/fono klasifikavimas

Siekiant nustatyti ekstinkciją bei neuroninį tinklą pritaikyti spiečių atskyrimui nuo fono, ResNet-50 architektūra buvo toliau plečiama. Pagrindiniai pakeitimai (5 pav.): 1) parametrai nustatomi ne kaip realūs skaičiai, o kaip skirstiniai; 2) amžius, masė ir ekstinkcija nustatomi apjungtai, leidžiant tinklui išreikšti išsigimimus tarp šių parametrų; 3) pridėti du papildomi parametrai –  $class_{c/b}$  (stebėjimo tikėtimumo) ir  $visibility$  (išsiskyrimo iš fono) – skirti nustatyti, ar stebima nuotrauka yra fonas, ar spiečius. Viso tinklo diagrama pateikta 2 pav.

Šis neuroninis tinklas buvo taikomas M83 galaktikos vaizdams, stebėtiems su Hubble kosminio teleskopo Wide Field Camera 3 (Blair et al. 2014; Dopita et al. 2010). Naudotos 3 filtrų (F336W, F438W ir F814W) ir visų 7 laukų mozaikinės nuotraukos. Tinklo mokymui ir testavimui buvo generuojami dirbtiniai spiečiai, šį kartą įtraukiant ir ekstinkciją režiuose  $A_V = [0, 3]$  mag. Spiečiai buvo piešiami ant minėtų M83 mozaikinių nuotraukų, tačiau šį kartą dalis mokymui naudotų vaizdų buvo tik M83 fonai be dirbtinių spiečių, naudojant šiuos du tipus nuotraukų fono nuo spiečiaus atskyrimo mokymui ( $class_{c/b}$  parametras). Rezultatai su testavimo duomenimis pateikti 6 pav.

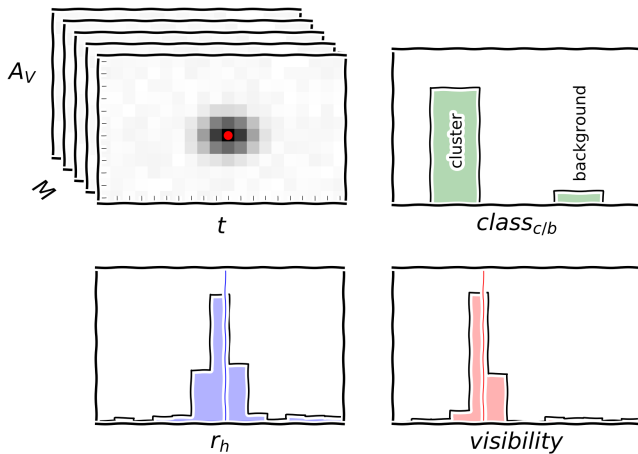
Tikrosios ir nustatytos amžiaus reikšmės pavaizduotos 6a pav. Raudonai pažymėti spiečiai, kuriems buvo nustatytos mažesnės amžiaus reikšmės, negu tikrosios, tuo tarpu mėlynai – tie spiečiai, kuriems nustatytos didesnės amžiaus reikšmės, negu tikrosios. Kai spiečių amžius  $\log_{10}(t/yr) < 8$  metodas veikia tiksliai, tačiau, esant didesnėmis amžiaus reikšmėmis matome daugiau daromų klaidų. Tikros ir nustaty-

tos  $A_V$  reikšmės pateiktos 6b pav. Mėlynai ir raudonai pažymėti spiečiai yra su nustatytais atitinkamai stipriai didesnėmis ir mažesnėmis ekstinkcijos vertėmis. Šiuos efektus 6a ir 6b pav. galima paaiškinti amžiaus-ekstinkcijos išsigimimu, kadangi senesni spiečiai su žema ekstinkcija vizualiai nedaug skiriasi nuo jaunesnių spiečių su aukšta ekstinkcija, kai naudojami trys fotometriniai filtrai.

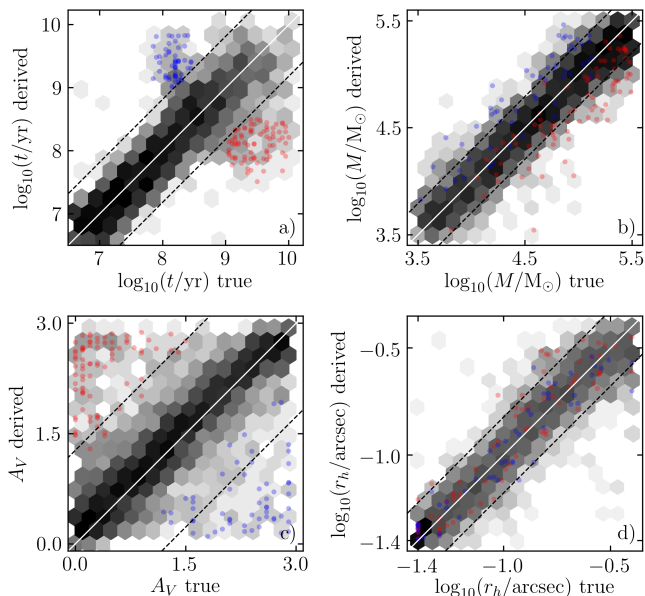
Iliustracijoje 6b pavaizduotos tikrosios ir nustatytos masės reikšmės, tuo tarpu iliustracijoje 6d rodomos tikrosios ir nustatytos  $r_h$  reikšmės. Abiem atvejais sistematiškų efektų nėra, tačiau masės yra šiek tiek nuvertintos dėl išsigimimų, susijusių su amžiumi ir ekstinkcija.

