

Vilniaus universiteto  
Fizikos fakulteto  
Teorinės fizikos ir astronomijos institutas

Karolis Daugevičius

ŽVAIGŽDŽIŲ SPIEČIŲ STRUKTŪRINIŲ PARAMETRŲ STOCHASTIŠKUMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Teorinės fizikos ir astrofizikos  
studijų programa

Studentas

Karolis Daugevičius

Leista ginti

2022-05-24

Darbo vadovas

dr. Rima Stonkutė

Recenzentas

dr. Erika Pakštienė

Instituto atstovas

prof. dr. Egidijus Anisimovas

Vilnius 2022

# Turinys

Įvadas .....	2
1. Žvaigždžių spiečiai ir jų struktūra .....	3
1.1. Trumpai apie žvaigždžių spiečius .....	3
1.2. Žvaigždžių spiečių struktūra .....	5
2. Dirbtinių žvaigždžių spiečių modeliavimas .....	13
2.1. Dirbtinių 3D spiečių generavimo algoritmas .....	13
2.2. Spiečių vaizdų modeliavimas .....	19
3. Stochastinių efektų įtaka spiečių matavimams .....	22
3.1. Apertūrinė fotometrija .....	22
3.2. Generavimo stochastiškumo įtaka fotometriniams parametrams .....	22
3.3. Stebėjimo krypties įtaka fotometriniams parametrams .....	29
3.4. Generavimo stochastiškumo įtaka struktūriniams parametrams .....	35
3.5. Stebėjimo krypties įtaka struktūriniams parametrams .....	40
Išvados .....	44
Literatūros sąrašas .....	45
Santrauka .....	48
Summary .....	49
Priedas Nr. 1 .....	50
Priedas Nr. 2 .....	56
Priedas Nr. 3 .....	62

# Įvadas

Šio ir ateinančio dešimtmečių eigoje savo veiklą pradės įvairios naujos kartos antžeminės ir kosminės observatorijos, kurių vykdomos apžvalgos apims visą dangaus plotą. Tad viena iš svarbiausių problemų astrofizikoje taps automatinis galaktikų ir žvaigždžių spiečių aptikimas bei jų parametrų nustatymas didelių duomenų masyvuose, kadangi šių objektų tyrimai įgalina geriau suprasti Visatoje vykstančius žvaigždėdaros procesus ir galaktikų evoliuciją.

Nors tam tikras postūmis sprendžiant šį uždavinį yra, pavyzdžiui, pasitelkiant mašininio mokymo algoritmus ([Bialopetravičius et al. 2019](#); [Bialopetravičius ir Narbutis 2020](#)), visgi tokių metodų rezultatai kol kas nėra patenkinami. Viena iš tyrimo krypčių, kuri leistų geriau suprasti, kaip būtų galima sukurti tokį patikimą ir efektyvų metodą – ištirti žvaigždžių spiečių struktūrinių ir evoliucinių parametrų nustatymo tikslumo ribas. Minėti parametrai dažnai nustatomi pasitelkiant apertūrinės fotometrijos matavimus ([de Meulenaer et al. 2013](#), [2014](#), [2015a](#), [2015b](#), [2017](#)), tačiau taip nustatytiems spiečių parametrams būdingas tam tikras neapibrėžtumas dėl ryškių žvaigždžių pasiskirstymo spiečiuje stochastiškumo sukeltamų efektų.

Iki šiol tokių efektų įtaka spiečių parametrams buvo nagrinėjama pasitelkiant stochastinius 2D spiečių modelius ([Deveikis et al. 2008](#), [Narbutis et al. 2014](#)), tačiau norint kiekybiškai įvertinti stochastinių efektų svarbą būtini ir dirbtinių 3D spiečių tyrimai. Jie leistų įvertinti net ir stebėjimo krypties įtaką spiečių matavimų tikslumui. Ilgą laiką tokie tyrimai tiesiog buvo neprieinami, nes 3D žvaigždžių spiečių modeliavimo darbai reikalauja didelių kompiuterinių resursų. Taigi, tik pastaruoju metu, išaugus kompiuterių pajėgumams, tapo įmanoma tai atlikti pakankamai greitai ir efektyviai. Kita vertus, dėl šios priežasties spiečių fotometrinių ir struktūrinių parametrų stochastiškumo efektai kol kas nėra pakankamai ištirti.

**Darbo tikslas** – ištirti žvaigždžių spiečių struktūrinių ir fotometrinių parametrų stochastiškumą.

## **Pagrindiniai uždaviniai:**

- Sukurti 3D žvaigždžių spiečių ir jų vaizdų, atitinkančių realius PHAT apžvalgoje stebimus Andromedos galaktikos (M31) spiečius, modeliavimo algoritmą bei programas.
- Nustatyti ryškių žvaigždžių ir jų erdvinio pasiskirstymo spiečiuose stochastiškumo įtaką žvaigždžių spiečių struktūrinių ir fotometrinių parametrų tikslumui.

# 1. Žvaigždžių spiečiai ir jų struktūra

## 1.1. Trumpai apie žvaigždžių spiečius

Manoma, jog didžioji dalis visų žvaigždžių susiformuoja spiečiuose ([Lada ir Lada 2003](#)), kuomet kolapsuoja milžiniški molekulinė dujų debesys. Pagrindo taip manyti suteikia žinios, kad mūsų Paukščių Tako galaktikoje apie 70 % visų jaunų masyvių O spektrinės klasės žvaigždžių stebima jaunuose žvaigždžių spiečiuose, o artimose žvaigždėdaros žybsnio galaktikose (angl. *starburst galaxies*, SB) didžioji ultravioletinės spinduliuotės dalis sklinda iš ten esančių jaunų žvaigždžių spiečių ([Portegies Zwart et al. 2010](#) ir ten pateiktos literatūros nuorodos). Dėl šios priežasties, žvaigždžių spiečių tyrimai yra ypač svarbūs norint suprasti žvaigždėdaros procesus, galaktikų žvaigždėdaros istorijas, jų dinaminę ir cheminę evoliuciją.

Įvairius spiečių tyrimus, jų rezultatus ir pagrindines problemas plačiai ir išsamiai apžvelgė [Krumholz et al. \(2019\)](#). Vienas aspektų, kuris aptartas minėtoje apžvalgoje, tai, jog bendro, visuotinai priimto apibrėžimo, kas yra žvaigždžių spiečius, nėra ir tyrėjai naudoja skirtingas formuluotes, priklausomai nuo uždavinių ir nagrinėjamų objektų. Žvaigždžių spiečių parametrų įvairovė ir jų ribos yra labai plačios – amžiai nuo ~1 mln. m. iki praktiškai Visatos amžiaus, masės nuo ~100  $M_{\odot}$  iki daugiau nei  $10^7 M_{\odot}$ , dydžiai – nuo mažiau nei 1 pc iki didesnių nei dešimtys pc. Tai ir apsunkina sutarimą dėl bendro žvaigždžių spiečių apibrėžimo. Ko gero plačiausia formulė, kurią naudoja ir [Krumholz et al. \(2019\)](#) nagrinėdami spiečių formavimosi procesus ir jų tolimesnę evoliuciją, tokia – žvaigždžių spiečius, tai žvaigždžių grupė, kurios vidutinis tankis bent kelis kartus viršija aplink esančio žvaigždžių fono tankį.

Paukščių Tako galaktikoje (MW, angl. *Milky Way*), iš principo, išskiriamos dvi tarpusavyje labai skirtingos spiečių populiacijos, tai Galaktikos hale ir baldže aptinkami, masyvūs ( $10^4$  –  $10^6 M_{\odot}$ ) kamuoliniai spiečiai (angl. *Globular Clusters*, GC), kurių amžius artimas Visatos amžiui, ir Galaktikos diske esantys padrikieji spiečiai (angl. *Open Clusters*, OC), pasižymintys nedidele, lyginant su GC, mase ( $\lesssim 10^4 M_{\odot}$ ) bei bent eile mažesniu centriniu tankiu, ir padengiantys platesnį amžių intervalą – nuo jauniausių iki ~8 mlrd. m. Dėl šių priežasčių ilgą laiką manyta, kad tai yra visiškai skirtingos žvaigždžių sistemos. Kadangi GC pasižymi senu amžiumi, buvo galvota, jog jų formavimuisi buvo reikalingos ypatingos sąlygos, kurios egzistavo tik ankstyvoje Visatoje. Tačiau tokį požiūrį stipriai sujaukė atrasti jauni masyvūs spiečiai (angl. *Young Massive Clusters*, angl. YMC) kitose galaktikose.

Kaip teigia [Portegies Zwart et al. \(2010\)](#), šie objektai savo mase ir tankiu panašūs į Paukščių Tako (taip pat ir kitų galaktikų) GC. Tačiau jų amžius yra panašiose ribose kaip OC – mūsų Galaktikos palydovinėse galaktikose. Magelano Debesyse randamas gana didelis skaičius tokių žvaigždžių spiečių ir jų amžių diapazonas labai platus – nuo ~2 mln. m. R136 ([Crowther et al. 2016](#)) iki ~6 mlrd. m. NGC 416 ([Glatt et al. 2008](#)). Gausesnės YMC populiacijos randamos SB ir sąveikaujančiose galaktikose, kur egzistuoja ekstremalios žvaigždėdaros sąlygos ([Portegies Zwart et al. 2010](#)), o būtent panašios sąlygos dėl dažnesnių galaktikų tarpusavio susidūrimų turėjo vyrauti ankstyvoje Visatoje, kuomet ir vyko dabartinių MW GC formavimasis. Tai ir faktas, jog spiečių panašių į užgalaktinius YMC atrandama ir Galaktikoje ([Clark et al. 2005](#)), leidžia pagrįstai daryti prielaidą, kad žvaigždėdaros procesai, formuojantys spiečius, iš principo yra tie patys visame spiečių masių diapazone ir specifinė takoskyra tarp MW GC ir OC populiacijų yra mūsų Galaktikos evoliucijos ypatybė. Taigi, abiejų tipų spiečiai, iš principo, yra tos pačios rūšies objektai.

Kaip minėta aukščiau, spiečių fizinių parametrų (masė, amžius, metalingumas/cheminė sudėtis, ekstinkcija) tyrimai leidžia geriau suprasti galaktikų, kuriose jie yra, formavimąsi ir evoliuciją. Šie parametrai nustatomi keliais skirtingais metodais. Kalbant apie išskiriamas (angl. *resolved*, čia išskiriamos atskiros spiečių sudarančios žvaigždės) populiacijas, vienas iš dažnai taikomų būdų – pasitelkti spiečių spalvos-ryškio diagramas (CMD, angl. *Colour-Magnitude Diagram*) ir prie jų derinant izochronas, gaunamas iš teorinių žvaigždžių evoliucijos modelių ([Johnson et al. 2016](#)). Visgi, kad šis metodas duotų patikimus rezultatus, būtina išskirti ir pakankamai tiksliai pamatuoti žvaigždes iki pagrindinės sekos posūkio taško, tad Vietinės galaktikų grupės galaktikose, tokiose kaip Andromeda (M31) ar Trikampio galaktika (M33), šis metodas pritaikomas tik jauniems ir pakankamai masyviems žvaigždžių spiečiams, o norint suprasti išsamią spiečių populiacijos ir galaktikos evoliuciją, būtina kuo platesnė spiečių imtis.

Neišskiriamų žvaigždžių spiečių atveju, jau ilgą laiką taikomas populiacijų sintezės metodas (angl. *stellar population synthesis*, SPS). Visų SPS kodų, kaip plačiai taikomų *Pegase* ([Fioc ir Rocca-Volmerange 1997](#)) ar *Starburst99* ([Leitherer et al. 1999](#)), pagrindiniai principai panašūs – yra priderinama tam tikra žvaigždėdaros istorija ir pasirenkama pradinė žvaigždžių masės funkcija (IMF, angl. *Initial mass function*) ir pagal tai yra sumodeliuojamas atitinkamas žvaigždžių masių ir amžių skirstinys. Tuomet, pasitelkiant žvaigždžių atmosferų ir evoliucijos modelius, suskaičiuojamas atitinkamos dirbtinės populiacijos generuojamas spektras, kurį savo ruožtu galima transformuoti ir į įvairių fotometrinių sistemų ryškius.

