

VILNIAUS UNIVERSITETAS

FIZINIŲ IR TECHNOLOGIJOS MOKSLŲ CENTRAS

Philippe de Meulenaer

INTEGRALINIŲ ŽVAIGŽDŽIŲ SPIEČIŲ PARAMETRŲ
TIKSLUMAS.
STOCHASTINIAI EFEKTAI

Daktaro disertacijos santrauka

Fiziniai mokslai, fizika (02 P)

Vilnius, 2015

Disertacija parengta 2010–2014 metais Vilniaus universitete.

Mokslinis vadovas –

Prof. dr. Vladas Vansevičius (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Disertacija ginama Vilniaus universiteto Fizikos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas –

Dr. Arūnas Kučinskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Nariai:

Dr. Algirdas Kazlauskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Dr. Julius Sperauskas (Vilniaus universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Dr. Laimons Začs (Latvijos universitetas, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Dr. Kastytis Zubovas (Fizinių ir technologijos mokslų centras, fiziniai mokslai, fizika – 02 P)

Disertacija bus ginama viešame Fizikos mokslo krypties tarybos posėdyje 2015 m. rugsėjo 23 d. 11:00 Vilniaus universiteto Astronomijos observatorijoje.

Adresas: M. K. Čiurlionio 29, LT-03100, Vilnius, Lietuva

Telefonas: (+370-5) 239 8760; Faksas: (+370-5) 239 8767

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2015 m. rugpjūčio mėn. 21 d.

Disertacijos santrauka yra Vilniaus universiteto ir Fizinių ir technologijos mokslų centro bibliotekose bei interneto svetainėje adresu:

www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

VILNIUS UNIVERSITY

CENTER FOR PHYSICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

Philippe de Meulenaer

THE ACCURACY OF INTEGRATED STAR CLUSTER
PARAMETERS.
THE EFFECTS OF STOCHASTICITY

Summary of Doctoral Dissertation

Physical sciences, Physics (02 P)

Vilnius, 2015

Doctoral dissertation was completed during 2010–2014 at Vilnius University.

Scientific supervisor –

Prof. dr. Vladas Vansevičius (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P)

Council of the doctoral dissertation defense:

Chairman –

Dr. Arūnas Kučinskas (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P)

Members:

Dr. Algirdas Kazlauskas (Vilnius University, Physical sciences, Physics – 02 P)

Dr. Julius Sperauskas (Vilniaus University, Physical sciences, Physics – 02 P)

Dr. Laimons Začs (University of Latvia, Physical sciences, Physics – 02 P)

Dr. Kastytis Zubovas (Center for Physical Sciences and Technology, Physical sciences, Physics – 02 P)

Doctoral dissertation will be defended at the public meeting of the Council of the doctoral dissertation defense held at Vilnius University Observatory at 11:00 a.m. on 23 September, 2015

Address: M. K. Čiurlionio 29, LT-03100, Vilnius, Lithuania

Tel.: (+370-5) 239 8760; Fax.: (+370-5) 239 8767

Summary of the doctoral dissertation was mailed on 21 August 2015

Summary of the doctoral dissertation is available at the libraries of Vilnius University and Center for Physical Sciences and Technology, and at the internet address: www.vu.lt/lt/naujienos/ivykiu-kalendorius

Tyrimo motyvacija

Žvaigždžių spiečiai yra labai svarbūs įvairių tipų galaktikų objektai, nes manoma, kad dauguma žvaigždžių gimsta būtent spiečiuose. Todėl tiriant šiuos objektus reikia gerai suprasti žvaigždėdaros procesus galaktikose. Kita vertus, gilus spiečių evoliucijos supratimas yra būtinas modeliuojant galaktikų formavimąsi.

Šio darbo tikslas – išnagrinėti dvi pagrindines problemas, su kuriomis susiduriama norint nustatyti svarbiausius žvaigždžių spiečių fizinius parametrus (amžių, masę, metalingumą ir ekstinkciją), ypač kai spiečiai yra kitose galaktikose, pvz., Andromedos (M31) ar Trikampio (M33), ir jų tyrimui naudojami integralinės fotometrijos metodai. Pirmoji problema yra susijusi su tuo, kad naudojant plačiajuostę integralinę fotometriją, skirtingi žvaigždžių spiečiai gali turėti panašius spalvos rodiklių rinkinius – parametrų išsigimimas. Antroji priežastis, dėl kurios nukenčia spiečių parametrų nustatymo tikslumas, yra susijusi su žvaigždžių masės skirstinio tikimybiniu (stochastiniu) pobūdžiu, t. y. stochastiškai kintančiu šviesių žvaigždžių skaičiumi spiečiuje. Stochastiniai efektai yra labai svarbūs tiriant jaunas, o ypač nedidelės masės, žvaigždžių spiečius. Netikslumai nustatant spiečių parametrus dėl stochastinių efektų gali netgi viršyti paklaidas dėl parametrų išsigimimo, kurias lemia fotometrinio metodo trūkumai.

Naudojant integralinę fotometriją žvaigždžių spiečių fizinių parametrų nustatymui dažniausiai buvo taikomas paprastųjų žvaigždžių populiacijų (Simple Stellar Population, SSP) artinys, t. y. daroma prielaida, kad žvaigždžių masės spiečiuose yra pasiskirsčiusios tolygiai pagal pradinę masės funkciją (Initial Mass Function, IMF), kurioje neatsižvelgiama į stochastinį žvaigždžių masių skirstinio pobūdį spiečiaus gimimo metu. Modeliuojant stochastinį žvaigždžių masių skirstinį gaunami spiečiai, kurių fiziniai parametrai daug geriau atitinka stebimą spiečių integralinių spalvų sklaidą. Todėl, norint spiečių parametrus nustatyti tiksliau, reikia naudoti ne SSP artinį, o modeliuoti stochastiškai gimstančius realistinius žvaigždžių spiečius.

Šios disertacijos tikslą padiktavo poreikis kuo tiksliau masiškai nustatyti žvaigždžių spiečių parametrus ir efektyviai panaudoti vis didėjantį aukštos kokybės stebėjimų medžiagos, gaunamos antžeminiiais ir kosminiais teleskopais, srautą. Mūsų pasiūlyto metodo tikslumas buvo ištirtas pasitelkiant modeliuotus stebėjimų duomenis skirtingose fotometriniuose sistemose. Greta modelinių tyrimų metodo patikra buvo atlikta ir nustatant žvaigždžių spiečių populiacijų parametrus M31 bei M33 galaktikose.

Tyrimo tikslas

Ištirti stochastinių efektų įtaką svarbiausių žvaigždžių spiečių parametru (amžiaus, masės, ekstinkcijos ir metalingumo) nustatymui.

Pagrindiniai uždaviniai

1. Sukurti metodą stochastiniam žvaigždžių masių skirstiniui generuoti žvaigždžių spiečiuose.
2. Sukurti metodą automatiniam modeliūtų ir stebėtų žvaigždžių spiečių integralinės fotometrijos duomenų palyginimui.
3. Ištirti pasiūlyto žvaigždžių spiečių parametru nustatymo metodo tikslumą skirtingose fotometriniuose sistemose.
4. Panaudoti naują žvaigždžių spiečių parametru nustatymo metodą M31 ir M33 galaktikų spiečių tyrimui.

Pagrindiniai rezultatai ir ginami teiginiai

1. Pasiūlytas ir detalai ištirtas žvaigždžių spiečių parametru nustatymo metodas, įskaitantis žvaigždžių masių skirstinio stochastiškumą, įgalina tiksliau nustatyti žvaigždžių spiečių amžių, masę, ekstinkciją ir metalingumą, lyginant su tradiciniais metodais, kuriuose naudojamas paprastųjų žvaigždžių populiacijų artinys.
2. Metodas įgalina įvertinti žvaigždžių spiečių metalingumą kartu naudojant plačią ajuostę fotometriją ultravioletinėje ir optinėje spektro srityse netgi esant vidutiniam fotometrinių stebėjimų tikslumui: $\leq 0,05$ mag optinėje ir $\leq 0,15$ mag ultravioletinėje srityse.
3. Ištyrę M31 galaktikos žvaigždžių spiečių imtį, įrodėme metalingumo efektų įskaitymo svarbą kitų spiečių parametru (amžiaus, masės ir ekstinkcijos) nustatymui.
4. Ištyrę M33 galaktikos žvaigždžių spiečių sistemą, parodėme, kad būdingoji spiečių gyvavimo trukmė yra ~ 300 mln. m. ir sutampa su spiečių gyvavimo trukme M31 galaktikoje.

Publikacijos disertacijos tema recenzuojamuose leidiniuose

1. **de Meulenaer P.**, Narbutis D., Mineikis T., Vansevičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters. I. Age, mass, and extinction degeneracies, *Astronomy and Astrophysics*, 2013, 550, A20
2. **de Meulenaer P.**, Narbutis D., Mineikis T., Vansevičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters. II. The degeneracies of age, mass, extinction, and metallicity, *Astronomy and Astrophysics*, 2014, 569, A4
3. **de Meulenaer P.**, Narbutis D., Mineikis T., Vansevičius V., Stochasticity in star clusters: Reduced Random Sampling Method, *Baltic Astronomy*, 2014, 23, 199
4. **de Meulenaer P.**, Narbutis D., Mineikis T., Vansevičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters. III. Application on M31 PHAT clusters, *Astronomy and Astrophysics*, 2015, 574, A66
5. **de Meulenaer P.**, Narbutis D., Mineikis T., Vansevičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters. IV. The M33 star cluster system, *Astronomy and Astrophysics*, 2015 (priimta spaudai)

Publikacijos recenzuojamuose leidiniuose

1. **de Meulenaer P.**, Carrier F., Miglio A., Bedding T. R., Campante T., Eggenberger P., Kjeldsen H., Montalbán J., Core properties of Alpha Centauri A using asteroseismology, *Astronomy and Astrophysics*, 2010, 523, 54
2. Narbutis D., Semionov D., Stonkutė R., **de Meulenaer P.**, Mineikis T., Bridžius A., Vansevičius V., Deriving structural parameters of semi-resolved star clusters I. Program for crowded fields - FitClust, *Astronomy and Astrophysics*, 2014, 574, A30
3. Narbutis, D., Stonkutė, R., **de Meulenaer, P.**, Mineikis, T., Vansevičius V., Structural Parameters of Star Clusters: Stochastic Effects, *Baltic Astronomy*, 2014, 23, 103

Publikacija disertacijos tema konferencijos leidinyje

de Meulenaer P., D. Narbutis, T. Mineikis, V. Vansevičius, Stochasticity effects on derivation of physical parameters of unresolved star clusters, *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, 2013, v. 84, p. 204