Toliau metodas buvo testuojamas su tikrais spiečiais. Tam naudoti trys katalogai: Ryon et al. (2015, R15), apimantis visą galaktikos diską, Bastian et al. (2011, B11), apimantis du iš septynių laukų ir Harris et al. (2001, H01), apimantis galaktikos centrinę zoną.

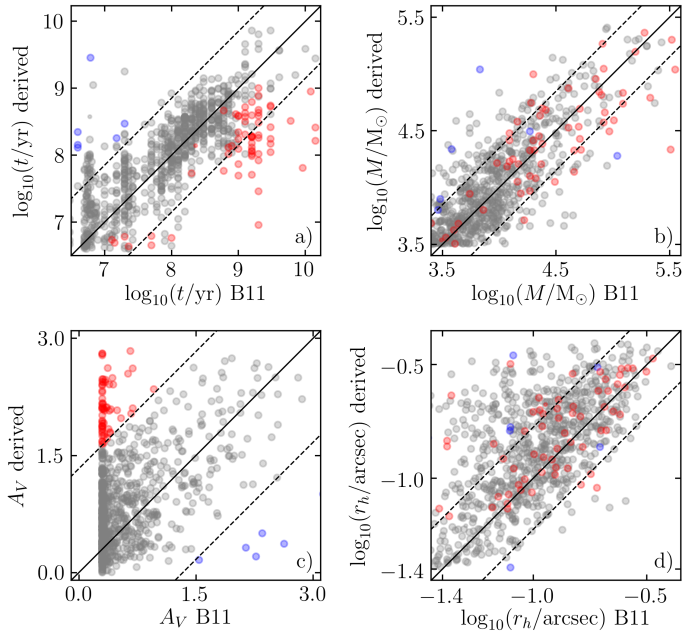
Iliustracijoje 7 pateiktas palyginimas su Bastian et al. (2011) rezultatais. Raudoni ir mėlyni taškai vaizduoja spiečius su stipriai pervertintomis ir nuvertintomis ekstinkcijos vertėmis. KNT ir Bastian et al. (2011) nustatyti parametrai yra artimi. Didžiausi skirtumai matomi 7a ir 7b pav. gali būti paaiškinami amžiaus-ekstinkcijos išsigimimu. Ryon et al. (2015) ir Harris et al. (2001) kataloguose tiek nustatymo tikslumai, tiek amžiaus-ekstinkcijos išsigimimo efektai išlieka panašūs.



5 pav. Stilizuotas paskutinio KNT sluoksnio aktyvacijų pavyzdys. KNT mokymo metu taikoma nustatyti amžių, ekstinkciją ir masę kaip 3D Gauso skirstinį (tikroji reikšmė pažymėta raudonu tašku), o  $r_h$  (pažymėta mėlyna linija) ir  $visibility$  (pažymėta raudona linija) kaip 1D Gauso skirstinius. Parametras skirtas spiečiaus/fono klasifikavimui yra reprezentuojamas kaip 0 arba 1.



6 pav. Tikros ir nustatytos dirbtinių spiečių parametrų vertės, pavaizduotos logaritminiu tankio žemėlapiu. Iliustracijose vaizduojama (a) amžiaus, (b) masės, (c)  $A_V$  ir (d)  $r_h$  reikšmės. Brūkšninės linijos apgaubia 95% visų spiečių. Raudoni taškai vaizduoja tuos spiečius, kuriems amžius buvo nustatytas mažesnis, negu tikrasis, tuo tarpu mėlyni taškai vaizduoja spiečius su didesnėmis, negu tikrosios amžiaus vertėmis.



7 pav. KNT ir Bastian et al. (2011) kataloge esančių objektų parametų verčių palyginimas (a) amžiui, (b) masei, (c)  $A_V$  ir (d)  $r_h$ . Raudoni taškai vaizduoja spiečius su nustatytomis didesnėmis, nei Bastian et al. (2011) ekstinkcijos reikšmėmis, tuo tarpu mėlyni taškai – su mažesnėmis. Likę spiečiai vaizduojami pilkais taškais. Brūkšninės linijos apgaubia 95% dirbtinių spiečių reikšmių.