Tradiciniuose SPS koduose įprastai daroma prielaida, jog modeliuojamos populiacijos žvaigždžių masių skirstinys idealiai atitinka teorinį (angl. *well-sampled distribution*), kas nėra tinkama aproksimacija mažos masės spiečiams, kuriuose svarbūs stochastiniai IMF efektai (plačiau apie tai 2 skyriuje). Be to, žvaigždžių spiečiai yra paprastoji žvaigždžių populiacija (angl. *simple stellar population*, SSP), kas reiškia, jog visos žvaigždės susiformavo vienu metu ir pasižymi tokia pačia chemine sudėtimi. Dažnai taikomas metodas nustatyti spiečių fizinius parametrus – lyginant realių spiečių plačiauostės fotometrijos ryškius bei spalvos rodiklius su šių modelių duodamomis teorinėmis vertėmis ([Bridžius et al. 2008](#)). Tačiau tokie metodai susiduria su įvairiomis problemomis, kurių viena didžiausių yra stochastiniai IMF efektai, kurie ypač svarbūs mažos masės ( $< 10^4 M_{\odot}$ ) spiečių atveju. Jauni spiečiai gali turėti ryškių evoliucionavusių žvaigždžių, kaip supermilžinės, ir jų integraliniai spalvos rodikliai bus daug raudonesni nei idealizuoto modelio, tad bus nustatomas daug didesnis spiečiaus amžius nei yra iš tiesų.

Modernesni spiečių fizinių parametrų nustatymo metodai atsižvelgia į stochastinius efektus. Dažniausiai modeliuojami plačias parametrų ribas padengiantys teorinių stochastinių spiečių modelių tinklai su daugybe tokių pačių parametrų spiečiaus realizacijų ir realių spiečių matavimai yra derinami prie šių modelių integralinių ryškių ir spalvos rodiklių ir taip nustatomos įvairių parametrų tikimybės tankio funkcijos ([de Meulenaer et al. 2013](#), [Fouesneau et al. 2014](#), [Krumholz et al. 2015](#)). Tai leidžia tirti spiečių parametrus platesniuose amžių be masių intervaluose, tačiau taip nustatytų parametrų tikslumas labai priklauso nuo apertūrinės fotometrijos rezultatų neapibrėžtumo.

## 1.2. Žvaigždžių spiečių struktūra

*Ši skyriaus dalis parengta iš dalies remiantis magistro studijų mokslo tiriamuoju darbu III/III ([Daugevičius 2022](#))*

Kadangi šio darbo tikslas iširti stochastinių efektų įtaką žvaigždžių spiečių struktūrinių parametrų tikslumui, trumpai aptarsime būtent šiuos parametrus. Dažniausiai spiečių struktūros tyrimai atliekami aproksimuojant jų paviršinio šviesio profilius įvairiomis teorinėmis bei empirinėmis funkcijomis. Įprastai bandoma taikyti paprastos formos, nesudėtingas, kelių parametrų funkcijas, kurios išvedamos taikant tam tikras pagrįstas prielaidas apie spiečių formavimąsi, evoliuciją bei struktūrą arba remiantis stebėjimų duomenimis. Šie teoriniai/empiriniai spiečių struktūros modeliai yra derinami prie realiai stebimų spiečių profilių, ieškant parametrų rinkinio, su kuriuo derinama funkcija geriausiai atitinka stebėjimus. Spiečių

struktūros tyrimuose bene labiausiai paplitę ir dažniausiai taikomi du radialiniai profiliai. Vienas iš jų – teorinis [King \(1962, 1966\)](#) profilis, kurio formą nusako trijų parametru funkcija:

$$\mu(r) = \mu_0 \left[ \left( 1 + \frac{r^2}{r_c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - \left( 1 + \frac{r_t^2}{r_c^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right]^2, \quad (1)$$

čia  $\mu(r)$  žymi spiečiaus paviršinį šviesį;  $\mu_0$  – centrinis paviršinis šviesis;  $r$  – projekcinis (2D) atstumas nuo spiečiaus centro;  $r_c$  – atstumas, ties kuriuo paviršinis šviesis sumažėja du kartus  $\mu_0$  atžvilgiu, dažniausiai vadinamas branduolio spinduliu;  $r_t$  – potvyninis spindulys, ties kuriuo spiečius baigiasi. King spiečių struktūros modeliai aprašo dinamiškai relaksavusias sistemas. Tokia prielaida gerai tinka masyviems, senesniems nei keli šimtai mln. m. spiečiams, tad King tipo profiliai puikiai tinka GC struktūros aprašymui ir jų tyrimuose dažniausiai taikomi kaip standartiniai. Tiesa, būtina pabrėžti, jog ši funkcija taip pat dažnai naudojama ir jaunesnių bei mažesnės masės žvaigždžių spiečių tyrimuose.

Kitas iš dviejų dažniausiai spiečių tyrimuose sutinkamų profilių – tai empirinė EFF funkcija, nustatyta remiantis Didžiojo Magelano debesies (LMC, angl. *Large Magellanic Cloud*) YMC struktūros tyrimais ([Elson et al. 1987](#)). Pastebėta, jog šiai žvaigždžių spiečių imčiai net ir dideliu atstumu nuo spiečiaus centro nėra būdingas paviršinio šviesio profilio trūkis, kuris GC ir King funkcijos atveju nusakomas potvyniniu spinduliu  $r_t$ . [Elson et al. \(1987\)](#) pastebėjo, kad spiečių išorinių dalių struktūrą geriau atitinka laipsninis dėsnis, ir remdamiesi stebėjimų rezultatais nustatė empirinį Elson-Fall-Freeman (EFF) profilį, kurį aprašo taip pat 3 parametru funkcija:

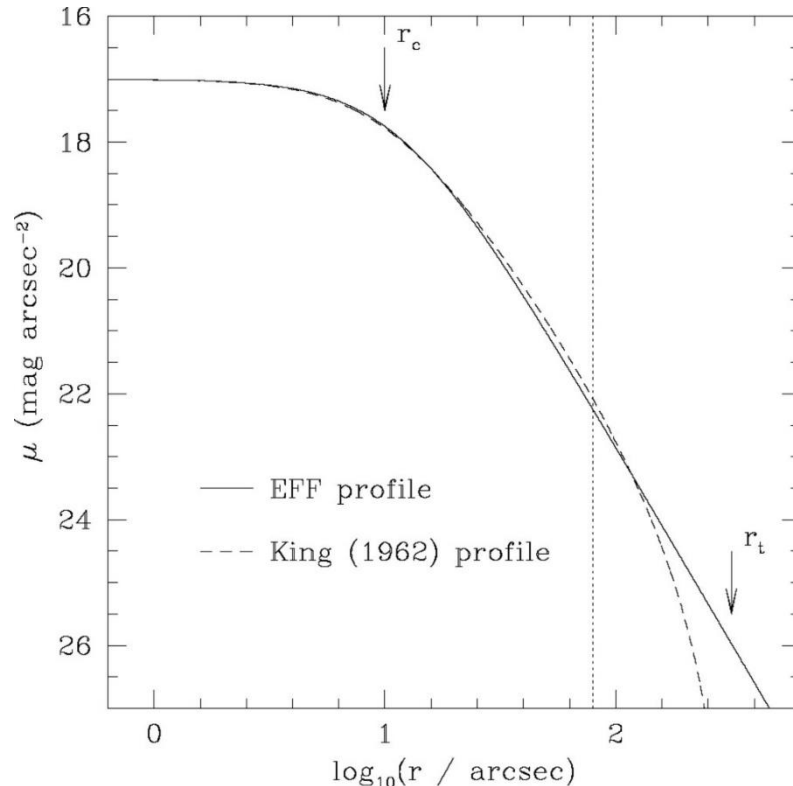
$$\mu(r) = \mu_0 \left( 1 + \frac{r^2}{r_0^2} \right)^{-\gamma/2}, \quad (2)$$

čia  $\mu_0$  taip pat žymi centrinį paviršinį šviesį;  $r_0$  – skalės ilgis;  $\gamma$  – laipsnio rodiklis, nusakantis paviršinio šviesio profilio formą išorinėje spiečiaus dalyje. Kuo mažesnė laipsnio rodiklio vertė, tuo spiečius mažiau koncentruotas. Svarbu pabrėžti tai, jog EFF atveju, kuomet  $\gamma \leq 2$ , profilis teoriškai riboja begalinę masę/šviesį, tačiau realiai yra stebima tokių išstėtų spiečių, kurių paviršinį šviesį nusako EFF profilis su laipsnio rodikliu  $\gamma < 2$ . Skalės ilgio parametras  $r_0$  susijęs su branduolio spinduliu  $r_c$ :

$$r_c = r_0 (2^{2/\gamma} - 1)^{1/2}. \quad (3)$$

Empirinis EFF profilis gerai atitinka jaunų spiečių, kurių amžius iki kelių šimtų mln. m., stebėjimus ir kitose galaktikose, tad dažniausiai tokių spiečių tyrimuose ir naudojamas. Tačiau EFF profilis naudojamas ir senesnių spiečių tyrimuose.

1.1 pav. parodyti abu aukščiau aprašyti profiliai. Galima pastebėti, jog King ir EFF profiliai centrinėse spiečiaus srityse gerai sutampa tarpusavyje ir pagrindiniai skirtumai pasireiškia tik išorinėse dalyse, kur EFF profiliui būdinga ištęsta paviršinio šviesio uodega, o King profilio atveju stebimas staigus kritimas artėjant prie potvyninio spindulio  $r_t$ .



**1.1 pav.** EFF ir King paviršinio šviesio profilių palyginimas. Profilių parametrai parinkti taip, kad suintegravus abu ribotų vienodą pilnutinį šviesį. Esminis profilių skirtumas išryškėja tik išorinėse spiečiaus dalyse. Diagrama iš [Mackey ir Gilmore \(2003a\)](#).

Žvaigždžių spiečių struktūros tyrimų kontekste daugiausia nagrinėjami parametrai, nusakantys spiečių dydžius. Bene dažniausiai naudojamas spiečiaus dydžio įvertis – pusės šviesio spindulys  $r_h$ , ribojantis pusę viso spiečiaus spinduliuojamo šviesos srauto. Šis parametras dar neretai literatūroje kai kurių autorių vadinamas efektiniu spinduliu  $r_{eff}$ , tačiau būtina pabrėžti tai, kad labiau teorinių darbų kontekste, kaip pavyzdžiui spiečių formavimosi, dinaminės evoliucijos modeliavimas, dažnai taip vadinamas ir kitas dydžio įvertis – pusės masės spindulys.

Vienas iš metodų, kaip įvertinti žvaigždžių spiečiaus pusės šviesio spindulį  $r_h$  yra atlikti jo apertūrinę fotometriją, pamatuoti jo augimo kreivę, iš kurios galima tiesiogiai įvertinti, kokio spindulio apertūroje telpa pusė pilnutinio spiečiaus šviesio. Šis metodas plačiau aptartas 3.1 poskyryje.



Dar vienas dažnai literatūroje sutinkamas metodas, leidžiantis nustatyti  $r_h$  – anksčiau minėtas teorinių/empirinių profilių derinimas prie spiečiaus stebimo paviršinio šviesio profilio. Šiuo metodu nustačius geriausiai stebėjimus atitinkančius profilio parametrus, juos galima perskaičiuoti į teorinę pusės šviesio spindulio vertę. Įprastai naudojami [Larsen \(2006\)](#) išvesti sąryšiai, siejantys  $r_h$  su King ir EFF profilių parametrais, atitinkamai:

$$r_h = 0.547 r_c \cdot \left( \frac{r_t}{r_c} \right)^{0.486}, \quad (4)$$

$$r_h = r_0 \cdot \sqrt{0.5 \left( \frac{1}{1-\gamma} \right) - 1}. \quad (5)$$

Toliau apžvelgsime  $r_h$  matavimus skirtingų galaktikų spiečių tyrimuose. Kadangi mes modeliuojame dirbtinius žvaigždžių spiečius, kurie savo parametrais atitinka spiralinės Andromedos galaktikos (M31) disko spiečius, daugiausiai dėmesio skirsime panašaus tipo galaktikoms.

Vienas iš išsamesnių darbų, kalbant apie spiečių struktūrinius parametrus – [Larsen \(2004\)](#), kuriame tirti 18 artimų spiralinių galaktikų jauni žvaigždžių spiečiai. Tyrimui buvo panaudoti archyviniai HST WFPC2 (angl. *Hubble Space Telescope Wide Field Planetary Camera 2*) duomenys. Remiantis šiais stebėjimais, nustatytas  $r_h$  skirstinys, kuriam būdingas reikšmingas maksimumas ties  $\sim 3 pc$  bei staigus objektų skaičiaus sumažėjimas ties  $r_h > 5 pc$ . Pastebėta, jog šioje spiečių imtyje praktiškai nėra objektų, kurių  $r_h$  viršytų  $10 pc$  ribą. [Larsen \(2004\)](#) nustatė, jog tirtų spiečių vidutinė pusės šviesio spindulio vertė  $\langle r_h \rangle = 3.94 \pm 0.12 pc$ . Tiesa, autorius pabrėžia, jog šis vidurkis gali būti šiek tiek pasislinkęs į didesnių verčių pusę dėl tam tikrų selekcijos efektų – stebėjimų skyra ribota, o kai kurios iš tirtų galaktikų pakankamai tolimos, jog patys kompaktiškiausi spiečiai atrodo kaip taškiniai šaltiniai (kaip ir atskiros pavienės žvaigždės), tad tokių objektų matavimai automatiškai nepateko į bendrą nagrinėjamų spiečių imtį.