Pranešimai disertacijos tema mokslinėse konferencijose

1. **de Meulenaer P.**, Narbutis D., Vansevičius V., Physical parameters of star clusters: stochasticity and degeneracies, “39 Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija”, 2011 m. spalio mėn. 6-8 d., Vilnius, Lietuva (stendinis pranešimas)
2. **de Meulenaer P.**, Narbutis D., Mineikis T., Vansevičius V., Stochasticity effects on derivation of physical parameters of unresolved star clusters, Konferencija “Reading the book of globular clusters with the lens of stellar evolution”, 2012 m. lapkričio mėn. 26-28 d., Roma, Italija (stendinis pranešimas)
3. **de Meulenaer P.**, Narbutis D., Mineikis T., Vansevičius V., Star cluster parameters from integrated photometry: The case of WFC3@HST. Konferencija “European Week of Astronomy and Space Science”, 2013 m. liepos mėn. 12-16 d., Turku, Suomija (žodinis pranešimas)
4. **de Meulenaer P.**, Narbutis D., Mineikis T., Vansevičius V., Star cluster parameters from integrated photometry: The case of WFC3. Konferencija “Evolution of Star Clusters: From Star Formation to Cosmic Ages (Annual Meeting of the Astronomische Gesellschaft)”, 2013 m. rugsėjo mėn. 24-27 d., Tübingen, Vokietija (stendinis pranešimas)
5. **de Meulenaer P.**, Narbutis D., Mineikis T., Vansevičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters: age-mass-extinction-metallicity problem, Konferencija “Multiwavelength-surveys: Galaxy Formation and Evolution from the early universe to today”, 2014 May 12-16, Dubrovnik, Kroatia (stendinis pranešimas, pristatė D. Narbutis)
6. Narbutis D., **de Meulenaer P.**, Stonkutė R., Mineikis T., Vansevičius V., Stochastic Effects in Star Clusters, Konferencija “Resolved and unresolved stellar populations”, 2014 m. spalio mėn. 13-17 d., Garching, Vokietija (stendinis pranešimas, pristatė D. Narbutis)
7. **de Meulenaer P.**, Narbutis D., Mineikis T., Vansevičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters in the M33 galaxy, “41 Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija”, 2015 birželio mėn. 17-19, Vilnius, Lietuva (žodinis pranešimas)

Asmeninis indėlis

Autorius kartu su publikacijų bendraautoriais sukūrė ir pritaikė naują metodą, įskaitantį stochastinį žvaigždžių masių skirstinio pobūdį, žvaigždžių spiečių parametrų nustatymui. Bendraatoriai dalyvavo interpretuojant mokslinius rezultatus ir rengiant publikacijas. Autorius atliko visus programavimo ir metodo testavimo darbus, M31 ir M33 galaktikų žvaigždžių spiečiams nustatė fizinius parametrus. Autoriaus bendras indėlis yra ne mažesnis nei 70 %.

Disertacijos struktūra

Disertacija susideda iš **įvado**, trijų **skyrių**, **išvadų** ir naudotos **literatūros sąrašo**.

Pirmajame skyriuje aptariama žvaigždžių spiečių stochastiškumo problematika, parodyta, kad tradicinis SSP artinys nėra gera apsimacija spiečių parametrų nustatymui, pristatytas spiečių modelių tinklas.

Antrajame skyriuje yra aptartas naujas žvaigždžių spiečių fizinių parametrų nustatymo metodas, atsižvelgiant į žvaigždžių masės skirstinio stochastiškumo problemą. Pateikti metodo bandymo su dirbtiniais žvaigždžių spiečiais rezultatai. Tiriant skirtingas fotometrines sistemas parodyta, kad naudojant kartu fotometrinius stebėjimus optinėje ir ultravioletinėje spektro srityse galima išspręsti žvaigždžių spiečių fizinių parametrų išsigimimo problemą.

Trečiajame skyriuje pateikti žvaigždžių spiečių tyrimo M31 ir M33 galaktikose rezultatai. Naudojant M31 Hubble kosminio teleskopo spiečių fotometrijos katalogą buvo nustatyti spiečių fiziniai parametrai, įskaitant metalingumą, ir parodyta metalingumo efektų įskaitymo svarba kitų parametrų nustatymo tikslumui. Apjungiant publikuotus M33 žvaigždžių spiečių stebėjimus optiniame diapazone ir papildžius matavimais artimojoje infraraudonojoje srityje, nustatyti fiziniai spiečių parametrai: amžius, masė, ekstinkcija, o seniems spiečiams ir metalingumas. Remiantis šiais rezultatais apskaičiuota būdingoji spiečių gyvavimo trukmė M33 galaktikoje.

1. Žvaigždžių spiečių modeliavimas

Tradiciškai žvaigždžių spiečių parametru (amžius, masė, ekstinkcija ir metalingumas) nustatymui buvo naudojamas SSP artinys. Tačiau pastarųjų metų darbai (pvz., Santos & Frogel 1997; Deveikis et al. 2008; Fouesneau & Lançon 2010) rodo, kad šie modeliai yra per daug supaprastinti ir neatitinka stebėjimų. Realių žvaigždžių spiečių integralinių spalvos rodiklių sklaida yra daug didesnė negu numato SSP modeliai – efektas stipriau pasireiškia mažos masės žvaigždžių spiečiams, nes šviesių žvaigždžių skaičius juose kiekvienu evoliucijos momentu labiau fliktuoja dėl pradinio žvaigždžių masių skirstinio stochastiškumo. Dėl šios priežasties žvaigždžių spiečių parametru nustatymas naudojant SSP artinį yra netikslus (Fouesneau & Lançon 2010).

Modeliuojant žvaigždžių spiečius reikia pradinę žvaigždžių masės funkciją aprašyti tykimiškai, t. y. žvaigždžių mases generuoti naudojant stochastinį masių skirstinio variantą. Spiečių žvaigždžių masių generavimo procedūra parodyta 1 pav., pradinė masės funkcija (IMF) yra paimta iš Kroupa (2001):

$$\phi(m) = k \cdot C_i \cdot m^{-\alpha_i} \begin{cases} \alpha_0 = 0.3, & \text{kai } m \in [m_0, m_1], \\ \alpha_1 = 1.3, & \text{kai } m \in [m_1, m_2], \\ \alpha_2 = 2.3, & \text{kai } m \in [m_2, m_3], \\ \alpha_3 = 2.3, & \text{kai } m \in [m_3, m_4], \end{cases} \quad (1)$$

kur $m_0 = 0.01M_\odot$, $m_1 = 0.08M_\odot$, $m_2 = 0.5M_\odot$, $m_3 = 1M_\odot$, $m_4 = 150M_\odot$, o k ir C_i yra normavimo konstantos. Kumuliatyvaus žvaigždžių skaičiaus skirstinio funkcija $nCDF$ užrašoma:

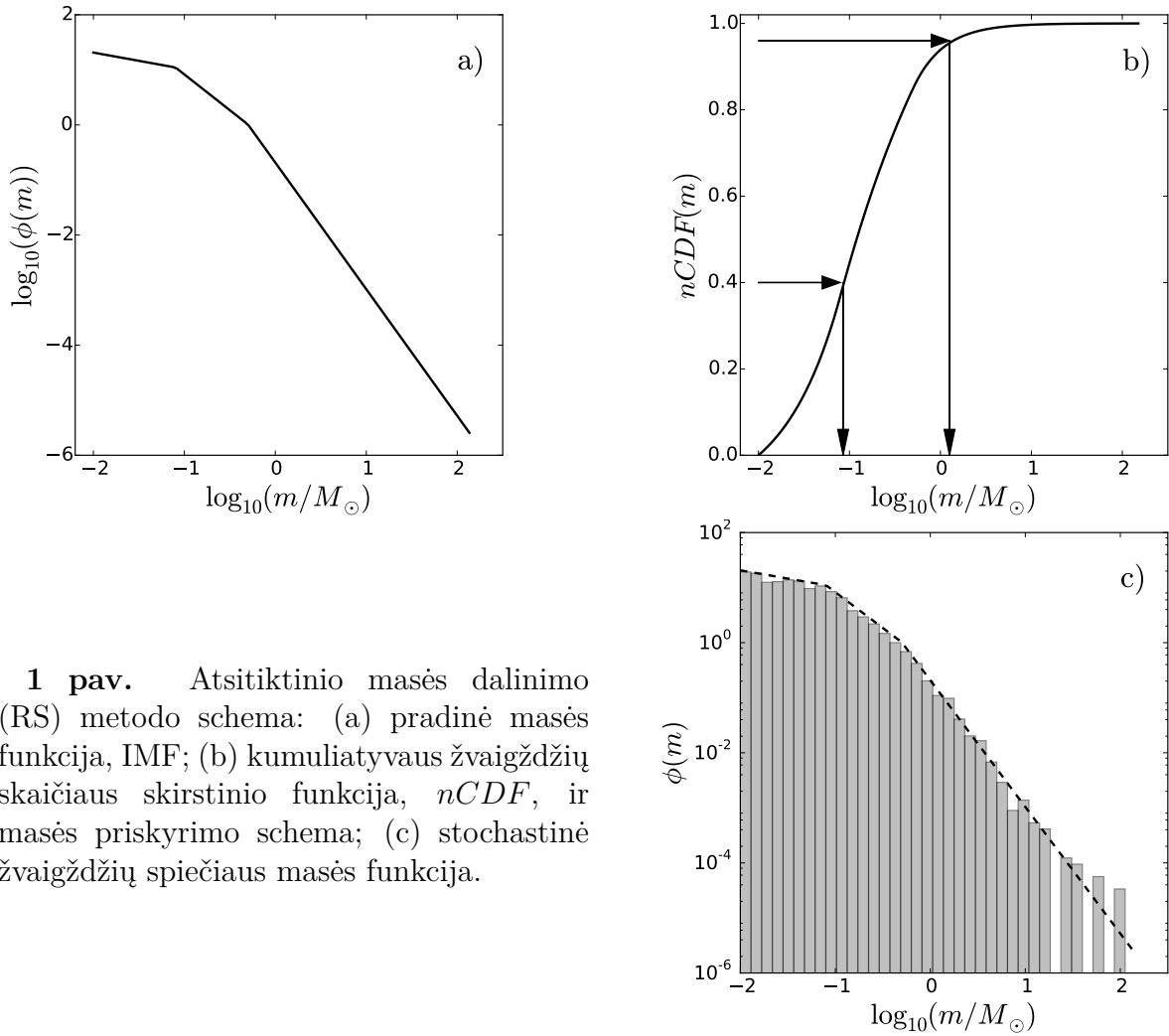
$$nCDF(m_{\text{low}}, m) = \int_{m_{\text{low}}}^m \phi(m') dm' \quad (2)$$

ir nusako žvaigždžių skaičių spiečiuose nuo mažiausios, m_{low} , iki pasirinktos, m , masės žvaigždės. Naudojant IMF galima $nCDF$ funkciją užrašyti analitiškai:

$$nCDF(m_{\text{low}}, m) = \sum_{j=0}^{i-1} \frac{kC_j}{1-\alpha_j} [m_{j+1}^{1-\alpha_j} - m_j^{1-\alpha_j}] + \frac{kC_i}{1-\alpha_i} [m^{1-\alpha_i} - m_i^{1-\alpha_i}], \quad (3)$$

kur i yra apibrėžta 1 lygtyje, $m \in [m_i, m_{i+1}]$.

Žinant $nCDF$ funkciją galima generuoti žvaigždžių mases intervale $[m_0, m_4]$. 1b pav. parodytas $nCDF$ funkcijos verčių konvertavimas į žvaigždžių mases, m .