## 4. M83 spiečių populiacijos analizė

Norint pademonstruoti sukurto KNT žvaigždžių spiečių paieškos galimybes, toliau buvo naudojami M83 Hubble kosminio teleskopo duomenys. Kadangi naudojamas KNT gali klasifikuoti tik fiksuoto dydžio vaizdus, norint apdoroti visą M83 mozaikinę nuotrauką, buvo suformuluotas toks slenkančio lango principu veikiantis spiečių paieškos algoritmas:

1. su KNT parametrai nustatomi kiekviename mozaikinės nuotraukos pikselyje, gaunami parametrų žemėlapiai;
2.  $class_{c/b}$  žemėlapis glotninamas Gausiniu filtru;
3. atliekama lokalių pikų  $class_{c/b}$  žemėlapyje paieška;
4. visi likę parametrai (amžius, masė, ekstinkcija, dydis, *visibility*) apskaičiuojami pasvertu vidurkiu aplink kiekvieną piką.

Spiečių paieškos tikslumui išmatuoti buvo naudojami dirbtinių spiečių testai. Pirmiausia buvo generuojami dirbtiniai spiečiai ir piešiami ant M83 mozaikos nuotraukų, paliekant 64 pikselių tarpus tarp kiekvieno iš jų. Tuomet minėtu algoritmu buvo atliekama spiečių paieška ir matuojama, kiek spiečių yra surandama. Šie duomenys panaudoti nustatant  $class_{c/b}$  ir *visibility* reikšmes, kurios naudojamos tikrų spiečių paieškai. Visiems likusiems eksperimentams naudotos  $visibility > 2$  ir  $class_{c/b} > 0.95$  reikšmės.

Paieškos procesas pakartotas su M83 mozaikomis be dirbtinių spiečių. Atrinkus pagal *visibility* ir  $class_{c/b}$  parametrus, lieka 3380

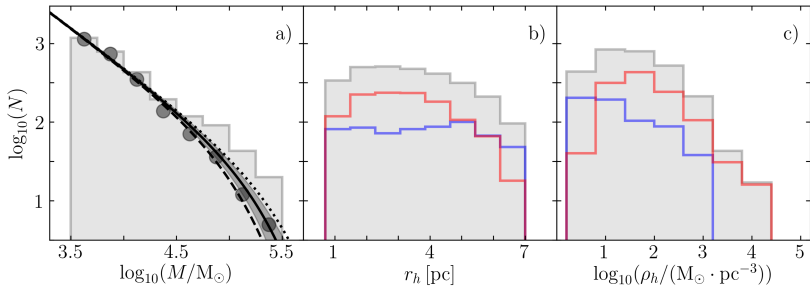
tikrų spiečių kandidatų. Gautų spiečių kandidatų masės, dydžio ir tankio histogramos matomos 8 pav. Iliustracijoje 8a apskritimai vaizduoja spiečių, kurių amžius  $\log_{10}(t/\text{yr}) < 8.5$ , masės histogramas. Kreivės yra Schechterio masės funkcijos (Portegies Zwart et al. 2010) su skirtingomis viršutinės masės ribomis, kurios buvo paimtos iš Bastian et al. (2012). Šios funkcijos gerai atitinka surastų spiečių kandidatų masės skirstinius.

Iliustracijoje 8b pavaizduoti jaunų (mėlyna histograma) ir senų (raudona histograma) spiečių dydžiai. Šie skirstiniai panašūs į Paukščių Tako spiečių skirstinius, matomus Gaia stebėjimuose (Sánchez et al. 2020), ir taip pat gerai sutampa su kitų autorių M83 duomenimis (Ryon et al. 2015). Šioje spiečių kandidatų imtyje senesni spiečiai yra vidutiniškai mažesni ir tankesni, negu jauni spiečiai. Tai galima paaiškinti spiečių mirtingumu: išplitę spiečiai lengviau išardomi ir dėl to gyvena trumpiau.

Pagal tankio bangų teoriją (Shu 2016), galaktikų spiralinės vijos yra sutankėjimai, susidarantys objektams sukantis aplink galaktikos centrą: objektai sulėtėja patekus į viją ir pagreitėja vėl iš jos išskriejant. Pati spiralinė vija sukasi vienu kampiniu greičiu aplink galaktikos centrą, tuo tarpu objektai (pvz. žvaigždžių spiečiai) sukasi skirtingais kampiniais greičiais, kurie priklauso nuo objekto atstumo iki galaktikos centro. Šiuo atveju objektai, esantys arčiau centro, negu korotacijos spindulys, turėtų judėti greičiau, negu vija, ir dėl to jų amžius tiesiogiai priklausytų nuo atstumo iki tos vijos.