[Mora et al. \(2009\)](#) atliko panašų į [Larsen \(2004\)](#) tyrimą, kuriame nagrinėjo penkių vėlyvo tipo spiralinių galaktikų žvaigždžių spiečių imtis. Trys iš šių penkių galaktikų buvo tirtos ir [Larsen \(2004\)](#) darbe. [Mora et al. \(2009\)](#) nustatytas tipinis spiečių dydis  $\langle r_h \rangle \approx 2 pc$  – šiek tiek mažesnis nei [Larsen \(2004\)](#). Tiesa, [Mora et al. \(2009\)](#) naudojo HST ACS (angl. *Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys*) duomenis, o šios kameros skyra maždaug dvigubai didesnė nei WFPC2, tad į [Mora et al. \(2009\)](#) tiriamų spiečių imtį pateko ir mažesnių, kompaktiškesnių objektų nei [Larsen \(2004\)](#) apžvalgoje. Tai, ko gero, yra pagrindinė mažesnės tipinės  $r_h$  vertės [Mora et al. \(2009\)](#) darbe priežastis.

[Vansevičius et al. \(2009\)](#) atliko kompaktiškų žvaigždžių spiečių apžvalgą pietvakariniame M31 lauke. Čia panaudoti Subaru teleskopo plataus lauko Suprime-Cam kameros duomenys, padengiantys ~15% Andromedos galaktikos disko ploto. Tyrime nustatyta, jog čia esančių spiečių  $r_h$  yra nuo ~0.6 pc iki ~10 pc;  $r_h$  skirstinio maksimumas – ties ~1.5 pc. Taip pat buvo parodyta, jog šios spiečių imties skirstinį 3 – 8 pc ribose gerai atitinka anksčiau M51 galaktikos spiečiams nustatytas laipsninis dėsnis  $N(r_h)dr_h \propto r_h^{-2.2}dr_h$  ([Bastian et al. 2005](#)). Reikia atkreipti dėmesį, kad tipinės  $r_h$  vertės [Vansevičius et al. \(2009\)](#) ir [Larsen \(2004\)](#) atveju tarpusavyje reikšmingai skiriasi, tačiau būtina pabrėžti, kad tai, ko gero, vėl ribotos [Larsen \(2004\)](#) naudotų duomenų skyros pasekmė. M31 yra gerokai arčiau, nei [Larsen \(2004\)](#) nagrinėtos galaktikos, pavyzdžiui vienoje iš [Larsen \(2004\)](#) tirtų galaktikų – NGC 7793 – ribinis  $r_h$  lygus ~1.2 pc, o tai yra palyginamo dydžio su [Vansevičius et al. \(2009\)](#) nustatytu tipiniu dydžiu.

[Naujalis et al. \(2021\)](#) atliko M31 spiečių imties iš PHAT apžvalgos (angl. *Panchromatic Hubble Andromeda Treasury*) žvaigždžių spiečių katalogo tyrimus. Autoriai pastebėjo, jog didžioji dalis tirtų spiečių kompaktiški ir pasižymi pusės šviesio spinduliu  $r_h \sim 0.5 \text{ arcsec}$ , o tai Andromedos galaktikos atstumu atitinka ~1.9 pc. Tai gerai dera su ankstesniais [Vansevičius et al. \(2009\)](#) rezultatais pietvakariniame galaktikos lauke bei su tipiniais spiečių dydžiais kitose galaktikose. Šio tyrimo autoriai taip pat pabrėžia, jog patys didžiausi jų tirti objektai ( $r_h > 5pc$ ) pasižymi žvaigždžių asociacijoms būdingomis savybėmis.

Trikampio galaktikoje (M33) [San Roman et al. \(2012\)](#) atliko išsamų žvaigždžių spiečių struktūrinių parametrų tyrimą. Čia buvo iš viso tiriamas 161 spiečius. Autoriai nustatė, jog M33 galaktikos žvaigždžių spiečių imčiai būdingi gana kompaktiški objektai. Didžioji dalis tirtų objektų yra mažesni nei 6 pc, o tipinė  $r_h$  vertė šioje galaktikoje apie 2 pc. Tokie rezultatai gana gerai dera su aukščiau aptartais kitų galaktikų spiečių dydžių tyrimų rezultatais.

[Bastian et al. \(2012\)](#) tyrė spiralinės galaktikos M83 spiečių populiaciją ir nustatė jų dydžius. Tyrimui buvo panaudoti HST WFC3 (angl. *Hubble Space Telescope Wide Field Camera 3*) kamera gauti du stebėjimo laukai, kurių vienas centruotas vidinėje galaktikos srityje, kitas – išorinėje. Iš viso analizuoti 751 spiečiaus duomenys. Bendrai nagrinėjant abiejuose laukuose aptiktus spiečius, nustatytas tipinis spiečių dydis  $\langle r_h \rangle \approx 2.5 pc$ . Taip pat, detaliau patyrinėtos ir abiejų laukų žvaigždžių spiečių imtys atskirai – vidiniame lauke spiečiams būdingas pusės šviesio spindulys ~2.3 pc, tuo tarpu išorinio lauko spiečiai truputį didesni – apie 2.6 pc. Autorių teigimu, jų rezultatai M83 galaktikoje gerai dera ir su kitų tyrėjų matavimais aplinkinėse spiralinėse galaktikose.

Ši [Bastian et al. \(2012\)](#) tyrimą M83 galaktikoje papildė [Ryon et al. \(2015\)](#) darbas, kuriame panaudoti jau 7 atskiri šios galaktikos HST WFC3 laukai. Tyrimo metu nagrinėta M83 jaunų žvaigždžių spiečių imtis. Remiantis šiais duomenimis [Ryon et al. \(2015\)](#) nustatė, kad šios galaktikos spiečių  $r_h$  apima diapazoną nuo  $\sim 0.3 pc$  iki  $10 pc$ . Toks žvaigždžių spiečių dydžio intervalas gerai dera su [Vansevičius et al. \(2009\)](#) publikuotais rezultatais pietvakariniame M31 lauke. Taip pat [Ryon et al. \(2015\)](#) įvertino charakteringą šių spiečių dydį,  $\langle r_h \rangle \approx 2.5$ , o tai savo ruožtu puikiai atitinka ankstesnius [Bastian et al. \(2012\)](#) rezultatus šioje galaktikoje.

Dar vieną žvaigždžių spiečių tyrimą M83 galaktikoje atliko [Bialopetravičius ir Narbutis \(2020\)](#) pasitelkdami mašininio mokymosi metodus. Tyrime nagrinėti tie patys 7 HST WFC3 M83 galaktikos laukai. Konvoliucinis neuroninis tinklas naudotas spiečių aptikimui ir jų parametrų nustatymui. Buvo nustatyti 3380 spiečių kandidatų parametrai – dydžiai pasiskirstę gana tolygiai  $r_h = 1 - 7 pc$  intervale, skirstinio maksimumas ties  $r_h = 2 - 2.5 pc$ . Anot autorių, rezultatai gauti pasitelkiant mašininio mokymosi metodą gerai dera su ankstesnių [Ryon et al. \(2015\)](#) ir [Bastian et al. \(2012\)](#) tyrimų M83 galaktikoje duomenimis.

Ko gero vienas išsamiausių žvaigždžių spiečių dydžio tyrimų publikuotas [Brown ir Gnedin \(2021\)](#) darbe. Šis tyrimas atliktas pasitelkiant LEGUS apžvalgos (angl. *Legacy Extragalactic UV Survey*) duomenis – HST WFC3 ir ACS kameromis atlikti 50 artimų galaktikų stebėjimai. [Brown ir Gnedin \(2021\)](#) savo tyrimui panaudojo iš viso 31 galaktikos duomenis. Analizuotos žvaigždžių spiečių imties dydis – 6097 objektai, jiems pamatuotas pusės šviesio spindulys  $r_h$ . Praktiškai visose tirtose LEGUS galaktikose nustatytas labai panašus spiečių dydžių skirstinys, apimantis dydžių intervalą nuo kelių dešimtųjų  $pc$  iki  $\sim 10 pc$ . Taip pat šiems skirstiniams būdingas išreikštas maksimumas ties  $\sim 3 pc$ . Tokie rezultatai LEGUS apžvalgos kontekste gerai dera su kitų tyrėjų gautais rezultatais artimose spiralinėse galaktikose.

Bendrai paėmus, panašu jog didžiosios dalies artimų spiralinių galaktikų žvaigždžių spiečių populiacijos pasižymi labai panašiais spiečių dydžių skirstiniais. Daugumos spiečių dydžiai svyruoja nuo kelių dešimtųjų iki  $10 pc$ , o charakteringas  $r_h \approx 2 - 3 pc$ .

Dar vienas dažnai žvaigždžių spiečių struktūros tyrimuose analizuojamas parametras –  $\gamma$  parametras, EFF profilio laipsnio rodiklis, nusakantis paviršinio šviesio profilio elgesį išorinėje spiečiaus dalyje (žr. 2 formulę). [Elson et al. \(1987\)](#) darbe, kuriame ir nustatytas EFF profilis, gauta, kad 10 LMC jaunų masyvių spiečių imtis pasižymi  $2.2 \lesssim \gamma \lesssim 3.2$  ir mediana –  $\gamma \approx 2.6$ . [Mackey ir Gilmore \(2003a,b\)](#) nagrinėjo masyvių spiečių struktūras LMC ir Mažajame Magelano debesyje (SMC, angl. *Small Magellanic Cloud*). Abiejose galaktikose gauti panašūs rezultatai kaip ir [Elson](#)

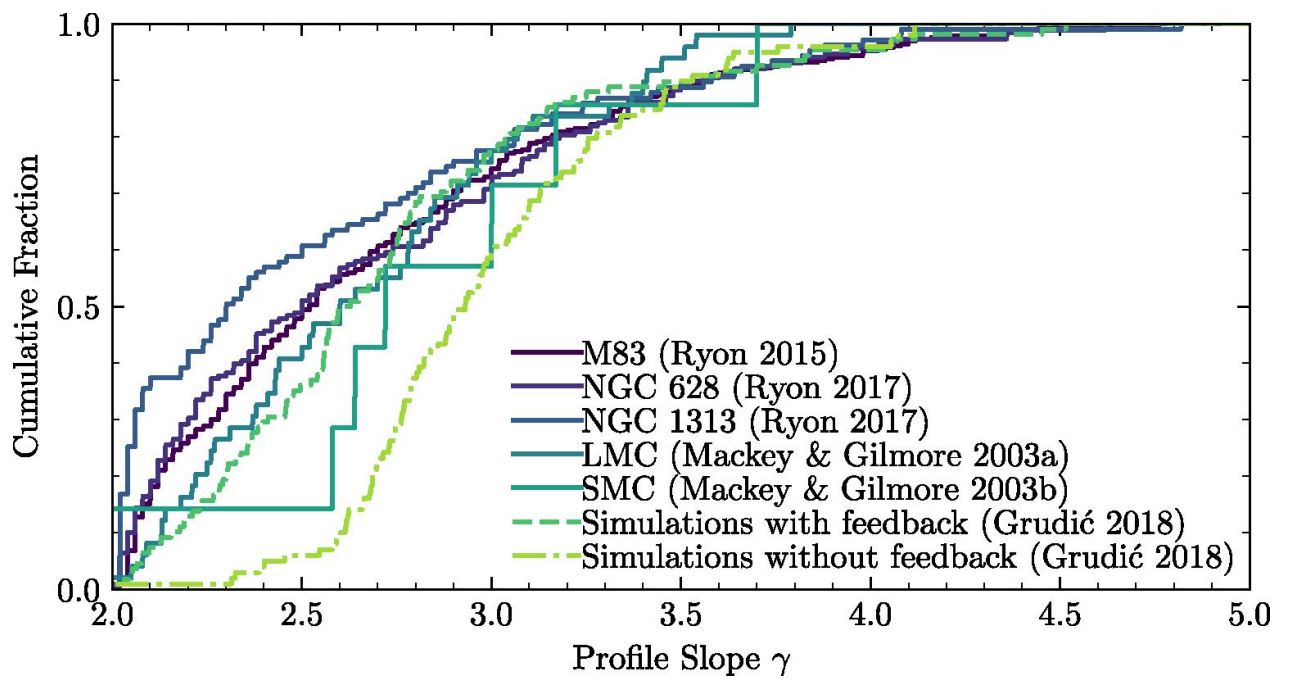
[et al. \(1987\)](#) atveju – pavyzdžiui, autoriai rašo, kad paėmus 22 jaunesnius nei 300 mln. m., spiečius nustatytas laipsnio rodiklis intervale  $2.01 \lesssim \gamma \lesssim 3.79$ , mediana  $\gamma \approx 2.59$ .