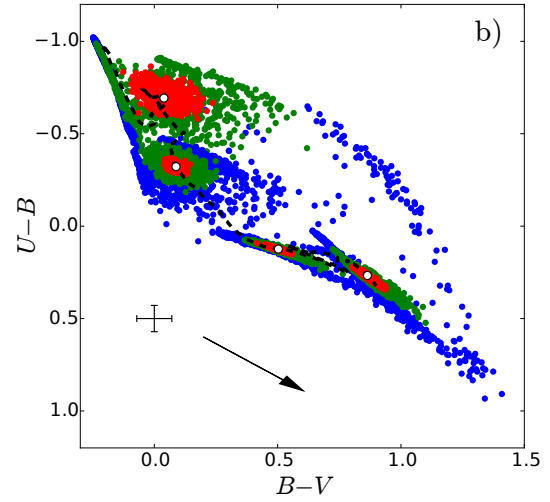
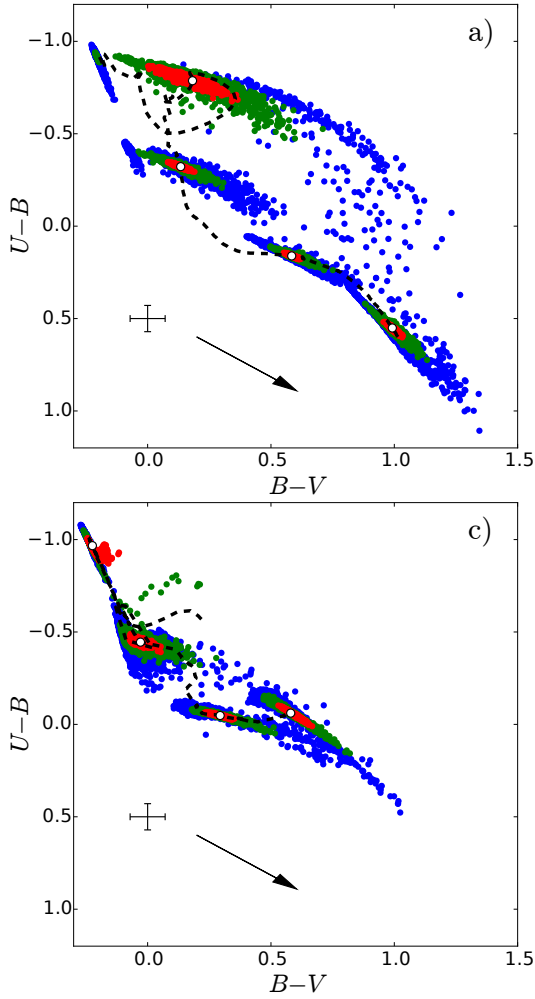


1 pav. Atsitiktinio masės dalinimo (RS) metodo schema: (a) pradinė masės funkcija, IMF; (b) kumulyvaus žvaigždžių skaičiaus skirstinio funkcija, $nCDF$, ir masės priskyrimo schema; (c) stochastinė žvaigždžių spiečiaus masės funkcija.

Tokiu būdu generuojamos spiečiaus žvaigždės, kol jų bendra masė pasiekia užduotą spiečiaus masę. Šią procedūrą toliau vadinsime atsitiktinio masės dalinimo (Random Sampling, RS) metodu. 1c pav. rodo spiečiaus žvaigždžių masės funkciją po masės dalinimo, kur ji palyginta su tolydžia IMF. RS metodo taikymas turi ypač didelę įtaką mažos masės žvaigždžių spiečių integralinei fotometrijai. Tos pačios, tačiau nedidelės, masės spiečiai visada turi skirtingą šviesių žvaigždžių skaičių ir todėl skirtingus integralinius spalvos rodiklius. Šis efektas yra mažiau svarbus masyviausiems spiečiams.

2 pav. iliustruoja stochastiškumo efektus integralinės spiečių fotometrijos rezultatams. Parodyti skirtingo amžiaus, masės ir metalingumo žvaigždžių spiečių modeliai. Kiekvienam parametrų rinkiniui sugeneruota 1000 spiečių (amžius $\log_{10}(t/yr) = 7, 8, 9, 10$; masė $\log_{10}(M/M_{\odot}) = 3, 4, 5$; metalingumas $[M/H] = 0$ (a), -0.6 (b), -2 (c)). Kartu parodyti ir SSP modeliai (brūkšninė linija), kurie maždaug atitinka tik masyviausių spiečių skirstinių vidurkius.

Visų metalingumų atvejais didžiausias stebimas efektas yra mažiausios masės

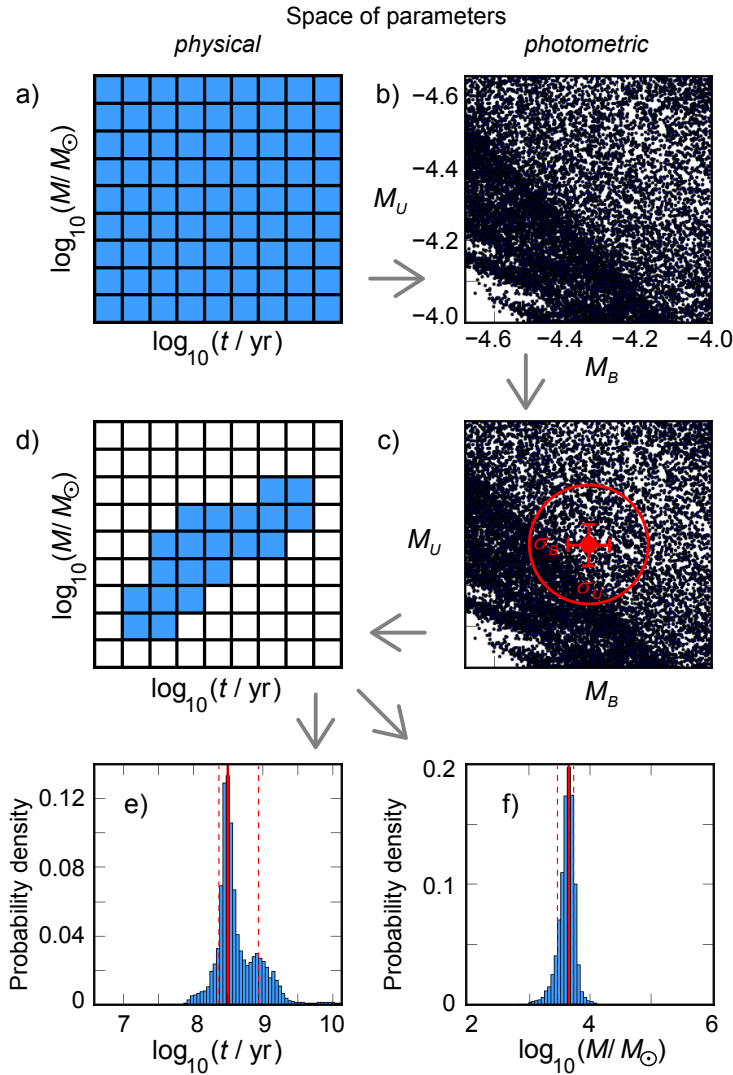


2 pav. Keturių amžių ($\log_{10}(t/yr) = 7, 8, 9, 10$), trijų masių ($\log_{10}(M/M_{\odot}) = 3$ (mėlyni), 4 (žali), 5 (raudoni)) ir trijų metalingumų ($[M/H] = 0$ (a), -0.6 (b), -2 (c)) žvaigždžių spiečių modelių integralinės fotometrijos dvispalvės diagramos. Atitinkami SSP modeliai (brūkšninė linija), fotometrines paklaidos (0.05 mag) ir ekstinkcijos vektorius parodyti kiekviename lange.

($\log_{10}(M/M_{\odot}) = 3$) spiečiams (mėlyni taškai). Modelių amžiaus eiga: jauniausi diagramų viršuje, seniausi – apačioje (pagal $U - B$). Akivaizdu, kad didžiausias spalvos rodiklių sklaidos efektas yra jauniausiems ($\log_{10}(t/yr) = 7$) spiečiams, dėl labai stochastiško supermilžinių ir milžinių atsiradimo. Tačiau didėjant amžiui sklaida palaipsniui mažėja artėdama prie SSP modelių.

Spiečių masės efektas parodytas spalvomis – mėlyna, žalia ir raudona, atitinkamai nuo mažiausios iki didžiausios masės spiečių. Pažymėtina, kad netgi masyviausiems ($\log_{10}(M/M_{\odot}) = 5$) modeliuotiems spiečiams spalvos rodiklių sklaida dar yra ženkli ir turi būti įskaitoma nustatant spiečių parametrus.

Metalingumo efektas (2 pav.) netikėtai taip pat yra labai stiprus – sklaida mažiausio metalingumo ($[M/H] = -2$) spiečiams yra daug mažesnė nei artimo Saulei metalingumo. Tuo būdu stochastiniai efektai yra patys stipriausi metalingiems ir vidutiniškai metalingiems, t. y. galaktikų diskų spiečiams.



3 pav. Žvaigždžių spiečių parametrų nustatymo metodo schema: (a) modelių tinklas amžiaus ir masės erdvėje – ekstinkcija ir metalingumas būtų analogiškai dar dvi koordinatės); (b) modeliai M_U ir M_B ryškių erdvėje, ryškių skaičius nėra ribotas – galima panaudoti visus turimus stebėjimų duomenis; (c) visi modeliai $3\text{-}\sigma$ atstumu nuo stebėjimų rezultatų (viduje raudono apskritimo) bus panaudoti spiečiaus parametrų nustatymui; (d) artimi stebėjimams ($\leq 3\text{-}\sigma$) modelių tinklo mazgai; (e) ir (f) amžiaus ir masės skirstiniai, nustatyti spiečių parametrai parodyti vertikaliomis ištisinėmis, o paklaidų intervalai – brūkšninėmis linijomis.

2. Žvaigždžių spiečių parametrų nustatymas

Spiečių parametrų nustatymo metodo idėja remiasi fotometrinių stebėjimų rezultatų palyginimu su modelių tinklo objektų fotometriniais parametrais 4 dimensijų (amžius, masė, ekstinkcija ir metalingumas) erdvėje. Kiekviename modelių tinklo mazge yra didelis skaičius modelių su tais pačiais fiziniais parametrais, tačiau dėl stochastiškumo jų fotometriniai parametrai skiriasi.

Keturių dimensijų spiečių modelių tinklas yra sukonstruotas visoms fizinių parametrų $\log_{10}(t/\text{yr})$, $\log_{10}(M/M_{\odot})$, $E(B-V)$, $[M/H]$ kombinacijoms užduotose šių parametrų ribose, kurios kvantuojamos tam tikru žingsniu. Kiekviename modelių tinklo mazge yra suskaičiuota 1000 modelių su tais pačiais amžiaus, masės, ekstinkcijos ir metalingumo parametrais. Šie modeliai turi savo fotometrinę erdvę pasirinktoje fotometrinėje, pvz., $UBVRI$, sistemoje. 3 pav. parodyta supaprastinta parametrų nustatymo schema.

Pirmajame variante spiečiaus stebėjimai parametrų nustatymui pateikiami ryški-

ais su paklaidomis, σ , kurios gali būti skirtingos kiekvienam filtrui. Testuojant metodo galimybes skaičiavimai buvo atliekami su tipinėmis optinio diapazono plačiajuostės fotometrijos ryškių paklaidomis, $\sigma = 0.05$ mag. Visi modeliai, esantys arčiau nei per $3\text{-}\sigma$ nuo stebėjimų, surenkami iš modelių tinklo ir toliau analizuojami. Iš atrinktų modelių sukonstruojami parametrų skirstiniai, kurie ir naudojami parametrų nustatymui – 3e,f pav. parodytos amžiaus ir masės histogramos. Surinktiems modeliams (3c pav. raudono apskritimo viduje) suteikiami svoriai: modeliams mažesniu nei $1\text{-}\sigma$ atstumu nuo stebėjimų svoris yra 0.68, modeliams nuo $1\text{-}\sigma$ iki $2\text{-}\sigma$ – 0.28, modeliams nuo $2\text{-}\sigma$ iki $3\text{-}\sigma$ – 0.04. 3e,f pav. skirstinių maksimumo padėtis yra laikoma sprendiniu. Analogiškai nustatoma ekstinkcija ir metalingumas.