Tam ištirti mes sužymėjome vidines spiralinių vijų sritis su didele dulkių koncentracija ir skaičiavome žvaigždžių spiečių atstumus iki jų. Panašus metodas buvo naudojamas Shabani et al. (2018) tiriant amžiaus gradientą trijose spiralinėse galaktikose. Spiečių kandidatų kiekis įvairiais atstumais nuo artimiausios spiralinės vijos rodomas 9 pav. Neigiami atstumai yra nuo vijos atsiliekančios, tuo tarpu teigiami atstumai – viją pralenkiantys spiečiai. Iliustracijoje 9a vaizduojami trys amžiaus intervalai:  $\log_{10}(t/\text{yr}) < 7$  (mėlyna spalva),  $7 \leq \log_{10}(t/\text{yr}) < 7.7$  (ora-





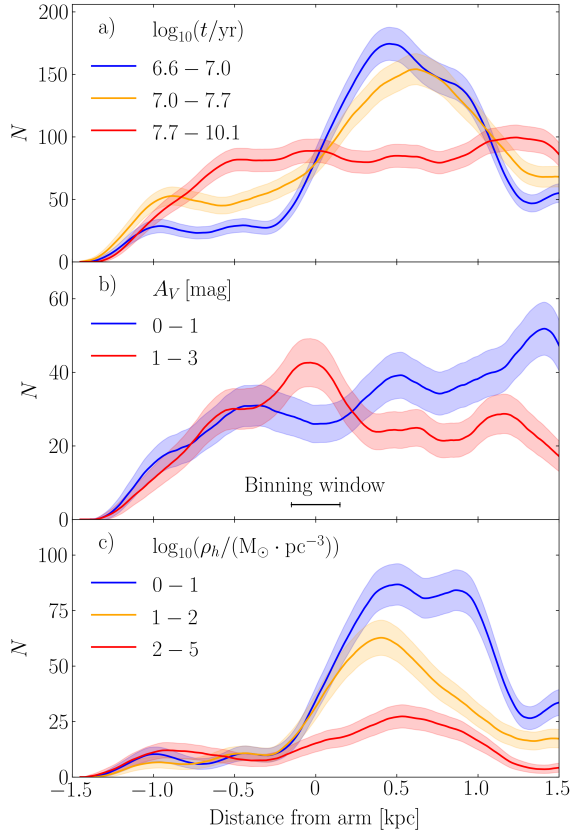
8 pav. 3380 spiečių kandidatų masės (a), dydžio (b) ir tankio (c) histogramos. Iliustracijoje (a) apskritimai reprezentuoja spiečių mases, kurių amžius  $\log_{10}(t/\text{yr}) < 8.5$ , tuo tarpu pilka histograma rodo visų spiečių kandidatų imtį. Kreivės vaizduoja Schechterio masės funkcijas ( $dN/dM = A \cdot M^{-2} \cdot \exp(-M/M_*)$ ), kur  $M_*$  yra: 1)  $10^5$  (taškinė kreivė), 2)  $1.6 \cdot 10^5 M_{\odot}$  (vientisa kreivė, su paryškintu Puasono standartiniu nuokrypiu) ir 3)  $2.5 \cdot 10^5 M_{\odot}$  (brūkšninė kreivė). Iliustracijose (b) ir (c) pilkos histogramos vaizduoja visą spiečių kandidatų imtį, mėlynos – jaunesnius  $\log_{10}(t/\text{yr}) < 7$  ir raudonos – senesnius  $\log_{10}(t/\text{yr}) \geq 7.7$  spiečius.

nžinė spalva),  $\log_{10}(t/\text{yr}) \geq 7.7$  (raudona spalva). Jaunų (mėlynos spalvos) spiečių pikas matomas ties  $\sim 0.4$  kpc nuo spiralinės vijos, tuo tarpu senesnių (oranžinės spalvos) spiečių pikas matomas ties  $\sim 0.7$  kpc. Seniausi spiečiai pasiskirstę tolygiai visais atstumais, kadangi šie spiečiai yra pakankamai seni, kad būtų nutolę nuo vijos kurioje susiformavo ir spėję išsimaišyti po visą galaktiką.