[Larsen \(2004\)](#) taip pat įvertino tirtų spiečių paviršinio šviesio profilių laipsnio rodiklį  $\gamma$ . Didžiosios dalies spiečių  $\gamma$  yra nuo 2 iki  $\sim 5$ , o skirstinio maksimumas ties  $\gamma \approx 2.5$ . Tiesa taip pat yra tokių objektų, kurių  $\gamma < 2$  – autorius pastebi, kad didesnė jų dalis jauni – amžius 1–10 mln. m. Anot [Larsen \(2004\)](#), tai gali rodyti, jog vidutinė laipsnio rodiklio vertė didėja su spiečių amžiumi ir tai galbūt yra spiečių dinaminės evoliucijos pasekmė.

[Ryon et al. \(2015\)](#) tirdami M83 galaktikos jaunus spiečius atliko ir  $\gamma$  parametro analizę. Jie nustatė, kad didžiosios dalies tirtų spiečių laipsnio rodiklis  $\gamma$  yra nuo 2 iki 6, o mediana  $\sim 3$ , kas, autorių teigimu, atitinka [Elson et al. \(1987\)](#), [Mackey ir Gilmore \(2003a\)](#), [Larsen \(2004\)](#) rezultatus kitose galaktikose. [Ryon et al. \(2015\)](#) taip pat įvertino ir  $\gamma$  skirstinio priklausomybę nuo spiečių fizinių parametrų ir, priešingai nei [Larsen \(2004\)](#), jokios reikšmingos laipsnio rodiklio priklausomybės nuo spiečių amžiaus nenustatė.

[Ryon et al. \(2017\)](#) atliko dviejų artimų spiralinių galaktikų NGC 628 ir NGC 1313 jaunų masyvių spiečių struktūros tyrimus. Šiame darbe panaudoti duomenys iš aukščiau minėtos LEGUS apžvalgos. Abiejų galaktikų atveju nustatyta, jog didžiąją daugumą tirtų spiečių apibūdina laipsnio rodiklio vertės intervale  $2 \leq \gamma \leq 6$ , mediana NGC 628 –  $\gamma \approx 2.8$ , o NGC 1313 atveju –  $\gamma \approx 2.6$ . Autorių teigimu, toks  $\gamma$  verčių diapazonas ir tipinės laipsnio rodiklio vertės gerai atitinka rezultatus kitose artimose galaktikose. [Ryon et al. \(2017\)](#) darbe taip pat įvertinta ir galima laipsnio rodiklio  $\gamma$  priklausomybė nuo spiečių amžiaus. Kaip ir M83 galaktikoje ([Ryon et al. 2015](#)),  $\gamma$  priklausomybė nuo amžiaus neaptikta.

[Grudić et al. \(2018a\)](#) modeliavo žvaigždžių spiečių formavimąsi pasitelkdami N-kūnų magnetohidrodinaminius (MHD) metodus. Dirbtinių spiečių struktūra detaliau analizuota ir palyginta su jaunų spiečių stebėjimų duomenimis [Grudić et al. \(2018b\)](#). Modeliavimo rezultatai, autorių teigimu, pakankamai gerai dera su artimose galaktikose stebimais žvaigždžių spiečių profiliais,  $\gamma$  skirstiniai palyginti 1.2 pav. Autorių teigimu, geras tik suformuotų modelių spiečių  $\gamma$  skirstinių atitikimas jaunų spiečių ( $\sim 100$  mln. m.)  $\gamma$  skirstiniams, gali rodyti, kad spiečių evoliuciniai procesai reikšmingos įtakos ankstyvais spiečių gyvavimo etapais neturi ir  $\gamma$  skirstinio pobūdį nulemia spiečių formavimosi metu vykstantys procesai.



**1.2 pav.** Jaunų masyvių spiečių EFF profilio laipsnio rodiklio  $\gamma$  skirstiniai artimose galaktikose ir [Grudić et al. \(2018a\)](#) spiečių formavimosi MHD modeliavimo rezultatai. Iliustracija paimta iš [Grudić et al. \(2018b\)](#).

## 2. Dirbtinių žvaigždžių spiečių modeliavimas

Šis skyrius parengtas remiantis magistro studijų mokslo tiriamaisiais darbais II/III ([Daugevičius 2021](#)) ir III/III ([Daugevičius 2022](#)).

### 2.1. Dirbtinių 3D spiečių generavimo algoritmas

Mažos ir vidutinės masės ( $\sim 10^2 - 10^4 M_{\odot}$ ) spiečių atveju reikšmingus nustatytų fizinių ir struktūrinių parametrų neapibrėžtumus gali lemti ryškių žvaigždžių sukeliama stochastiniai efektai. Šie efektai anksčiau tirti pasitelkiant 2D žvaigždžių spiečių ir vaizdų modelius ([Deveikis et al. 2008](#), [de Meulenaer et al. 2013](#), [Narbutis et al. 2014](#)). Visgi, norint įvertinti stochastinių efektų įtaką spiečių fotometriniams matavimams, reikia modeliuoti 3D spiečius. Tai įgalina generuoti jų vaizdus, projektuojant skirtingomis kryptimis ir nagrinėti „sukimo“ efektus.

3D dirbtinių žvaigždžių spiečių modeliavimui buvo panaudotas spiečių generavimo algoritmas, kurtas ir tobulintas II-ojo bei III-ojo magistro studijų mokslo tiriamųjų darbų metu ([Daugevičius 2021](#), [2022](#)). Minėtas algoritmas remiasi pagrindiniais 2D žvaigždžių spiečių ir jų vaizdų modeliavimo principais (pagrindė *SimClust* kodo metodika, [Deveikis et al. 2008](#)), pritaikant juos 3D modelių atvežiui. Šiam spiečių modeliavimo metodo įgyvendinimui naudojamas *Python* programavimo kalba parašytas kodas.

Pirminė algoritmo dalis – atsitiktinis atskirų spiečiaus žvaigždžių pradinių masių generavimas. Čia žvaigždžių masių tikimybes nusako pradinė masės funkcija (angl. *Initial mass function*, IMF), kuri apibrėžia kiek žvaigždžių populiacijoje yra objektų ( $dN$ ) tam tikrame masės intervale ( $dm$ ). Tad, IMF galima laikyti tikimybės tankio funkcija intervale nuo  $m$  iki  $m + dm$ . Šiame darbe naudojama [Kroupa \(2001\)](#) IMF – nesudėtingas sąryšis, kurį nusako kelių intervalų laipsninė funkcija tam tikruose žvaigždžių masių režiuose:

$$\xi(m) = k \cdot b_i \cdot m^{-\alpha_i}, \quad (6)$$

$\alpha_i$  – IMF laipsnio rodiklis tam tikrame žvaigždžių masių intervale  $[m_{i-1}, m_i]$ ,  $k$  ir  $b_i$  – atitinkamai normavimo ir funkcijos nenutrūkstumą/tolydumą užtikrinančios konstantos.

Žvaigždžių pradinės masės modeliuojamos intervale nuo 0.1 iki  $100 M_{\odot}$ , o šiame diapazone Kroupa IMF apibrėžiama dviejų intervalų laipsnine funkcija, kurios laipsnio rodikliai:

$$\begin{cases} \alpha_1 = 1.3, & m < 0.50 M_{\odot} \\ \alpha_2 = 2.3, & m \geq 0.50 M_{\odot} \end{cases} \quad (7)$$

Žvaigždžių masių generavimui naudojama kumuliatyvi masių pasiskirstymo funkcija (angl. *cumulative mass distribution function*, mCDF), kuri nusako tikimybę, jog žvaigždės masė yra mažesnė arba lygi tam tikrai vertei. Ši funkcija gaunama suintegravus 6 lygtį:

$$\Xi(m) = \int_{m_{min}}^m \xi(m') dm', \quad (8)$$

$k$  ir  $b_i$  konstantų vertės parenkamos taip, kad 8 formulėje pateikta funkcija atitinkamame žvaigždžių masių intervale būtų tolydi ir jos vertė kistų nuo 0 iki 1. Individualios žvaigždės masė modeliuojama iš vienodų tikimybių skirstinio (angl. *uniform distribution*, UD) sugeneruojant atsitiktinį skaičių  $rnd_M$  tarp 0 ir 1. Šis skaičius prilyginamas  $\Xi(m)$  funkcijai ir pritaikius atvirkštinę funkciją, gaunama vienos atskiros žvaigždės masė  $m_i$ :

$$m_i = F^{-1}(\Xi(m) = rnd_M). \quad (9)$$

Ši atskirų spiečiaus žvaigždžių masių generavimo metodika grafiškai iliustruota 2.1 pav. Sugeneravus žvaigždės masę, jai yra priskiriama padėtis spiečiuje. Žvaigždžių erdvinis pasiskirstymas šiame algoritme modeliuojamas pagal empirinį EFF profilį, kuris dažnai naudojamas jaunų masyvių spiečių tyrimuose. EFF profilis trumpai aprašytas 1 skyriuje ir jį aprašanti funkcija pateikta 2 lygtyje.

Visgi, norint atlikti 3D žvaigždžių spiečių modeliavimą, nuo paviršinio šviesio/tankio (2D) profilio formuluotės reikia pereiti prie erdvinio tankio (3D) profilio. Pasinaudojant atvirkštine Abelio transformacija galima deprojektuoti 2D profilį (2 lygtis) ir padauginus iš atitinkamo masės-šviesio santykio  $\left(\frac{M}{L}\right)$  gauti atitinkamą 3D profilį.

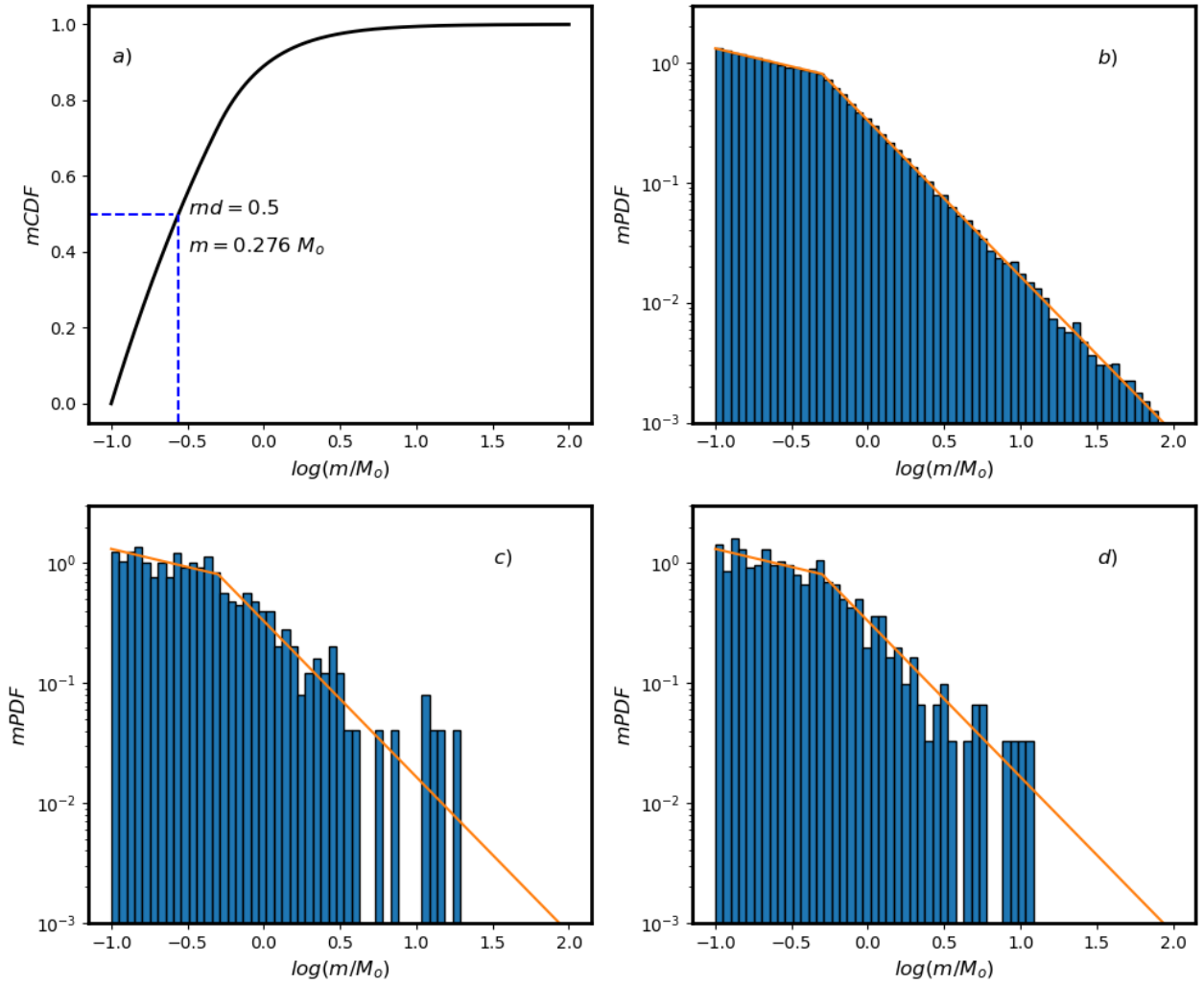
$$\rho(R) = -\frac{1}{\pi L} \int_R^\infty \frac{d\mu(r)}{dr} \cdot \frac{1}{\sqrt{r^2 - R^2}} dr = \rho_0 \left(1 + \frac{R^2}{r_0^2}\right)^{-\frac{(\gamma+1)}{2}}, \quad (10)$$

$$\rho_0 = \frac{\mu_0 \Gamma\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi} r_0 \Gamma\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \cdot \frac{M}{L}, \quad (10a)$$

čia  $\rho_0$  – centrinis erdvinis spiečiaus tankis;  $R$  – deprojektuotas (3D) atstumas nuo spiečiaus centro;  $\Gamma$  – gama funkcija.