Antrasis žvaigždžių spiečių parametrų nustatymo metodo variantas yra tikimybiniis. Panašiai kaip Fouesneau & Lançon (2010) ir Fouesneau et al. (2014), yra apskaičiuojama kiekvieno tinklo modelio tikimybė pagal tai, kiek gerai jis atitinka nagrinėjamo spiečiaus fotometrinius parametrus:

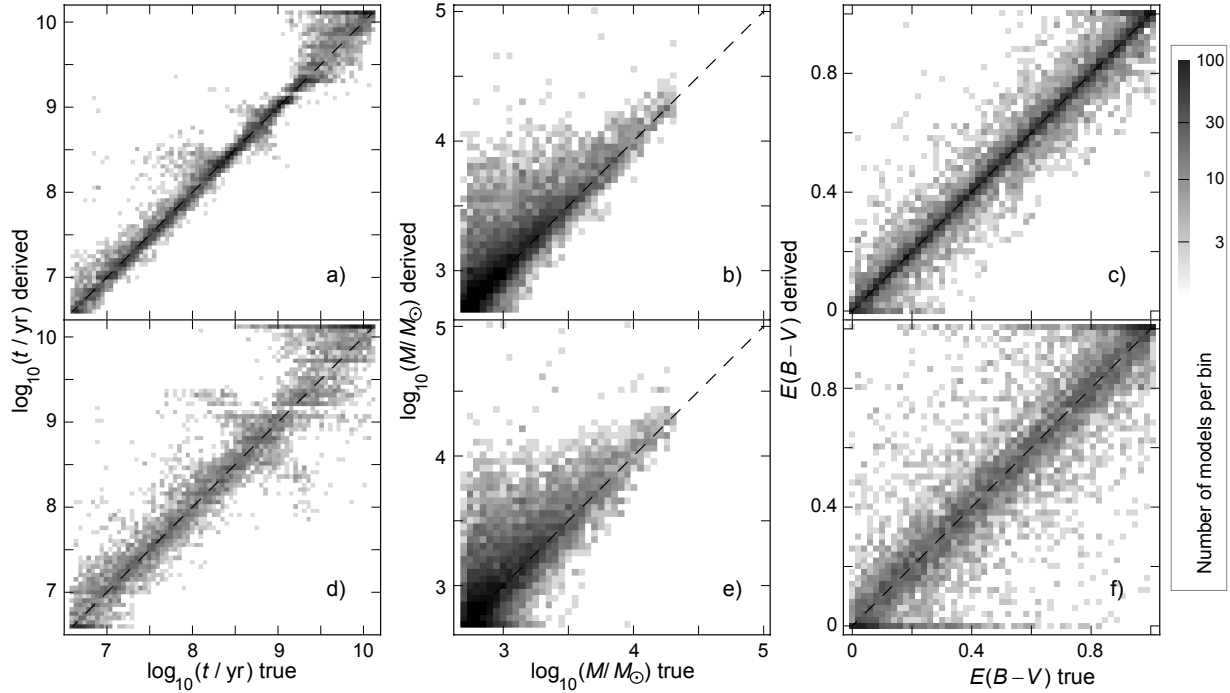
$$L_{\text{model}} = \prod_{f=1}^F \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_f} \exp \left[-\frac{(\text{mag}_{f,\text{obs}} - \text{mag}_{f,\text{model}})^2}{2 \sigma_f^2} \right], \quad (4)$$

kur f nurodo fotometrinės sistemos juostą, mag_f – stebėtą ar modelio ryškį f juostoje, F yra juostų skaičius, pvz., 5 *UBVRI* fotometrinei sistemai. Tada amžiaus t , masės m , ekstinkcijos $E(B - V)$ ir metalingumo $[M/H]$ mazgo tikimybė bus lygi visų to mazgo modelių tikimybių sumai:

$$L_{\text{node}}(t, M, E(B - V), [M/H]) = \sum_{n=1}^N L_{\text{model}, n}, \quad (5)$$

kur N yra modelių skaičius mazge. Taip galima nustatyti spiečiaus parametrus pagal mazgo, kurio tikimybė L_{node} yra didžiausia, parametrų reikšmes. Ši procedūra gali būti naudojama ir su spalvos rodikliais vietoje ryškių, mag_f , pvz., galimos $U - B$, $u^* - g'$ ar kitos ryškių kombinacijos.

Testuodami metodo galimybes naudojome 10 000 spiečių imtis. Modelinių spiečių amžius, $\log_{10}(t/\text{yr})$, buvo atsitiktinai parenkamas $[6.6, 10.1]$ intervale. Jų masės parinkimo tikimybė buvo proporcinga masei su laipsnio rodikliu -2 ir parenkama atsitiktinai $\log_{10}(M/M_{\odot}) = [2.7, 4.3]$ intervale, todėl santykinai daugiau nedidelės masės spiečių buvo naudojama testavimui. Buvo tikrinami du variantai: be ekstinkcijos ir su ekstinkcija, $E(B - V)$, atsitiktinai sugeneruota $[0, 1]$ intervale naudojant standartinį Paukščių Tako ekstinkcijos dėsnį (Cardelli et al. 1989). Metalingumas buvo fiksuotas, $[M/H] = -0.4$.

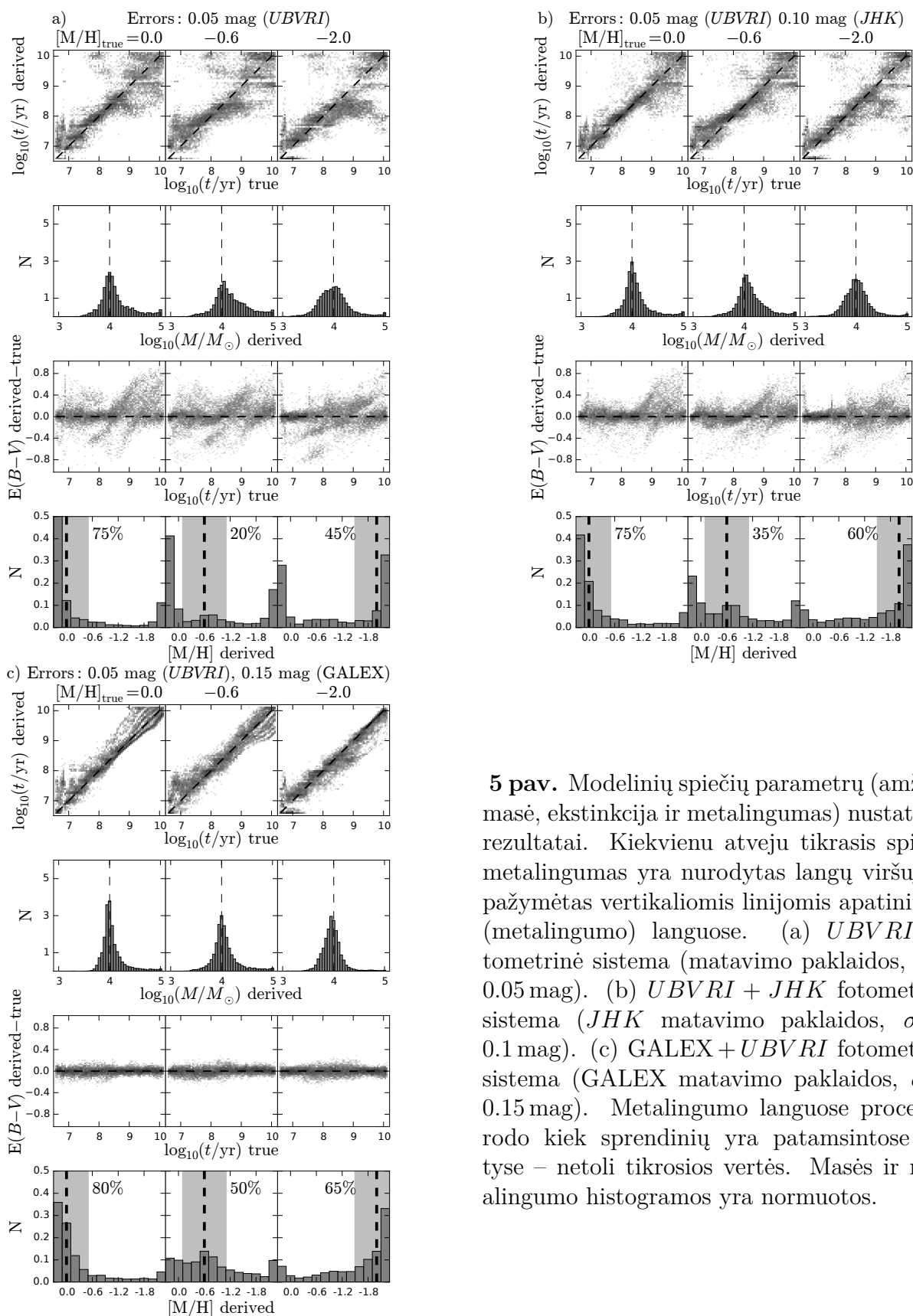


4 pav. Spiečių fizinių parametrų nustatymo tikslumo testas. 10 000 modeliųjų spiečių, ekstinkcija atsitiktinai parinkta intervale, $E(B - V) = [0, 1]$. Langai (a), (b) ir (c) rodo amžių, masę ir ekstinkciją, kai nėra fotometrinių paklaidų; (d), (e) ir (f) kai yra Gausinės fotometrinės paklaidos, $\sigma = 0.05$ mag

4 pav. parodyti spiečių parametrų nustatymo tikslumo testavimo rezultatai esant tarpžvaigždinei ekstinkcijai. Langai (a), (b) ir (c) rodo amžių, masę ir ekstinkciją nustatytus, kai nėra fotometrinių paklaidų, o (d), (e) ir (f) tuos pačius parametrus, kai yra Gausinės fotometrinės paklaidos, $\sigma = 0.05$ mag.

Norėdami nustatyti metodo jautrumą spiečių metalingumui naudojant plačiajuostės fotometrijos rezultatus, atlikome testus su skirtingų metalingumų modeliniais spiečiais, $[M/H] = 0, -0.6$ ir -2 . Siekiant įvertinti metodo patikimumą vienu metu nustatyti spiečiaus amžių, masę, ekstinkciją ir metalingumą, buvo naudojamas modelių tinklas su 13 skirtingų metalingumų, $[M/H]$, nuo -2.2 iki $+0.2$, žingsnis -0.2 . Testavimą atlikome su trimis fotometrinių sistemų konfigūracijomis: $UBVRI$, $UBVRI + JHK$ ir $GALEX + UBVRI$. Šiuose testuose buvo: spiečių masė fiksuota, $\log(M/M_{\odot}) = 4$; ekstinkcija atsitiktinai parenkama intervale, $E(B - V) = [0, 1]$; modeliuojamos Gausinės fotometrinės paklaidos, $\sigma = 0.05$ ($UBVRI$), 0.1 (JHK) ir 0.15 mag ($GALEX$).

5 pav. parodyti testavimo rezultatai trijų skirtingų fotometrinių juostų kombinavimo atvejais. Akivaizdžiai matome, kad $UBVRI$ ir $UBVRI + JHK$ atvejais praktiškai neįmanoma nustatyti metalingumo, tačiau $GALEX + UBVRI$ atvejis realiam taikymui yra pakankamai geras.



5 pav. Modelinių spiečių parametų (amžius, masė, ekstinkcija ir metalingumas) nustatymo rezultatai. Kiekvienu atveju tikrasis spiečių metalingumas yra nurodytas langų viršuje ir pažymėtas vertikaliomis linijomis apatiniuose (metalingumo) languose. (a) *UBVRI* fotometrinių sistema (matavimo paklaidos, $\sigma = 0.05$ mag). (b) *UBVRI* + *JHK* fotometrinių sistema (*JHK* matavimo paklaidos, $\sigma = 0.1$ mag). (c) *GALEX* + *UBVRI* fotometrinių sistema (*GALEX* matavimo paklaidos, $\sigma = 0.15$ mag). Metalingumo languose procentai rodo kiek sprendinių yra patamsintose srityse – netoli tikrosios vertės. Masės ir metalingumo histogramos yra normuotos.