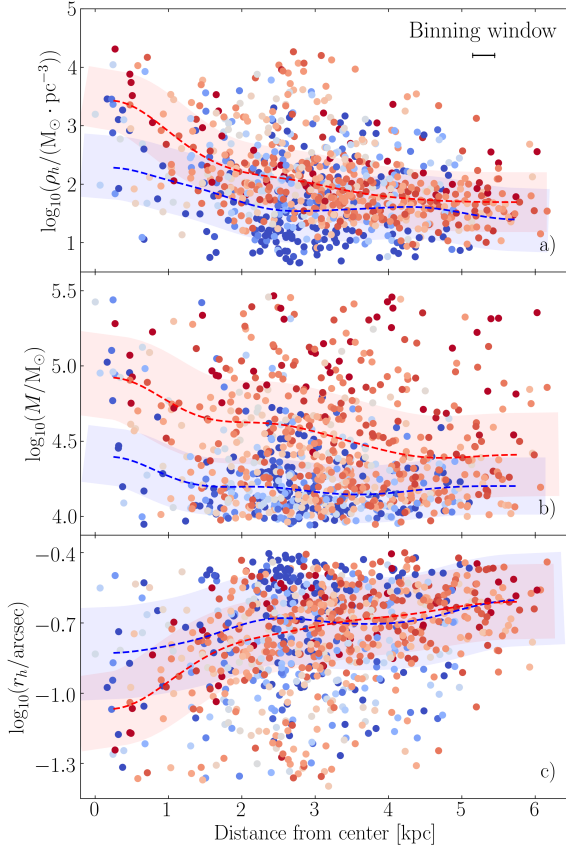
Ties  $\sim 2.5$  kpc atstumu nuo galaktikos centro, kur randame daugiausia žvaigždžių spiečių, objektų sukimosi greitis yra  $\sim 160$  km/s (Heald et al. 2016), tuo tarpu spiralinių vijų sukimosi greitis –  $\sim 110$  km/s (Zimmer et al. 2004). Dėl tokio sukimosi greičio skirtumo susidaro  $\sim 50$  parsekų atstumas tarp vijos ir spiečių per milijoną metų. Surasti spiečių pikai ties  $\sim 0.4$  kpc jauniems ir  $\sim 0.7$  kpc senesniems spiečiams atitinka pasiskirstymus, kurių galima tikėtis esant šiems judėjimo greičiams.

Iliustracijoje 9b vaizduojami žemos (mėlyna kreivė) ir aukštos (raudona kreivė) ekstinkcijos senesnių spiečių ( $\log_{10}(t/\text{yr}) > 8$ ) kiekiai skirtingais atstumais nuo vijos. Objektų su didele ekstinkcija pikas matomas ties spiralinių vijų vidinėmis sritimis, tuo tarpu žemos ekstinkcijos objektų po truputį daugėja tolstant nuo vijos ir daugiausia randama  $\gtrsim 1$  kpc atstumais. Tai atitinka objektus, esančius retesnėje aplinkoje. Iliustracijoje 9c vaizduojama jaunų spiečių ( $\log_{10}(t/\text{yr}) < 7$ ) populiacija, padalinta į tris tankio intervalus. Matome šiek tiek daugiau didelio tankio spiečių esančių toliau nuo spiralinių vijų.

Iliustracijoje 10 vaizduojamas įvairiais atstumais nuo galaktikos centro esančių spiečių tankis, masė ir dydis. Jaunesni spiečiai pažymėti mėlynai, tuo tarpu senesni – raudonai. Šių dviejų populiacijų vidutinės reikšmės pažymėtos atitinkamų spalvų kreivėmis. Iliustracijoje 10a matome, kad daugiau tankesnių senų spiečių yra randama netoli galaktikos centro. Šis efektas susidaro dėl didesnio kiekio masyvesnių ir kompaktiškesnių spiečių netoli centro (10b ir 10c pav.). Tai paaiškina spiečių mirtingumu: tankesnėje aplinkoje, ties galaktikos centru, spiečiai gyvena trumpiau ir dėl to randama mažai senų, didelio spindulio ir mažos masės spiečių.



9 pav. Spiečių kandidatų kiekis įvairiais nuotoliais nuo galaktikos spiralinės vijos. Iliustracijose vaizduojama: (a) 3 skirtingi amžiaus intervalai, (b) 2 skirtingi ekstinkcijos intervalai (spiečiams, kurių amžius  $\log_{10}(t/\text{yr}) > 8$ ) ir (c) 3 tankio intervalai (spiečiams, kurių amžius  $\log_{10}(t/\text{yr}) < 7$ ). Intervalo plotis, kuriame skaičiuojamas spiečių kandidatų kiekis kiekviename atstumo taške, pavaizduotas iliustracijoje (b). Neigiami atstumai vaizduoja spiečius, atsiliekančius nuo spiralinių vijų, tuo tarpu teigiami atstumai – pralenkiančius. Užtušutas fonas ties kreivėmis vaizduoja Puasono standartinį nuokrypį.