Žvaigždžių padėtys spiečiuje generuojamos pagal [Aarseth et al. \(1974\)](#) pasiūlytą metodiką, kaip sumodeliuoti pradines žvaigždžių koordinatas dinaminuose spiečių (N-kūnų) modeliuose. Tam reikalingas spiečiaus kumuliatyvus masės profilis, kuris gaunamas suintegravus erdvinio tankio profilį (10 lygtį):





**2.1 pav.** Individualių spiečiaus žvaigždžių masių generavimo algoritmas. a) kumuliatyvus masių skirstinys  $\Xi(m)$  (mCDF) nuo 0.1 iki  $100 M_{\odot}$  (juoda linija) ir jo panaudojimas žvaigždės masės generavimui (mėlyna punktyrinė linija). b) histograma –  $\log(M/M_{\odot}) = 5$  spiečiaus žvaigždžių masių funkcija dideliu tikslumu atitinka teorinę IMF – silpni stochastiniai efektai. c) ir d) histogramos – dvi skirtingos  $\log(M/M_{\odot}) = 2.5$  spiečiaus generacijos – mažos masės spiečių atveju reikšmingas masių funkcijos stochastiškumas didelės masės žvaigždžių dalyje. b-d) oranžinė linija žymi bėgalinės masės spiečiaus IMF  $\xi(m)$  (tikimybės tankio funkcija).

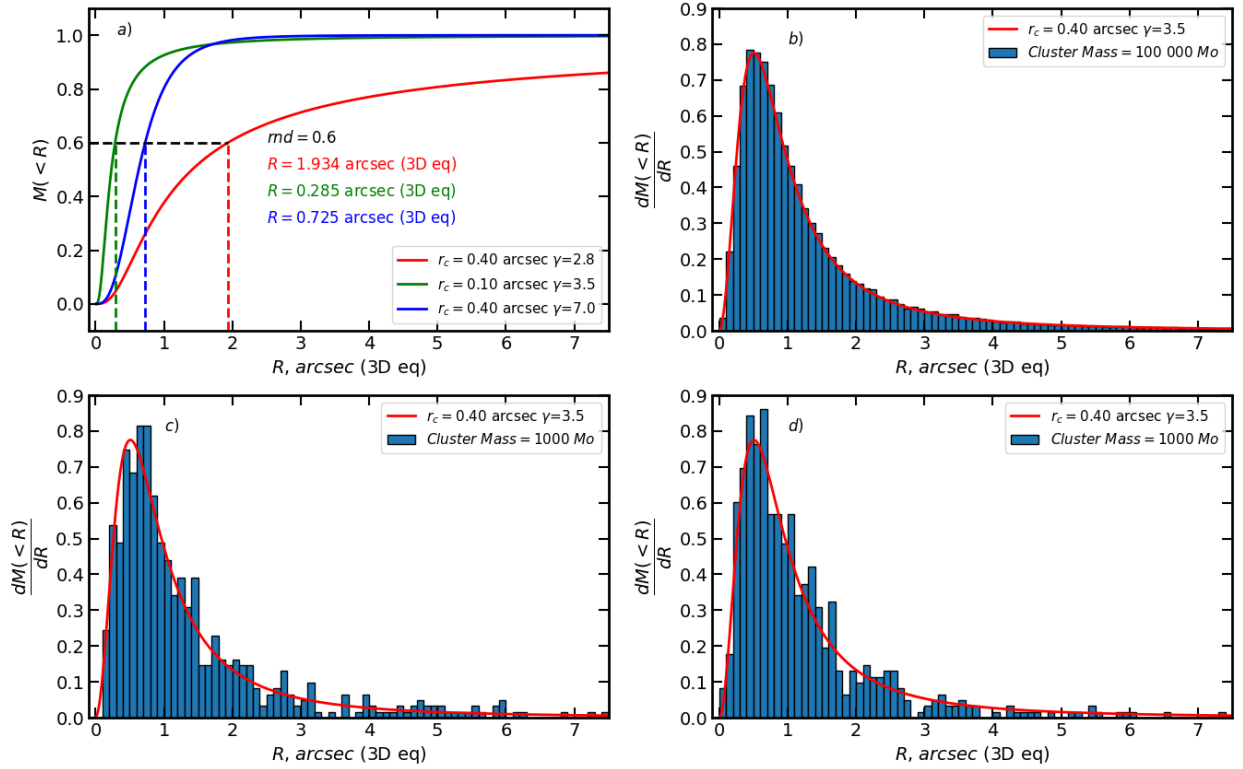
$$M(< R) = \int_0^R 4\pi x^2 \rho(x) dx = \frac{4\pi\rho_0}{3} {}_2F_1\left(\frac{3}{2}; \frac{\gamma+1}{2}; \frac{5}{2}; -\frac{R^2}{r_0^2}\right), \quad (11)$$

kur  ${}_2F_1(a; b; c; z)$  – Gauso hipergeometrinė funkcija. Panašiai, kaip žvaigždžių masių generavimo atveju,  $M(< R)$  funkcija yra sunormuojama taip, kad jos vertė kistų nuo 0 iki 1, ir tuomet yra sugeneruojamas atsitiktinis skaičius  $rnd_R$  iš UD tarp 0 ir 1, kuris prilyginamas  $M(< R)$  funkcijos vertei. Pasitelkiant atvirkštinę funkciją,  $rnd_R$  skaičius yra perskaičiuojamas į žvaigždės 3D atstumą nuo spiečiaus centro:



$$R_i = F^{-1}(M(< R) = rnd_R), \quad (12)$$

čia  $R_i$  –  $i$ -tosios žvaigždės 3D atstumas nuo spiečiaus centro. Žvaigždžių atstumų generavimo metodas vizualiai iliustruotas 2.2 pav.



**2.2 pav.** Žvaigždžių individualių 3D atstumų nuo spiečiaus centro generavimas. a) trys skirtingų parametų EFF spiečiaus masės profiliai; kiekvieno profilio atveju parodyti sugeneruoti atstumai iš  $rnd_R = 0.6$ . b) atstumų generavimo rezultatas  $\log(M/M_\odot) = 5.0$  spiečiui. c) ir d) dvi skirtingos  $\log(M/M_\odot) = 3.0$  spiečiaus generacijos. Akivaizdu, jog mažos masės spiečių atveju reikšmingi žvaigždžių erdvinio pasiskirstymo stochastiniai efektai. b-d) raudona kreivė žymi atitinkamą EFF parametų atstumų generavimo tikimybės tankio funkciją  $\frac{dM(<R)}{dr}$ .

Žvaigždei priskyrus jos atstumą nuo spiečiaus centro, toliau reikia priskirti ir dvi krypties koordinatas. Tai atliekama vėl pasitelkiant atsitiktinius skaičius. Tam tikslui iš UD sugeneruojami du skaičiai –  $u_i$  (nuo 0 iki  $2\pi$ ) ir  $v_i$  (nuo  $-1$  iki 1), kurie perskaičiuojami į sferines koordinatas:

$$\begin{cases} \varphi_i = u_i \\ \theta_i = \cos^{-1} v_i \end{cases} \quad (13)$$

Šios konvertuojamos ir į Dekarto sistemos koordinatas:

$$\begin{cases} X_i = R_i \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \varphi_i \\ Y_i = R_i \cdot \sin \theta_i \cdot \sin \varphi_i \\ Z_i = R_i \cdot \cos \theta_i \end{cases} \quad (14)$$

Pagal aukščiau aprašytą individualių žvaigždžių (jų masių ir erdvinio pasiskirstymo spiečiuje) modeliavimo algoritmą, jos yra generuojamos kol  $7.5 \text{ arcsec}$  (3D ekvivalento, atitinka  $\sim 26.5 \text{ pc}$  M31 astumu) spindulio sferoje yra pasiekiami arba viršijami pasirinkta pilnutinė pradinė spiečiaus masė. Užbaigus žvaigždžių generavimą, yra įvertinama, ar sugeneruota suminė masė yra arčiau tikslo vertės įtraukus paskutinę sugeneruotą žvaigždę, ar šį objektą atmetus. Santykinai tikslesnis rezultatas variantas yra paliekamas kaip galutinis spiečiaus modeliavimo rezultatas.

Kitas 3D dirbtinių žvaigždžių spiečių modeliavimo algoritmo žingsnis – priskirti sugeneruotoms žvaigždėms ryškius pagal jų mases ir modeliuojamo spiečiaus amžių. Darant prielaidą, kad visos spiečiaus žvaigždės susiformavo vieno žvaigždėdaros žybsnio metu ir jų cheminė sudėtis bei amžius yra vienodas, ryškius žvaigždėms priskirti galima pasitelkiant atitinkamo amžiaus ir metalingumo izochroną. Šiuo atveju panaudoti PARSEC v1.2s ([Bressan et al. 2012](#)) žvaigždžių evoliuciniai modeliai.

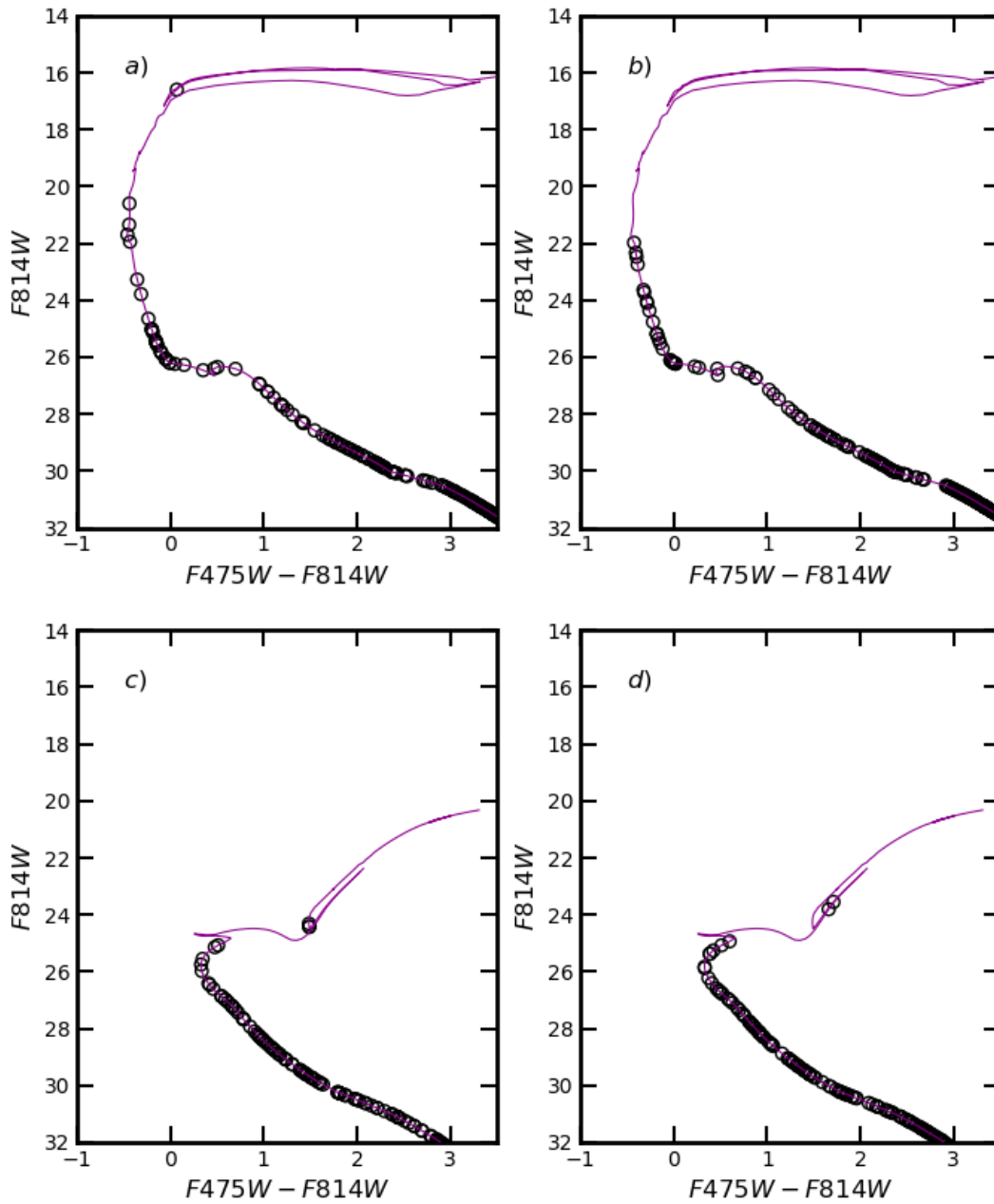
Panaudojome Saulės metalingumo izochronas<sup>1</sup> amžių intervale nuo  $\log(t/yr) = 6.6$  iki  $10.1$ . Dirbtinių spiečių žvaigždėms ryškiai buvo priskirti interpoliuojant PARSEC izochronas pagal žvaigždžių pradines mases. Izochronų duomenyse taip pat pateikiama informacija, kaip žvaigždžių masės kinta laikui bėgant dėl įvairių masės praradimo procesų žvaigždžių evoliucijos metu, tad galima sekti dirbtinio spiečiaus bei jo individualių žvaigždžių masės kitimą dėl evoliucijos. Žvaigždžių spiečių masė kisti gali ne tik dėl žvaigždžių evoliucijos, bet ir dėl spiečiaus dinaminės evoliucijos, tačiau dinaminiai efektai šiame darbe nebuvo modeliuojami.