3. Žvaigždžių spiečių tyrimas

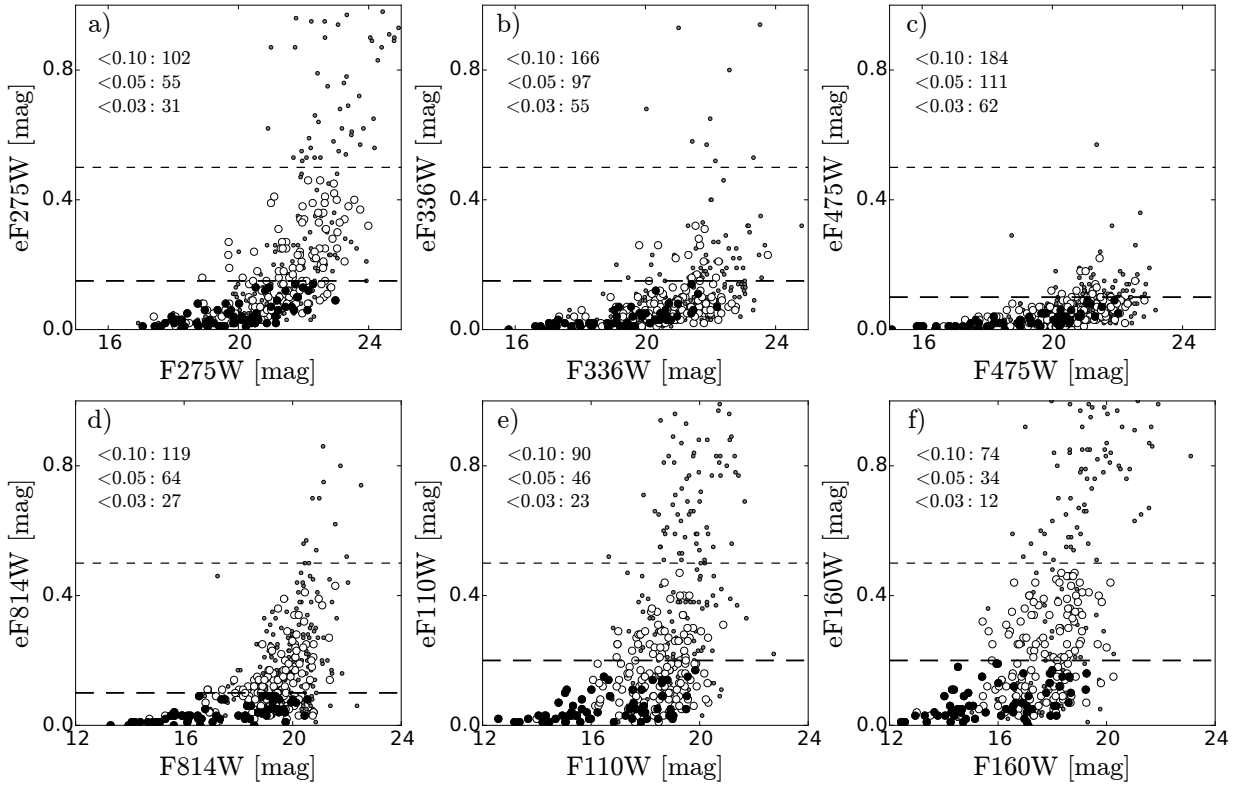
3.1. M31 galaktikos žvaigždžių spiečiai

Naudojant Hubble kosminiu teleskopu (HST) WFC3+ACS atliktą fotometrines M31 galaktikos apžvalgą (Panchromatic Hubble Andromeda Treasury, PHAT) (Dalcanton et al. 2012; Beerman et al. 2012; Weisz et al. 2013) buvo publikuotas 601 žvaigždžių spiečiaus katalogas (Johnson et al. 2012), kurį jau analizavo Fouesneau et al. (2014) ir nustatė spiečių amžių, masę bei ekstinkciją. Todėl šie duomenys gerai tiko mūsų metodo galimybių patikrinimui.

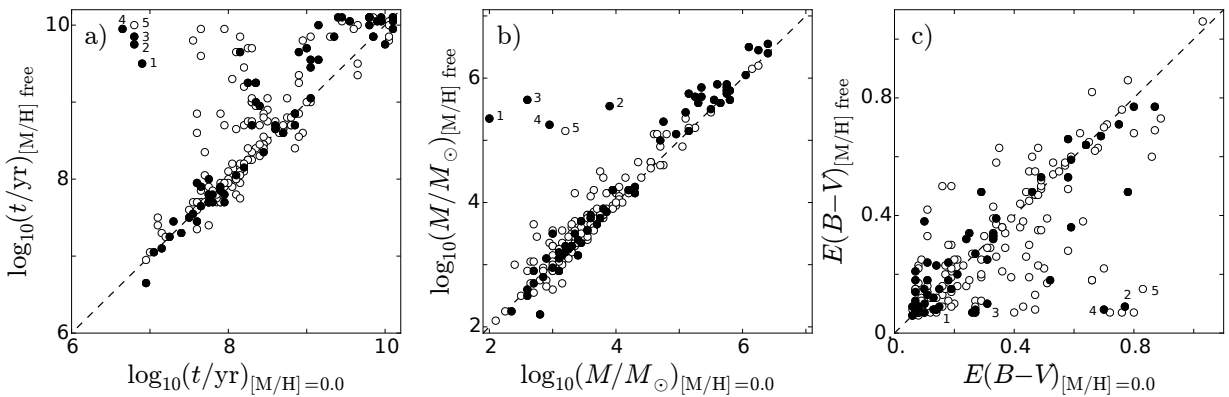
Pirmiausia iš Johnson et al. (2012) katalogo buvo atrinkti 402 spiečiai turintys fotometrinius matavimus visose PHAT juostose. Tada ši imtis buvo suskirstyta į dvi grupes pagal stebėjimų fotometrinių tikslumą (6 pav.). 1-os grupės spiečių (65 objektai) stebėjimų fotometrinių tikslumas: < 0.15 mag F275W ir F336W, < 0.1 mag F475W ir F814W, < 0.2 mag F110W ir F160W juostose. 2-os grupės spiečių (138 objektai) fotometrinių tikslumas nėra blogesnis nei 0.5 mag visose juostose. Tuo būdu, tolesniam tyrimui buvo atrinkti 203 spiečiai. 6 pav. languose taip pat yra nurodytas spiečių skaičius, kurių fotometrinių stebėjimų tikslumas ne blogesnis nei: 0.03, 0.05 ir 0.10 mag.

Abiems (1 ir 2) spiečių grupėms nustatėme fizinius parametrus dviem būdais: pirmiausia fiksuodami Saulės metalingumą, o po to leisdami ir metalingumą nustatyti laisvai kartu su kitais parametrais (modelių tinkle buvo 13 metalingumo, $[M/H]$, reikšmių nuo -2.2 iki $+0.2$, žingsnis -0.2). Spiečių amžiai, masės ir ekstinkcijos pirmuoju atveju (fiksuojant metalingumą, $[M/H] = 0$) gerai atitinka Fouesneau et al. (2014) rezultatus, nes jie parametrus nustatė taip pat naudodami Saulės metalingumą. Parametrų, nustatytų pirmuoju ir antruoju atvejais, palyginimas yra parodytas 7 pav. Akivaizdu, kad metalingumo parametras yra labai svarbus ir komplikuoja spiečių kitų parametrų nustatymą. Tačiau šie rezultatai rodo ypatingą metalingumo įskaitymo svarbą (atsiranda kitų parametrų sistematiniai nuokrypiai) objektams, kurių tikrasis metalingumas ženkliai skiriasi nuo fiksuotos vertės.

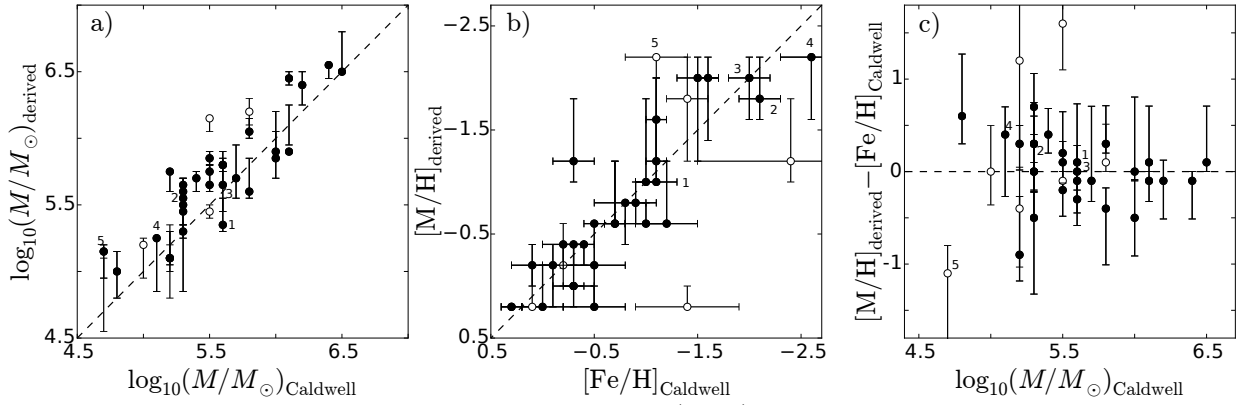
Spiečiai, kurių amžius esant fiksuotam metalingumui buvo jaunas ar vidutinis, tapo senais, kai metalingumas nustatomas laisvai (penki taškai 7a pav. viršuje kairėje). Šie spiečiai taip pat tapo ir masyvesni (7b pav.). Jų panašumą į kamuolinius masyvius spiečius patvirtina HST WFC3+ACS, Sloan Digital Sky Survey (SDSS), Two Micron All Sky Survey (2MASS) ir Galaxy Evolution Explorer (GALEX) vaizdai. Šie objektai (PHAT numeriai: 1439, 428, 680, 683, 1396) taip pat yra spiečių kataloge Revised Bologna Catalog (2012, 5 versija, Galleti et al. 2004), (numeriai:



6 pav. M31 žvaigždžių spiečių fotometrinių stebėjimų HST tikslumas (Johnson et al. 2012). Parodyti 402 objektai, kurie yra išmatuoti visose PHAT apžvalgos juostose. 1-os grupės spiečiai (65 objektai, juodi skrituliukai) – geriausi stebėjimai, kiekvienoje juostoje jų ribinis tikslumas parodytas linija ilgais brūkšneliais. 2-os grupės spiečiai (138 objektai, balti skrituliukai) – patenkinamos kokybės stebėjimai, nei vienoje iš juostų tikslumas nėra blogesnis kaip 0.5 mag (linija trumpais brūkšneliais). Juodi taškai rodo spiečius, kurie nepatenka į 1 ar 2 grupes – fotometrinių stebėjimų tikslumas nors vienoje iš juostų yra blogesni nei 0.5 mag. Languose nurodytas objektų, kurie atitinka tos juostos stebėjimų fotometrinių tikslumą, skaičius.



7 pav. Spiečių amžiaus (a), masės (b) ir ekstinkcijos (c) palyginimas parametrus nustatant su fiksuotu ir laisvu metalingumu. Juodi skrituliukai yra 1-os grupės 65 spiečiai, balti skrituliukai – 2-os grupės 138 spiečiai, kurių fotometrinės paklaidos parodytos 6 pav. Spiečiai pažymėti skaičiais 1–5 yra taip pat pažymėti ir 8 pav.