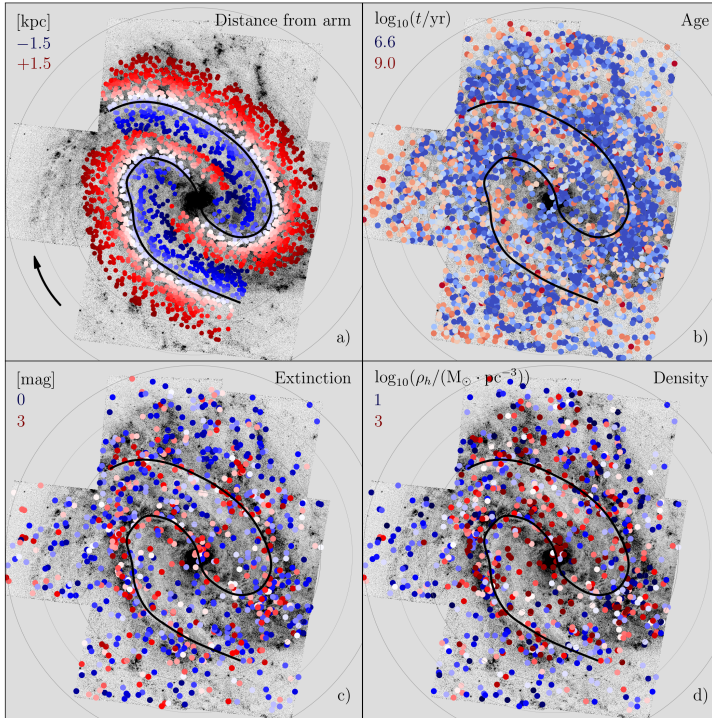


10 pav. Spiečių kandidatų tankiai (a), masės (b) ir dydžiai (c) įvairiais nuotoliais nuo galaktikos centro. Apskritimų spalvos reprezentuoja amžių, pradedant nuo  $\log_{10}(t/\text{yr}) \leq 7$  (mėlyni apskritimai) ir iki  $\log_{10}(t/\text{yr}) \geq 9$  (raudoni apskritimai). Brūkšninės kreivės vaizduoja vidutines parametrų vertes jauniems ( $\log_{10}(t/\text{yr}) < 7.5$ ) ir seniems ( $\log_{10}(t/\text{yr}) \geq 8.5$ ) spiečių kandidatams. Užtušotos zonos vaizduoja kiekvieno parametro standartinį nuokrypį. Linija dešiniame viršutiniame iliustracijos (a) kampe vaizduoja intervalą, naudotą vidurkių skaičiavimui.

Iliustracijoje 11 vaizduojamas erdvinis spiečių kandidatų pasiskirstymas. Visuose paveikslukuose vidinės vijų sritys, naudotos analizei 9 pav., pažymėtos juodomis kreivėmis. Spiečių kandidatai, nuspalvinti pagal atstumą nuo vijos, pavaizduoti 11a pav. Mėlyna spalva pažymėti spiečiai atsiliekantys nuo vijos (neigiami atstumai 9 pav.), tuo tarpu raudona spalva pažymėti spiečiai priešais viją (teigiami atstumai 9 pav.).

Iliustracijoje 11b pavaizduotas spiečių kandidatų pasiskirstymas pagal amžių. Matomas didesnis kiekis jaunų spiečių spiralinėse vijose ir kituose žvaigždėdaros regionuose, tuo tarpu senesni spiečiai pasiskirstę po galaktiką daug tolygiau. Tai atitinka Kim et al. (2012) gautą žvaigždžių amžių pasiskirstymą.

Iliustracijoje 11c pavaizduota masyvesnių negu  $\log_{10}(M/M_{\odot}) > 4$  spiečių ekstinkcija. Matome daugiau spiečių su didelėmis ekstinkcijos vertėmis spiralinėse vijose bei kituose regionuose su dideliu kiekiu tarpžvaigždinių dulkių. Iliustracijoje 11d pavaizduoti tos pačios masyvesnių spiečių imties tankiai. Matome daugiau didelio tankio spiečių ties spiralinėmis vijomis ir arčiau galaktikos centro, kaip ir 9c bei 10a pav.



11 pav. Spiečių kandidatų erdvinis pasiskirstymas, pavaizduotas ant F438W filtro mozaikos. Iliustracijoje (a) vaizduojamas spiečių kandidatų atstumas nuo artimiausio spiralinės vijos taško, kur raudona spalva koduoja spiečių kandidatus esančius priekyje vijos, o mėlyna – už vijos. Iliustracijoje (b) pavaizduoti spiečių kandidatų amžiai, nuo  $\log_{10}(t/\text{yr}) = 6.6$  (mėlyna spalva) ir iki  $\log_{10}(t/\text{yr}) \geq 9$  (raudona spalva). Iliustracija (c) rodo  $\log_{10}(M/M_\odot) > 4$  masės spiečių kandidatų ekstinkcijas, kur spalva kinta nuo mėlynos ( $A_V = 0$  mag), iki raudonos ( $A_V = 3$  mag). Iliustracija (d) vaizduoja tą pačią spiečių imtį kaip ir iliustracija (c), bet šiuo atveju spalvos atitinka tankius: mėlyna spalva –  $\log_{10}(\rho_h/(M_\odot \cdot \text{pc}^{-3})) < 1$ , raudona spalva –  $\log_{10}(\rho_h/(M_\odot \cdot \text{pc}^{-3})) \geq 3$ . Koncentriniai žiedai rodo atstumą nuo galaktikos centro nuo 1 kpc iki 6 kpc. Rodyklė iliustracijoje (a) rodo galaktikos sukimosi kryptį.