Vienas iš šio darbo uždavinių yra sumodeliuoti kiek įmanoma tikslesnius ir realistiškus dirbtinių spiečių vaizdus, kurie atitiktų realius Andromedos galaktikos žvaigždžių spiečių vaizdus PHAT apžvalgoje. Izochronos buvo interpoliuojamos fotometriniame sistemoje, kuri panaudota šioje apžvalgoje. Ją sudaro šešios Hubble kosminio teleskopo fotometrinės juostos (FJ), kurios padengia spektro intervalą nuo  $0.25$  iki  $1.6 \mu\text{m}$  (2.1 lentelė). Absoliutūs izochronų ryškiai prieš jas interpoliuojant buvo perskaičiuoti į regimuosius taikant M31 atstumo modulį  $m - M = 24.47$  ([McConnachie et al. 2005](#)).

2.3 pav. pavaizduotos dviejų tos pačios masės dirbtinių spiečių generacijų spalvos-ryškio diagramos ties dviem skirtingais amžiais, kartu su atitinkamo amžiaus PARSEC izochronomis. Čia galima atkreipti dėmesį, jog mažos masės, jaunų spiečių atveju, nors teoriškai fiziniai parametrai tie patys, vien dėl IMF stochastiškumo sukiamų efektų, jie gali būti labai skirtingi.

---

<sup>1</sup> <http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>



**2.3 pav.** Dviejų skirtingų  $\log(M/M_{\odot}) = 2.5$  IMF generacijų spalvos-ryškio diagramos ties  $\log(t/yr) = 7.0$  (viršutinė eilė) ir  $9.0$  (apatinė eilė). Generacija, pavaizduota kairiajame stulpelyje atitinka 2.1 pav. c), o dešiniajame – 2.1 pav. d). Vien dėl IMF stochastiškumo jauni mažos masės spiečiai, pasižymintys tais pačiais parametrais, iš tiesų gali būti labai skirtingi.

## 2.1 lentelė. Darbe naudojama fotometrinė sistema

<i>FJ</i> <i>pavadinimas</i>	<i>Spektro</i> <i>sritis<sup>a</sup></i>	<i>HST kamera</i> <i>Pikselio mastelis,</i> <i>arcsec/pixel</i>	<i>Efektinis</i> <i>bangos ilgis, nm</i>	<i>Nulpunktas<sup>b</sup>,</i> <i>mag</i>	
F275W	UV	WFC3/UVIS	~0.04	271.5	22.67
F336W				336.1	23.52
F475W	VIS	ACS/WFC	~0.05	476.3	26.15
F814W				808.7	25.52
F110W	IR	WFC3/IR	~0.13	1140	26.06
F160W				1540	24.70

a) UV – ultravioletinė, VIS – regimoji, IR – infraraudonoji spektro sritis

b) Nulpunktų vertės naudojamos tokios pačios, kaip [Naujalis et al. \(2021\)](#)

Šio darbo metu buvo sugeneruotas 3D žvaigždžių spiečių modelių tinklas, savo parametrais padengiantis realią M31 galaktikoje stebimų spiečių parametų ribas:

$$\log(M/M_{\odot}) = [2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0]$$

$$\log(t/yr) = [7.0, 8.0, 9.0, 10.0]$$

$$r_c = [0.05, 0.10, 0.20, 0.40, 0.80] \text{ arcsec}$$

$$\gamma = [2.2, 2.4, 2.8, 3.5, 7.0]$$

Visuose modelių tinklo mazguose buvo modeliuojama po 100 skirtingų spiečių generacijų. Iš viso sugeneruota 50000 skirtingų 3D žvaigždžių spiečių modelių. Visi modeliai yra Saulės metalingumo.

## 2.2. Spiečių vaizdų modeliavimas

Dirbtinių spiečių realistiški vaizdai buvo modeliuojami taikant panašią metodiką į naudotą [Bialopetravičius et al. \(2019\)](#). Siekiant sumodeliuoti realius HST stebėjimus atitinkančius individualių žvaigždžių vaizdus, panaudotas TinyTim<sup>2</sup> programinis paketas, skirtas įvairių HST instrumentų ir filtrų kombinacijų taško išplitimo funkcijų (PSF, angl. *point spread function*) modeliavimui. Spiečių vaizdai buvo modeliuojami trijose iš šešių PHAT apžvalgos FJ – F336W, F475W, F814W. Individualios žvaigždės spiečiuje vaizdas vienoje FJ gaunamas žvaigždės ryškį toje juostoje perskaičiavus į jos spinduliuojamą srautą ir jį padauginus iš atitinkamos TinyTim PSF. Žvaigždės generuojamas srautas iš ryškio perskaičiuojamas taip:

<sup>2</sup> <https://www.stsci.edu/hst/instrumentation/focus-and-pointing/focus/tiny-tim-hst-psf-modeling>

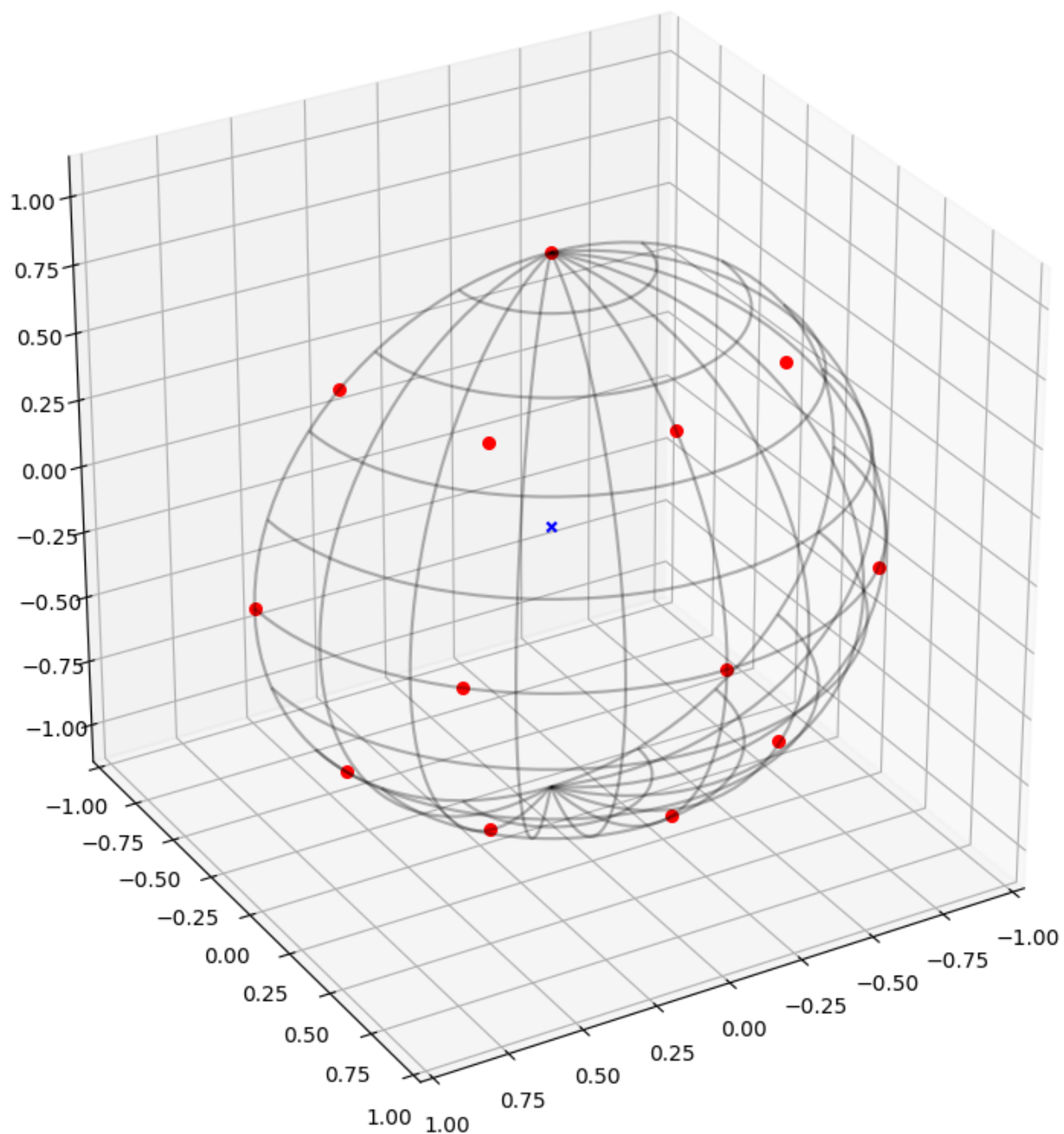
$$Flux = 10^{-\frac{F^{***}W - F^{***}W_0}{2.5}}, \quad (12)$$

čia  $F^{***}W$  – žvaigždės ryškis, vienoje iš FJ,  $F^{***}W_0$  – atitinkamos FJ nulpunktas (žr. 2.1 lentelę). Padauginus taip apskaičiuotą žvaigždės srautą iš TinyTim PSF, gaunamos srauto vertės e/s vaizdo elementuose. Vaizdai modeliuojami  $15 \times 15 \text{ arcsec}$  (M31 atstumu atitinka  $\sim 53 \times 53 \text{ pc}$ ) dydžio laukelyje.

Dirbtinių spiečių vaizdai modeliuoti imant 13 skirtingų to paties spiečiaus projekcijų 2D plokštumoje, t. y. imituojant spiečiaus stebėjimą iš 13 skirtingų krypčių. Tai leidžia įvertinti, kokią įtaką spiečių matavimų neapibrėžtumui turi stebėjimo kryptis. Šias kryptis galima aprašyti pagal geografinių koordinatų analogą, t. y. ilgumą ir platumą. Spiečių vaizdai modeliuoti imituojant jų stebėjimą iš tokių krypčių:

$$\begin{aligned} & [0^\circ, 90^\circ]; [0^\circ, 45^\circ]; [0^\circ, 0^\circ]; [0^\circ, -45^\circ]; [45^\circ, 45^\circ]; [45^\circ, 0^\circ]; [45^\circ, -45^\circ] \\ & [90^\circ, 45^\circ]; [90^\circ, 0^\circ]; [90^\circ, -45^\circ]; [135^\circ, 45^\circ]; [135^\circ, 0^\circ]; [135^\circ, -45^\circ], \end{aligned}$$

čia kryptys nurodytos tokiu formatu –  $[Ilguma, Platuma]$ . Modeliuojamos stebėjimo kryptys grafiškai iliustruotos 2.4 pav. Šio darbo metu iš viso sumodeliuota po 650000 ( $50000 \times 13$ ) dirbtinių spiečių vaizdus trijose minėtose PHAT FJ. Dirbtinių spiečių vaizdai išsaugoti tolesnei analizei *fits* formatu. Keletas dirbtinių spiečių vaizdų pavyzdžių pateikta [1 Priede](#).



**2.4 pav.** Modeliuojamų stebėjimo kryptių geometrija. Raudoni taškai sudėti ant vienetinės sferos paviršiaus – kryptys, iš kurių projekcijų modeliuojami dirbtinių spiečių vaizdai; mėlynas simbolis, patalpintas  $[0, 0, 0]$  – rodo spiečiaus centrą.