8 pav. Mūsų rezultatai palyginti su Caldwell et al. (2011) nustatytais parametrais 36 masyviems spiečiams: masė (a), metalingumas (b). (c) lange parodyti mūsų nustatyto ir Caldwell et al. (2011) metalingumo skirtumai priklausomai nuo spiečių masės. Metalingumo paklaidos apskaičiuotos kvadratiškai sumuojant abiejų darbų individualias metalingumo paklaidas. Juodi skrituliukai yra 1-os grupės spiečiai, balti skrituliukai – 2-os grupės spiečiai. Spiečiai pažymėti skaičiais 1–5 yra patys kaip ir 7 pav.

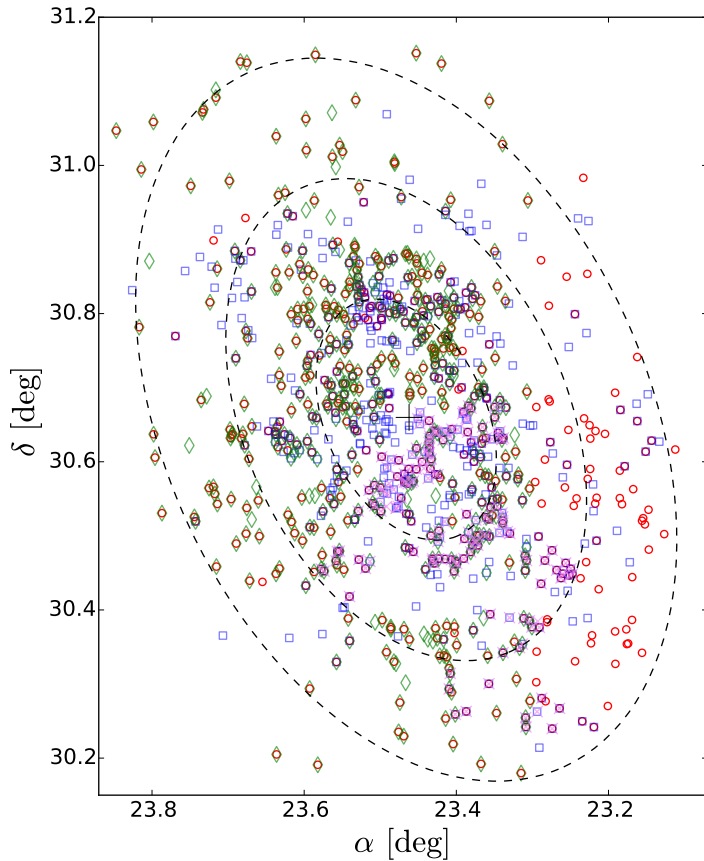
B064D-NB6, B229-G282, B165-G218, B167-G212, NB21-AU5). Jie pažymėti 1–5 skaičiais 7 pav. ir 8 pav.

Caldwell et al. (2011) atliko M31 galaktikos senų žvaigždžių spiečių spektroskopinį tyrimą naudodami Lick rodiklius ir nustatė jų parametrus. Norėdami patikrinti mūsų metodo galimybes nustatyti metalingumą, palyginome 36 spiečių rezultatus (8 pav.). Kadangi Caldwell et al. (2011) fiksavo spiečių amžių – 14 mlrd. m., palyginome tik spiečių masę ir metalingumą. Mūsų rezultatai gerai atitinka spiečių parametrus nustatytus spektroskopiniu metodu. Matome, kad metalingumo nustatymo tikslumas susijęs su spiečių mase, t. y. stebėjimų signalo ir triukšmo santykiu (8c pav.). Mūsų nustatytas penkių aukščiau minėtų spiečių (1–5) metalingumas taip pat gerai atitinka spektroskopinius Caldwell et al. (2011) rezultatus.

3.2. M33 galaktikos žvaigždžių spiečiai

Siekiant patikrinti mūsų sukurto spiečių parametrų nustatymo metodo galimybes ir ištirti M33 galaktikos žvaigždžių spiečių sistemą, buvo surinkti ir homogenizuoti anksčiau publikuoti spiečių fotometrijos katalogai. Galutinis katalogas (910 spiečių) buvo parengtas pagal San Roman et al. (2009), San Roman et al. (2010), Ma (2012, 2013) ir Fan & de Grijs (2014) publikacijas. Visi objektai parodyti 9 pav., simbolių spalvos nurodo originalius katalogus, iš kurių paimti optinės fotometrijos duomenys. 10 pav. parodyti fotometrinių katalogo spiečių duomenys $UBVRI$ ir $u^*g'r'i'z'$ dvispalvėse diagramose.

Mes papildėme šiuos duomenis artimosios infraraudonosios srities matavimais. Fotometravimui buvo panaudoti Two Micron All Sky Survey JHK M33 vaizdai gauti



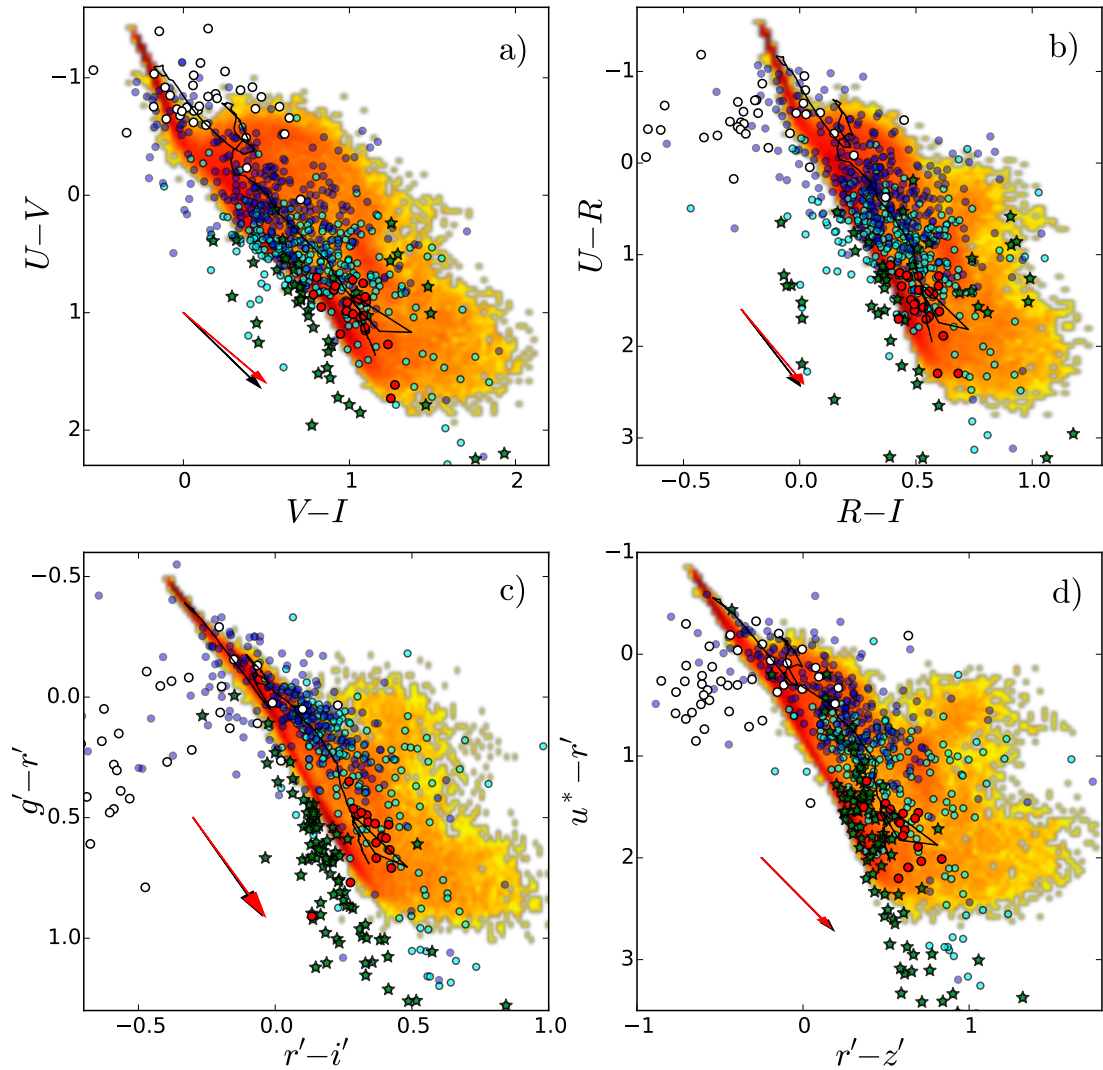
9 pav. Spiečių katalogai panaudoti šiame darbe: Fan & de Grijs (2014) (raudoni simboliai), Ma (2012, 2013) (mėlyni), San Roman et al. (2010) (žali), San Roman et al. (2009) (violetiniai). Elipsės žymi 10', 20' ir 30' atstumą nuo centro.

su 6 kartus ilgesne, nei apžvalgos standartinė, ekspozicijos trukme (2MASS 6X). Taip pat buvo panaudoti ir GALEX¹ matavimai tolimojoje (FUV) bei artimojoje (NUV) ultravioletinės spektro srities juostose. Ultravioletinės (UV) fotometrijos rezultatai tiesiogiai nebuvo naudojami parametrų nustatymui, o tik kaip priemonė patikrinti priklausomybę jauniausių spiečių grupei. Toliau UV šviesiais spiečiais vadinsime tuos, kurių UV ryškis ≤ 20 mag, o kiti UV blausūs. 11 pav. dvispalvėse diagramose parodyti spiečių ultravioletinės srities GALEX ir infraraudonosios srities 2MASS 6X matavimai.

10 ir 11 pav. spiečių stebėjimų duomenys parodyti kartu su SSP modeliais ir su stochastiniu spiečių modelių tinklu. Visi parodyti modeliai yra vieno metalingumo, $[M/H] = -0.4$. Spiečių simbolių spalvinis kodavimas (10 ir 11 pav.): UV šviesūs (mėlyna), UV blausūs (žydra), esantys arti arba viduje HII zonos (balta), kandidatai į kamuolinius spiečius (raudona). 95 objektai (tikėtinos žvaigždės) buvo pašalinti iš tolesnės analizės, jie pavaizduoti žaliomis žvaigždutėmis.