## 5. Pagrindiniai disertacijos rezultatai

Disertacijoje pristatytas konvoliucinis neuroninis tinklas, leidžiantis vienu metu iš kelių filtrų nuotraukų nustatyti žvaigždžių spiečių evoliucinius (amžius, masė), struktūrinius (dydis) ir aplinkos (ekstinkcija) parametrus. Šis tinklas taip pat pritaikomas spiečių paieškai.

Šis konvoliucinis neuroninis tinklas buvo testuotas su dirbtiniais spiečiais Hubble kosminio teleskopo M31 galaktikos stebėjimų kontekste. Nustatyta, kad žvaigždžių spiečių parametrus galima patikimai įvertinti spiečiams, kurių amžius – tarp  $\log_{10}(t/\text{yr}) = 7.0$  ir  $9.0$ , masė – tarp  $\log_{10}(M/M_{\odot}) = 2.4$  ir  $3.6$  bei dydis – tarp  $\log_{10}(r_h/\text{arcsec}) = -0.8$  ir  $0.0$ .

Ekstinkcijos nustatymo tikslumas įvertintas naudojant M83 galaktikos duomenis, atsižvelgiant į išsigimimus tarp parametų. Tinklas testuotas su dirbtiniais spiečiais, kurių amžius – tarp  $\log_{10}(t/\text{yr}) = 6.6$  ir  $10.1$ , masė – tarp  $\log_{10}(M/M_{\odot}) = 3.5$  ir  $5.5$ , dydis – tarp  $0.04$  ir  $0.4$  arcsec, o ekstinkcija  $A_V \leq 3$  mag. Šio tinklo parametų nustatymas yra tikslus spiečiams, kurių amžius  $\log_{10}(t/\text{yr}) < 8$ , tuo tarpu senesniems spiečiams nustatymas gali būti nepatikimas dėl amžiaus-ekstinkcijos išsigimimo.

Testai su tikrais spiečiais buvo atliekami lyginant gautus parametrus su trimis skirtingais M83 spiečių katalogais: Bastian et al. (2011), Ryon et al. (2015) ir Harris et al. (2001). Šių autorių nustatyti ir disertacijoje pateikiami parametrai gerai atitinka.

Disertacijoje pasiūlytas pilnas algoritmas spiečių paieškai ir parametų nustatymui naudojant M83 mozaikines nuotraukas. Juo

surinkta 3380 spiečių kandidatų ir ištirti šios populiacijos parametrai vijų bei galaktikos centro atžvilgiu. Pastebėtas amžiaus gradientas spiralinių vijų atžvilgiu, atitinkantis spiralinių vijų tankio teoriją. Taip pat buvo rasta daugiau tankių senesnių spiečių netoli galaktikos centro, o galaktikos pakraščiuose – mažiau.

Konvoliuciniai neuroniniai tinklai apjungia įvairius metodus, naudojamus žvaigždžių spiečių analizėje – paiešką bei įvairių parametru nustatymą – į vieną metodą, leidžiantį nuosekliai tirti šiuos objektus ir jų populiacijas.



# Literatūros sąrašas

- Bastian, N., Adamo, A., Gieles, M., et al. 2011, MNRAS, 417, L6
- Bastian, N., Adamo, A., Gieles, M., et al. 2012, MNRAS, 419, 2606
- Blair, W. P., Chandar, R., Dopita, M. A., et al. 2014, ApJ, 788, 55
- Cabrera-Vives, G., Reyes, I., Förster, F., Estévez, P. A., & Maureira, J.-C. 2017, ApJ, 836, 97
- Dalcanton, J. J., Williams, B. F., Lang, D., et al. 2012, ApJS, 200, 18
- de Meulenaer, P., Stonkutė, R., & Vansevičius, V. 2017, A&A, 602, A112
- Dieleman, S., Willett, K. W., & Dambre, J. 2015, MNRAS, 450, 1441
- Domínguez Sánchez, H., Huertas-Company, M., Bernardi, M., Tuccillo, D., & Fischer, J. L. 2018, MNRAS, 476, 3661
- Dopita, M. A., Blair, W. P., Long, K. S., et al. 2010, ApJ, 710, 964
- Elson, R. A. W., Fall, S. M., & Freeman, K. C. 1987, ApJ, 323, 54
- Flamary, R. 2016, ArXiv e-prints [arXiv:1612.04526]
- Harris, J., Calzetti, D., III, J. S. G., Conselice, C. J., & Smith, D. A. 2001, The Astronomical Journal, 122, 3046
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. 2016, in 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 770
- Heald, G., de Blok, W. J. G., Lucero, D., et al. 2016, MNRAS, 462, 1238