### 3. Stochastinių efektų įtaka spiečių matavimams

#### 3.1. Apertūrinė fotometrija

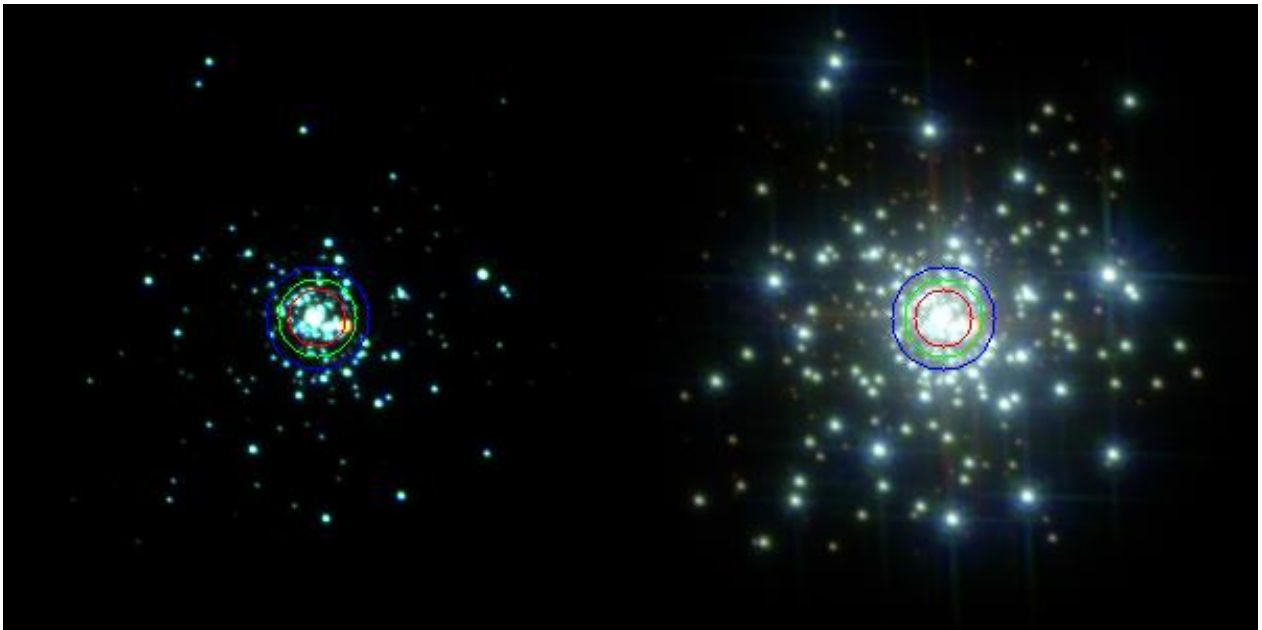
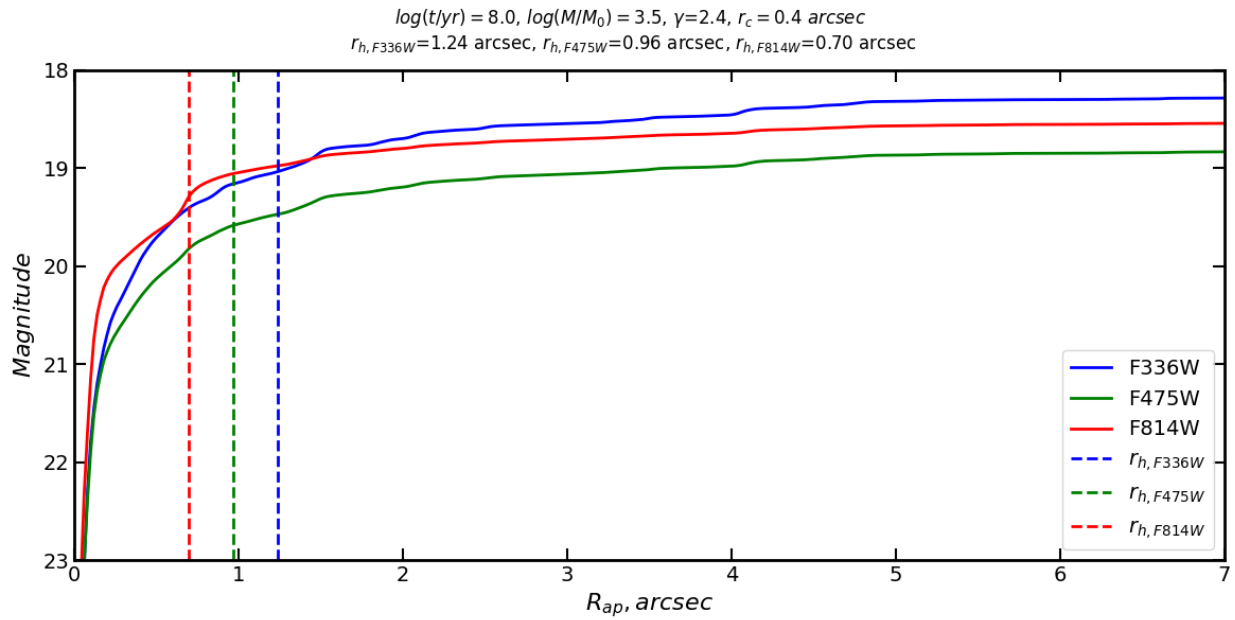
Siekiant įvertinti, kokią įtaka spiečių fotometrinių ir struktūrinių parametrų matavimams turi žvaigždžių sukeliami stochastiniai efektai, dirbtinių žvaigždžių spiečių vaizdams buvo atlikta apertūrinė fotometrija ir pamatuotos augimo kreivės trijose FJ. Matavimai buvo atliekami iki  $7.0 \text{ arcsec}$  spindulio dydžio apertūros, taikytas  $0.02 \text{ arcsec}$  apertūros spindulio žingsnis. Apertūrinės fotometrijos procedūros buvo įgyvendintos panaudojant *Python* programavimo aplinkoje esantį *photutils*<sup>3</sup> paketą. Apertūrinės fotometrijos, augimo kreivių matavimai iliustruoti 3.1 pav. pateiktame pavyzdyje. Remiantis apertūrinės fotometrijos matavimais, dirbtiniams spiečiams buvo nustatyti apskritiminių apertūrų, ribojančių skirtingas pilnutinio šviesio dalis, spinduliai (toliau tekste dar vadinami R parametrais, žymimi  $R_X$ , kur  $X$  – ribojama pilnutinio šviesio dalis procentais), taip pat spalvos rodiklių (tekste žymima ir CI, angl. *Colour Index*) vertės pamatuotos naudojant kelias skirtingo dydžio apertūras (jų dydį nusako apertūros spindulys  $R_{ap}$ ). Žvaigždžių stochastinių efektų įtaka šių parametrų matavimams aptariama šiame skyriuje. Jie nagrinėjami išskiriant atskirai į efektus sukeliamus žvaigždžių generavimo stochastiškumo spiečiuje (toliau vadinami generavimo efektais) ir efektus dėl skirtingos to paties spiečiaus stebėjimo krypties.

#### 3.2. Generavimo stochastiškumo įtaka fotometriniams parametrams

Šiame poskyryje plačiau aptariama generavimo stochastiškumo efektų įtaka spiečių fotometriniams parametrams. Tuo tikslu, kiekviename modelių tinklo mazge buvo paimti vienos stebėjimo krypties modeliavimo rezultatai visoms (100) spiečiaus generacijoms. Tuomet, šiems 100 modelių (atitinkamame modelių tinklo mazge) apskaičiuotos medianinės spalvos rodiklių  $F336W - F475W$  ir  $F475W - F814W$  vertės bei jų sklaidos (standartiniai nuokrypiai). Šių CI ir jų sklaidos dėl generacijos efektų priklausomybė nuo spiečių evoliucinių (masė, amžius) bei geometrinių ( $r_c$ ,  $\gamma$ ) parametrų pavaizduota 3.2 ir 3.3 pav., čia naudojami  $R_{ap} = 0.5 \text{ arcsec}$  matavimai. Tokios pačios diagramos naudojant  $R_{ap} = 2.0 \text{ arcsec}$  apertūros matavimus pateiktos [2 Priede](#) – P2.1 ir P2.2. Didesnė teigiama CI vertė reiškia, jog spiečius raudonesnis, kas yra būdinga spiečiams, pasižymintiems didesniu amžiumi, metalingumu ar tarpžvaigždine ekstinkcija.