Atmetus 95 įtariamas žvaigždes ir objektus, kurie neturi matavimų visose juostose, tolesnei analizei liko 747 M33 galaktikos žvaigždžių spiečiai. Fizinių parametrų nustatymui buvo panaudotos *UBVRI* ir *JHK* juostos. Pirmajame etape metalingumas buvo fiksuotas visiems spiečiams, $[M/H] = -0.4$. Antrajame etape spiečiams,

¹GALEX: https://archive.stsci.edu/prepds/galex_atlas/index.html



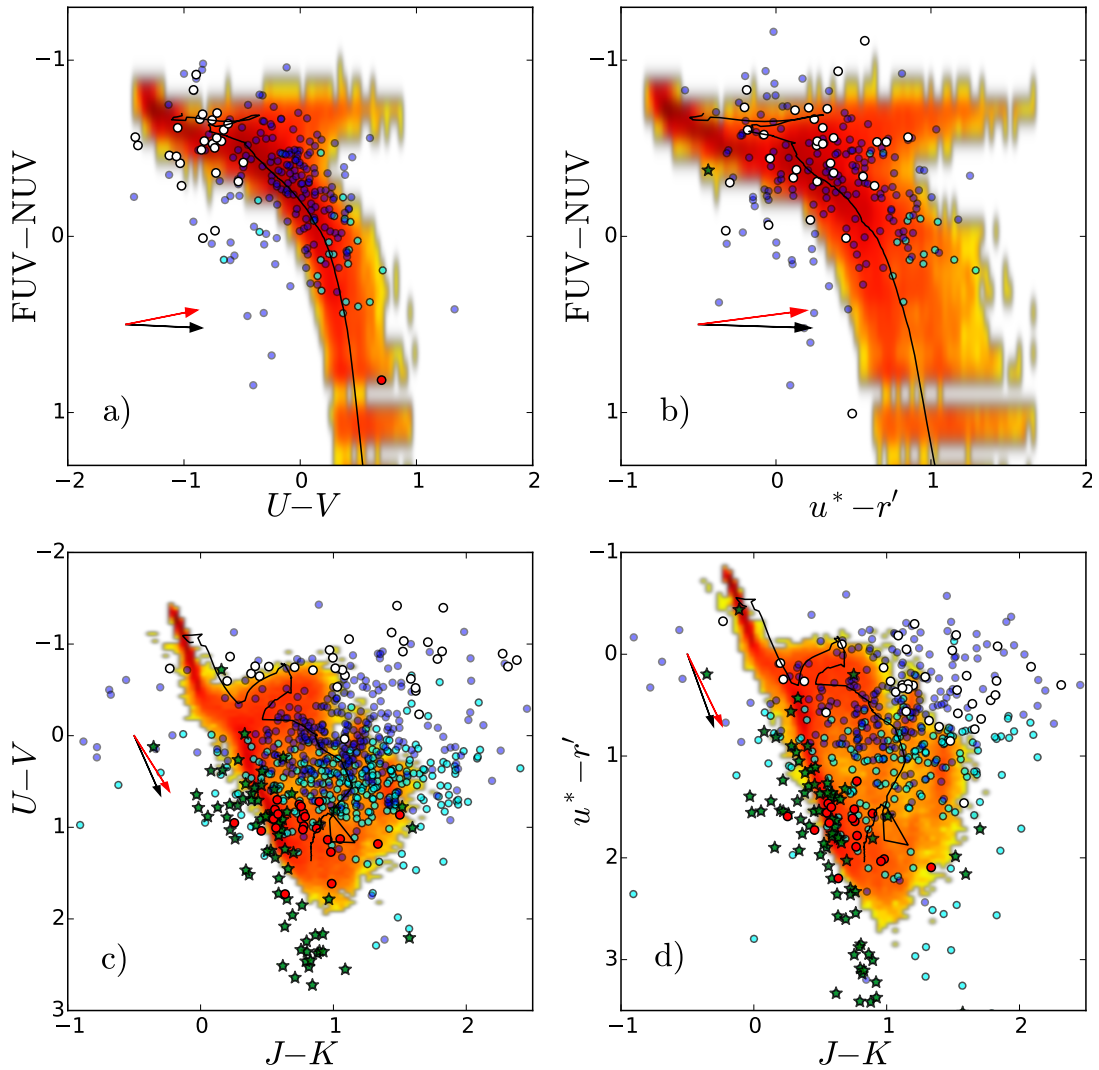
10 pav. Spiečių fotometriniai duomenys. (a) ir (b) langai $UBVRI$ fotometrija, (c) ir (d) – $u^*g'r'i'z'$ fotometrija. Spiečių simbolių spalvų reikšmė: mėlyni – UV šviesūs, žydri – UV blausūs, balti – arti ar viduje HII zonos, raudoni – kandidatai į kamuolinius spiečius, žalios žvaigždutės – tikėtinos žvaigždės. Oranžiniais atspalviais parodytas spiečių modelių tinklas (logaritminė modelių tankio skalė), SSP modeliai – juoda linija. Modelių masė fiksuota, $\log_{10}(M/M_{\odot}) = 3.5$. Juoda (MW) ir raudona (LMC) rodyklės rodo ekstinkcijos vektorius $A_V = 1$.

kurių amžius didesnis už $\log_{10}(t/\text{yr}) = 9$, parametrai buvo nustatyti iš naujo nefiksuo-
jant metalingumo. Tyrimui buvo panaudotas LMC ekstinkcijos dėsnis (Gordon et al.
2003). Vidutinė mūsų Galaktikos ekstinkcija M33 kryptimi, $E(B - V) = 0.04$ mag,
buvo įvertinta pagal Schlegel et al. (1998).

Galutiniam spiečių parametrų nustatymui sukūrėme daugiabangių spiečių vaizdų
biblioteką. Tuo tikslu papildomai buvo pasinaudota giliomis $BVRIH_{\alpha}$ Subaru 8.3 m
teleskopu gautomis nuotraukomis ir $24 \mu\text{m}$ *Spitzer*² vaizdais.

12 pav. parodyti tirtų M33 galaktikos spiečių parametrai. 12a pav. matome gerai
atsiskiriančias skirtingomis spalvomis koduotas spiečių grupes (simbolių spalvinis

²*Spitzer*: <http://ssc.spitzer.caltech.edu/spitzerdataarchives/>

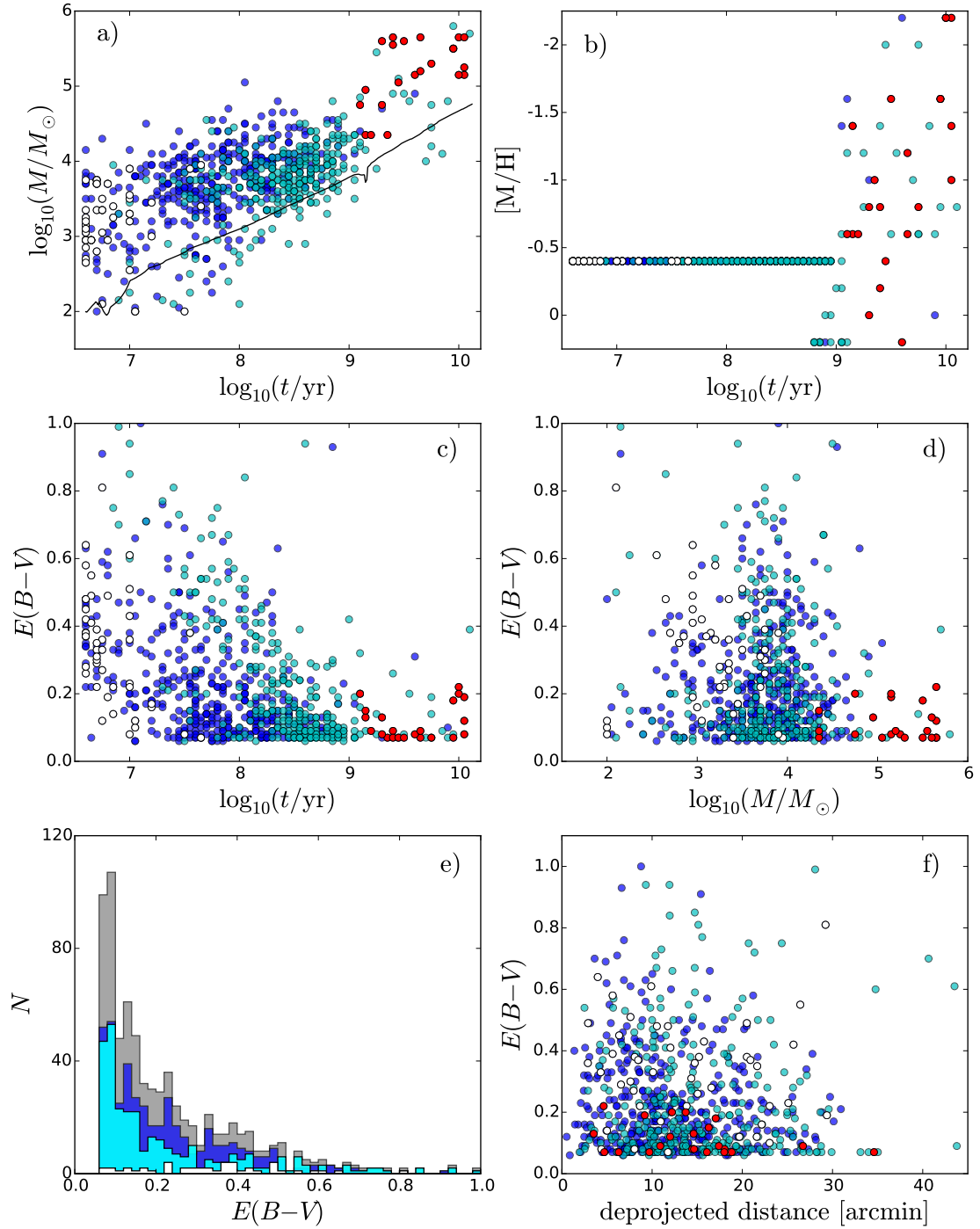


11 pav. Tas pats kaip ir 10 pav., bet GALEX ir 2MASS 6X duomenims.

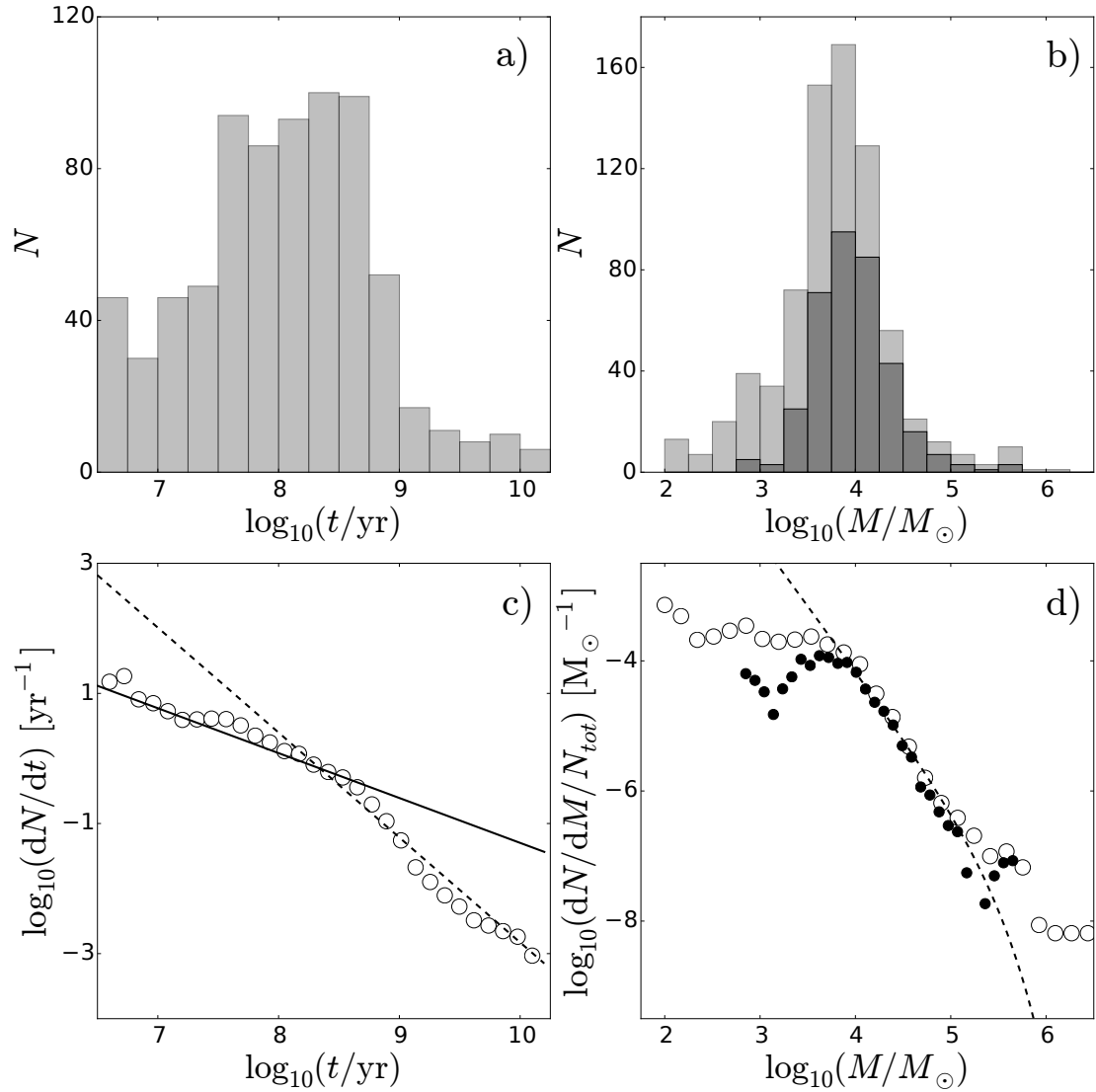
kodavimas pagal 10 pav.). Linija rodo 50% imties pilnumo ribą, kurią nustatė Fan & de Grijs (2014) savo spiečių katalogui. Kadangi mes nagrinėjame spiečių imtį sudarytą iš skirtingų katalogų, vienas iš jų remiasi HST stebėjimais (San Roman et al. 2009), objektai gali būti ir žemiau šios ribos.