- Herbel, J., Kacprzak, T., Amara, A., Refregier, A., & Lucchi, A. 2018, ArXiv e-prints [arXiv:1801.07615]
- Huertas-Company, M., Primack, J. R., Dekel, A., et al. 2018, *The Astrophysical Journal*, 858, 114
- Kim, H., Whitmore, B. C., Chandar, R., et al. 2012, *ApJ*, 753, 26
- Krumholz, M. R., Fumagalli, M., da Silva, R. L., Rendahl, T., & Parra, J. 2015, *MNRAS*, 452, 1447
- Lada, C. J. & Lada, E. a. 2003, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 73
- Lanusse, F., Ma, Q., Li, N., et al. 2018, *MNRAS*, 473, 3895
- Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., et al. 2014, in *Computer Vision – ECCV 2014*, ed. D. Fleet, T. Pajdla, B. Schiele, & T. Tuytelaars (Cham: Springer International Publishing), 740
- Petrillo, C. E., Tortora, C., Chatterjee, S., et al. 2017, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 472, 1129
- Portegies Zwart, S. F., McMillan, S. L. W., & Gieles, M. 2010, *ARA&A*, 48, 431
- Pourrahmani, M., Nayyeri, H., & Cooray, A. 2018, *ApJ*, 856, 68
- Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. 2017, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39, 1137
- Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., et al. 2015, *International Journal of Computer Vision*, 115, 211
- Ryon, J. E., Bastian, N., Adamo, A., et al. 2015, *MNRAS*, 452, 525
- Sánchez, N., Alfaro, E. J., & López-Martínez, F. 2020, *MNRAS*, 495, 2882

- Sedaghat, N. & Mahabal, A. 2018, MNRAS, 476, 5365
- Shabani, F., Grebel, E. K., Pasquali, A., et al. 2018, MNRAS, 478, 3590
- Shallue, C. J. & Vanderburg, A. 2018, AJ, 155, 94
- Shu, F. H. 2016, ARA&A, 54, 667
- Whitmore, B. C., Chandar, R., Kim, H., et al. 2011, ApJ, 729, 78
- Zimmer, P., Rand, R. J., & McGraw, J. T. 2004, ApJ, 607, 285

# Trumpai apie disertantą

Gimiau 1989 metų rugpjūčio 3 dieną Vilniuje, Lietuvoje. Lankiau Vilniaus Senvagės vidurinę mokyklą, kurią baigiau 2008 metais.

Po mokyklos įstojau į Vilniaus universitetą ir 2012 metais gavau Programų sistemų bakalauro laipsnį. Mano bakalauro darbui – „Teksto atpažinimas sudėtingų aplinkų vaizduose“ – vadovavo Andrius Grevys. Studijų metu tyriau „Boosting“ algoritmų pritaikymą teksto suradimui ir lokalizacijai nuotraukose, pasiūliau metodą konstruoti tekstui specifinius klasifikatorius, leidžiančius teksto suradimą atlikti greitai ir efektyviai.

Studijas toliau tęsiau Vilniaus universitete. 2015 metais gavau Informatikos magistro laipsnį, Cum Laude. Mano magistro darbui – „Dinaminis išmetimo algoritmas giliems neuroniniams tinklams mokytui“ – vadovavo prof. habil. dr. Šarūnas Raudys. Studijų metu tyriau gilių neuroninių tinklų reguliarizaciją išmetimo (angl. dropout) metodu, pasiūliau naują būdą atlikti mokymo metu reguliuojamą išmetimą kiekvienam tinklo sluoksniui atskirai.

Man buvo pasiūlyta doktoranto pozicija Vilniaus universiteto Astronomijos observatorijoje 2015 metais, vadovaujant dr. Donatui Narbučiui. Ši disertacija yra viso darbo nuo tos datos rezultatas.

# UŽRAŠAMS

# UŽRAŠAMS

# UŽRAŠAMS

Vilniaus universiteto leidykla  
Saulėtekio al. 9, III rūmai, LT-10222 Vilnius  
El. p.: [info@leidykla.vu.lt](mailto:info@leidykla.vu.lt), [www.leidykla.vu.lt](http://www.leidykla.vu.lt)  
Tiražas 16 egz.