12f pav. visiems objektams rodo tarpžvaigždinę ekstinkciją iki spiečiaus, $E(B-V)$, nuo dėl galaktikos polinkio pakoreguoto atstumo iki centro. Ekstinkcija vidutiniškai yra didesnė jaunesniems spiečiams (12c pav.). Spiečiai esantys arti ar viduje HII zonų turi vidutiniškai didžiausią ekstinkciją – medianinė vertė 0.34 mag, UV šviesių spiečių – 0.17 mag, UV blausių – 0.14 mag, o kamuoliniai spiečiai yra mažiausiai paveikti ekstinkcijos – 0.09 mag.

13 pav. rodo spiečių amžiaus ir masės integralinius bei diferencialinius skirstinius. Diferencialinio spiečių amžiaus skirstinio formą nulemia du procesai: naturalus šviesio mažėjimas dėl žvaigždžių evoliucijos ir spiečių suardymas galaktikos gravitaciniame lauke. Matome, kad šviesio mažėjimas dominuoja iki $\log_{10}(t/\text{yr}) \sim 8.5$, o po to



12 pav. M33 galaktikos 747 spiečių nustatyti parametrai. (a) masė nuo amžiaus, linija rodo 50% imties pilnumo ribą (Fan & de Grijs 2014), (b) metalingumas nuo amžiaus, metalingumas fiksuotas, $[M/H] = -0.4$, spiečiams kurių amžius $\log_{10}(t/\text{yr}) < 9$, (c) ekstinkcija nuo amžiaus, (d) ekstinkcija nuo masės, (e) ekstinkcijos histograma, (f) ekstinkcija nuo atstumo iki galaktikos centro. Spiečių simbolių spalvų kodavimas pagal 10 pav.



13 pav. M33 galaktikos spiečių sistemos tyrimo rezultatai. (a) amžiaus ir (b) masės skirstiniai, (c) amžiaus ir (d) masės diferencialiniai skirstiniai. (c) ištisinė ir brūkšninė linijos rodo spiečių evoliucinį gėsimą ir spiečių suardymo greitį M31 galaktikoje (Vansevičius et al. 2009). Tamsesnė histograma (b) ir juodi skrituliukai (d) atitinka spiečių imtį nuo 100 mln. m. iki 3 mlrd. m. Brūkšninė linija (d) rodo Schechter (1976) formos spiečių masės funkciją su $\beta = 2$ ir $M^* = 2 \times 10^5 M_\odot$ parametrais.

daugiau įtakos turi spiečių suardymas. Įdomu tai, kad panašūs rezultatai gauti ir visiškai kito tipo galaktikoje – M31 (Vansevičius et al. 2009).

Palyginome spiečių diferencialinį masės skirstinį su Schechter (1976) funkcija:

$$dN/dM = A \times M^{-\beta} \times \exp(-M/M^*) \quad (6)$$

kur A yra normavimo konstanta, β – masės funkcijos laipsnio rodiklis, M^* – charakteringoji masė. Kaip ir kitose spiralinėse galaktikose (Larsen 2009; Portegies Zwart et al. 2010), spiečių masės skirstinys geriausiai aprašomas funkcija su $\beta = 2$ ir $M^* = 2 \times 10^5 M_\odot$ parametrais (13d pav.).

Išvados

- Pasiūlytas ir detaliai patikrintas naujas žvaigždžių spiečių parametrų nustatymo metodas, įskaitantis stochastinį žvaigždžių masių skirstinį, įgalina patikimiau nustatyti spiečių amžių, masę, ekstinkciją ir metalingumą lyginant su tradiciniiais metodais, kurie remiasi paprastųjų žvaigždžių populiacijų (SSP) artiniu.
- Metodas įgalina nustatyti žvaigždžių spiečių amžių, masę, ekstinkciją ir metalingumą tik kartu naudojant plačiajuostės fotometrijos duomenis ultravioletinėje ir optinėje spektro srityse. Kuo didesnis fotometrinių matavimų tikslumas, tuo nustatyti parametrai yra patikimesni, tačiau bendru atveju pakanka ir vidutinio tikslumo fotometrijos: $\leq 0,05$ mag optinėje ir $\leq 0,15$ mag ultravioletinėje spektro srityse.
- Remdamiesi M31 galaktikos žvaigždžių spiečių parametrų (amžius, masė, ekstinkcija) tyrimais parodėme metalingumo efektų įskaitymo svarbą kitų parametrų nustatymo tikslumui. Siekiant išvengti sistematinių spiečių parametrų paklaidų, metalingumą būtina žinoti iš spektrinių tyrimų arba nustatyti kartu su kitais parametrais iš fotometrinių duomenų.
- Ištyrę reprezentatyvią nykštukinės spiralinės galaktikos M33 žvaigždžių spiečių imtį nustatėme, kad būdingoji spiečių gyvavimo trukmė (~ 300 mln. m.) gerai sutampa su spiečių gyvavimo trukme milžiniškoje spiralinėje galaktikoje – M31.

Literatūra

Beerman L.C., Johnson L.C., Fouesneau M., et al. 2012, ApJ, 760, 104

Caldwell N., Schiavon R., Morrison H., et al. 2011, AJ, 141, 61

Cardelli J.A., Clayton G.C., Mathis J.S. 1989, ApJ, 345, 245

Dalcanton J.J., Williams B.F., Lang D., et al. 2012, ApJS, 200, 18

Deveikis V., Narbutis D., Stonkutė R., et al. 2008, Baltic Astronomy, 17, 351

Fan Z., de Grijs R. 2014, ApJS, 211, 22

Fouesneau M., Johnson L.C., Weisz D.R., et al. 2014, ApJ, 786, 117

Fouesneau M., Lançon A. 2010, A&A, 521, A22

Galleti S., Bellazzini M., Ferraro F.R. 2004, *A&A*, 423, 925

Gordon K.D., Clayton G.C., Misselt K.A., et al. 2003, *ApJ*, 594, 279

Johnson L.C., Seth A.C., Dalcanton J.J., et al. 2012, *ApJ*, 752, 95

Kroupa P. 2001, *MNRAS*, 322, 231

Larsen S.S. 2009, *A&A*, 494, 539

Ma J. 2012, *AJ*, 144, 41

—. 2013, *AJ*, 145, 88

Portegies Zwart S.F., McMillan S.L.W., Gieles M. 2010, *ARA&A*, 48, 431

San Roman I., Sarajedini A., Aparicio A. 2010, *ApJ*, 720, 1674

San Roman I., Sarajedini A., Garnett D.R., et al. 2009, *ApJ*, 699, 839

Santos Jr. J.F.C., Frogel J.A. 1997, *ApJ*, 479, 764

Schechter P. 1976, *ApJ*, 203, 297

Schlegel D.J., Finkbeiner D.P., Davis M. 1998, *ApJ*, 500, 525

Vansevičius V., Kodaira K., Narbutis D., et al. 2009, *ApJ*, 703, 1872

Weisz D.R., Fouesneau M., Hogg D.W., et al. 2013, *ApJ*, 762, 123

Summary

Star clusters are important tools to probe the star formation mechanisms and star formation history in their host galaxy. The traditional way to derive the physical parameters of star clusters using integrated broad-band photometry makes use of the Simple Stellar Population models (SSP), which can be considered as oversimplified. Indeed these models consider that the way stellar masses are created in stars clusters is by continuously populating the Initial Mass Function (IMF), which is an idealized view. Observations have shown since forty years that the Initial Mass Function should be considered as a probability distribution function, according to which stellar masses are sampled randomly. This has the effect to create different number of massive stars in clusters of same physical parameters and hence dispersing the colors of clusters. This results in strong biases when trying to derive physical parameters of stars clusters using oversimplified SSP models.

In this thesis, we develop a method of stellar mass sampling which takes into account the stochasticity due to the fact that the IMF is a probability distribution function, which allows us to reproduce the dispersion of star cluster integrated colours. A model grid is built to reproduce all possible choices of physical parameters (age, mass, extinction, and metallicity). We also built a method to derive these parameters, comparing the integrated colors of observed clusters to the ones of our model grid. The method is tested on artificial models, to derive the accuracy of our method. We show that the derivation of parameters such as metallicity is possible under good photometric conditions that we quantify. We also compare the derivation of star cluster parameters using different photometric systems, and show that the photometric systems containing ultraviolet passbands are privileged for a best determination of parameters such as the age or the metallicity.

We apply the method on different star cluster catalogs of the two major Local Group galaxies: M31 and M33. For an M31 star cluster catalog with Hubble Space Telescope (HST) broad-band photometry, we show for bright clusters that the metallicity derivation is consistent with spectroscopic values derived independently in the literature. For the M33 star cluster sample, we merge optical broad-band catalogs available from the literature and add near-infrared data that we derive. We then derive the age, mass, and extinction of the clusters. We also provide general properties of the M33 star cluster system such as the typical disruption rate of the clusters.

Philippe de Meulenaer

Curriculum Vitae

Date and place of birth: 27 April 1986, Belgium
E-mail: philippe.demeulenaer@ff.stud.vu.lt

Education:

- B.S. in Physics at Namur University (Belgium) 2007
- M.S. in Space Sciences at Liège University (Belgium) 2009
- Ph.D. studies in Physical Sciences, Physics (02P) at Vilnius University 2010-2014

Professional improvement:

- *Conference:* Liège Astrophysical colloquium 38, Evolution and Pulsation of Massive stars on the Main Sequence and Close to it, University of Liège, Belgium, 2008
- *Euro VO School*, France, 2011
- *Conference:* 39 Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, Lithuania, 2011
- *Saas-Fee Course:* Dynamics of Young Star Clusters & Associations, Switzerland, 2012
- *Conference:* Reading the book of globular clusters with the lens of stellar evolution, Italy, 2012
- *Conference:* European Week of Astronomy and Space Science, Finland, 2013
- *Conference:* Evolution of Star Clusters: From Star Formation to Cosmic Ages (Annual Meeting of the Astronomische Gesellschaft), Germany, 2013
- *Conference:* 41 Lietuvos nacionalinė fizikos konferencija, Lithuania, 2015