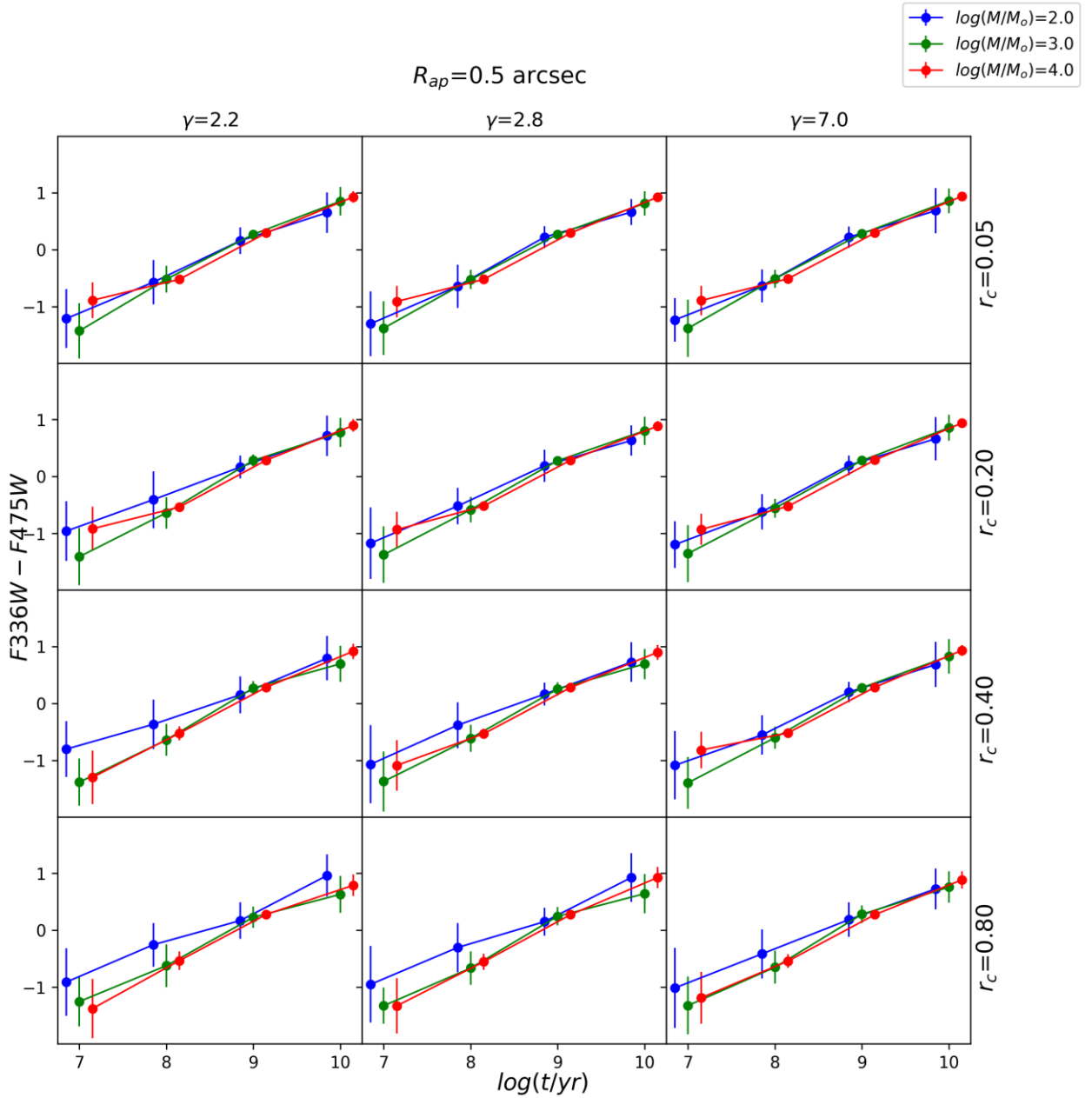
---

<sup>3</sup> <https://doi.org/10.5281/zenodo.596036>

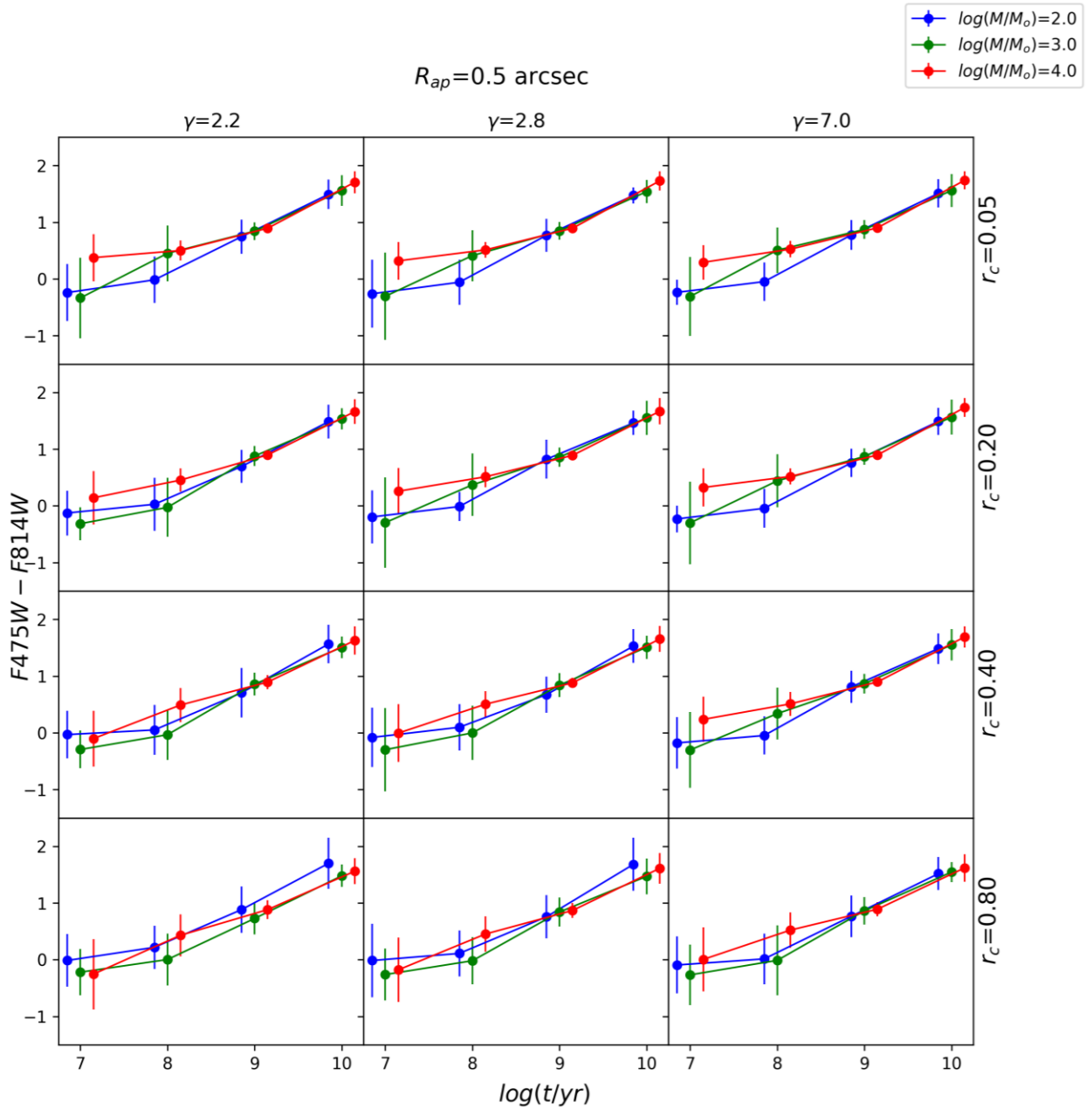


**3.1 pav.** Viršuje – vieno iš dirbtinių spiečių (spiečiaus parametrai nurodyti virš augimo kreivių) augimo kreivės 3 FJ. Brūkšninės vertikalios linijos žymi nustatytus  $r_h$  atitinkamose FJ, vertės pateiktos tekste virš augimo kreivių. Apatinėje eilėje – šio spiečiaus spalvotos nuotraukos, kairėje – žvaigždžių generuojamas srautas sunormuotas tiesinėje skalėje, dešinėje – logaritminėje skalėje. Spalvoti apskritai žymi  $r_h$  spindulio apertūras atitinkamose FJ.





**3.2 pav.** Medianinės  $F_{336W} - F_{475W}$  spalvos rodiklio vertės bei generavimo stochastiškumo efektų sukeltos sklaidos (paklaidų „ūšai“) priklausomybė nuo evoliucinių ir geometrinių spiečių parametru. Matavimai gauti taikant  $R_{ap} = 0.5 \text{ arcsec}$  dydžio apertūrą. Spalvos rodiklio sklaida gauta apskaičiuojant spalvos rodiklių atitinkamame modelių tinklo mazge standartinį nuokrypį.



**3.3 pav.** Medianinės  $F_{475W} - F_{814W}$  spalvos rodiklio vertės bei generavimo stochastiškumo efektų sukeltos sklaidos (paklaidų „ūšai“) priklausomybė nuo evoliucinių ir geometrinių spiečių parametrų. Matavimai gauti taikant  $R_{ap} = 0.5 \text{ arcsec}$  dydžio apertūrą. Spalvos rodiklių sklaida gauta apskaičiuojant spalvos rodiklių atitinkamame modelių tinklo mazge standartinį nuokrypį.

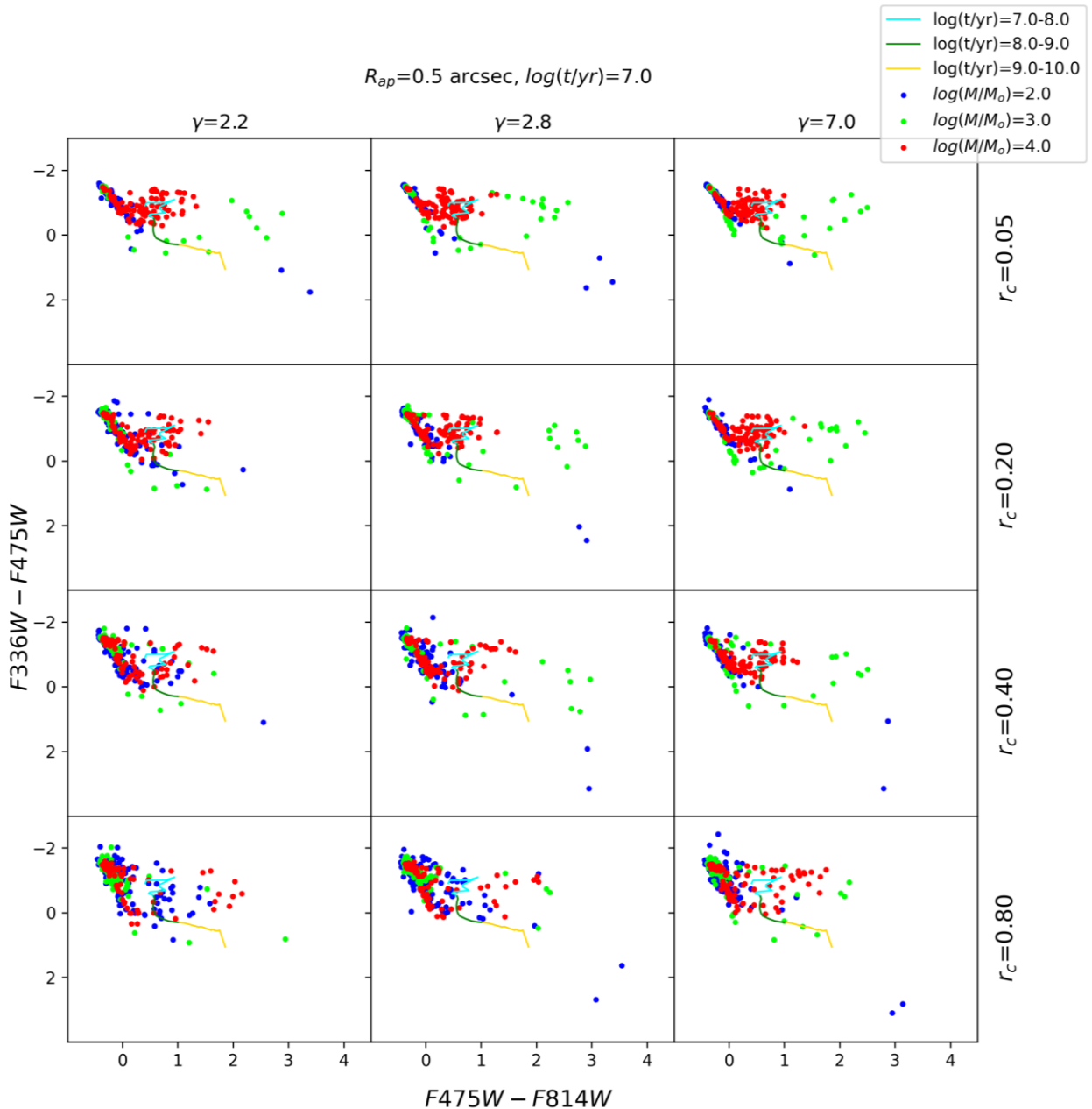
Reikia atkreipti dėmesį, jog abiejų spalvos rodiklių atveju, praktiškai visų modeliuojamų masių ir amžių spiečiai pasižymi reikšminga CI sklaida dėl generavimo stochastiškumo. Spalvos rodiklių sklaida svyruoja nuo dešimtujų ryškio dalių iki daugiau nei ryškis. Bendrai paėmus, didesnio amžiaus spiečiai pasižymi mažesne sklaida iki  $\sim 1$  mlrd. m. amžiaus. Patiems seniausiems spiečiams būdinga vėl šiek tiek padidėjusi sklaida. Tokią tendenciją galima paaiškinti, tuo kad laikui bėgant žvaigždžių masės funkcijos stochastiškumas mažėja, nes numiršta visos masyvios, greitai evoliucionuojančios žvaigždės, kurios skleidžia didžiąją dalį jaunų, mažos/vidutinės masės spiečių šviesos ir pasižymi ekstremaliomis, raudonesnėmis nei pagrindinės sekos (MS, angl. *Main Sequence*) žvaigždžių, CI vertėmis. O sklaidos padidėjimą 10 mlrd. m. spiečių atveju, galima paaiškinti tuo, jog ties tokiu amžiumi čia tiriamų masių spiečių atveju MS žvaigždės spinduliuoja nedaug šviesos, ir senuose spiečiuose egzistuojančios negausios ir stochastiškos AGB ir RGB žvaigždžių populiacijos generuoja didžiąją dalį spiečiaus srauto, tad nuo jų ypatybių stipriai priklauso matuojami spiečių parametrai. Įdomų rezultatą galima pastebėti  $F475W - F814W$  CI atveju (3.3 pav.): 10–100 mln. m. amžių intervale didžiosios dalies geometrinių parametru atveju, nepriklausomai nuo apertūros dydžio, masyvesni spiečiai ( $10^3 M_{\odot}$ , tam tikrais atvejais ir  $10^4 M_{\odot}$ ) pasižymi didesne šio spalvos rodiklio sklaida dėl generavimo stochastiškumo efektų, nei pačios mažiausios masės spiečiai ( $10^2 M_{\odot}$ ). Tą galima paaiškinti tuo, jog šie spiečiai yra pakankamai masyvūs, kad stochastinės IMF atveju tikimybė būtų didelė retkarčiais juose sugeneruoti vieną ar kelias labai masyvias žvaigždes, kurios šiame amžių intervale jau yra vėlyvose evoliucinėse stadijose, t. y. jau tapę geltonosiomis ar raudonosiomis supermilžinėmis. Kadangi tokios žvaigždės, kaip minėta, gali stipriai pakeisti bendrą spiečiaus spalvą į raudonąją pusę, ypač  $10^3 M_{\odot}$  spiečių atveju, o tai nulemia platų spalvos rodiklių intervalą, nors spiečių parametrai iš principo tie patys. Šis efektas ryškesnis  $F475W - F814W$  lyginant su  $F336W - F475W$ , dėl to, jog minėtos milžinės žvaigždės spinduliuoja reikšmingą savo šviesio dalį  $F814W$  FJ, o MS žvaigždės, kurios sudaro absoliučią daugumą spiečiaus žvaigždžių, ties tokiu amžiumi šioje FJ skleidžia tik nedidelę dalį savo spinduliuotės. Toks rezultatas rodo, kad  $\sim 10^3 M_{\odot}$  masės spiečiai šiame amžių intervale pasižymi dideliu fotometrinių parametru neapibrėžtumu, kas savo ruožtu gali nulemti netiksliai nustatytus fizinius spiečių parametrus taikant integralinės fotometrijos metodus ([de Meulenaer et al. 2013](#), [Fouesneau et al. 2014](#)).

Žvaigždžių sukeltamų stochastinių efektų įtaką fotometriniams parametrams taip pat galima nagrinėti ir dvispalvėse diagramose (CCD, angl. *Colour-Colour Diagram*). Tokios diagramos pavaizduotos 3.4 (spiečių amžius 10 mln. m.) bei 3.5 (1 mlrd. m.) paveiksluose. Abiejų šių

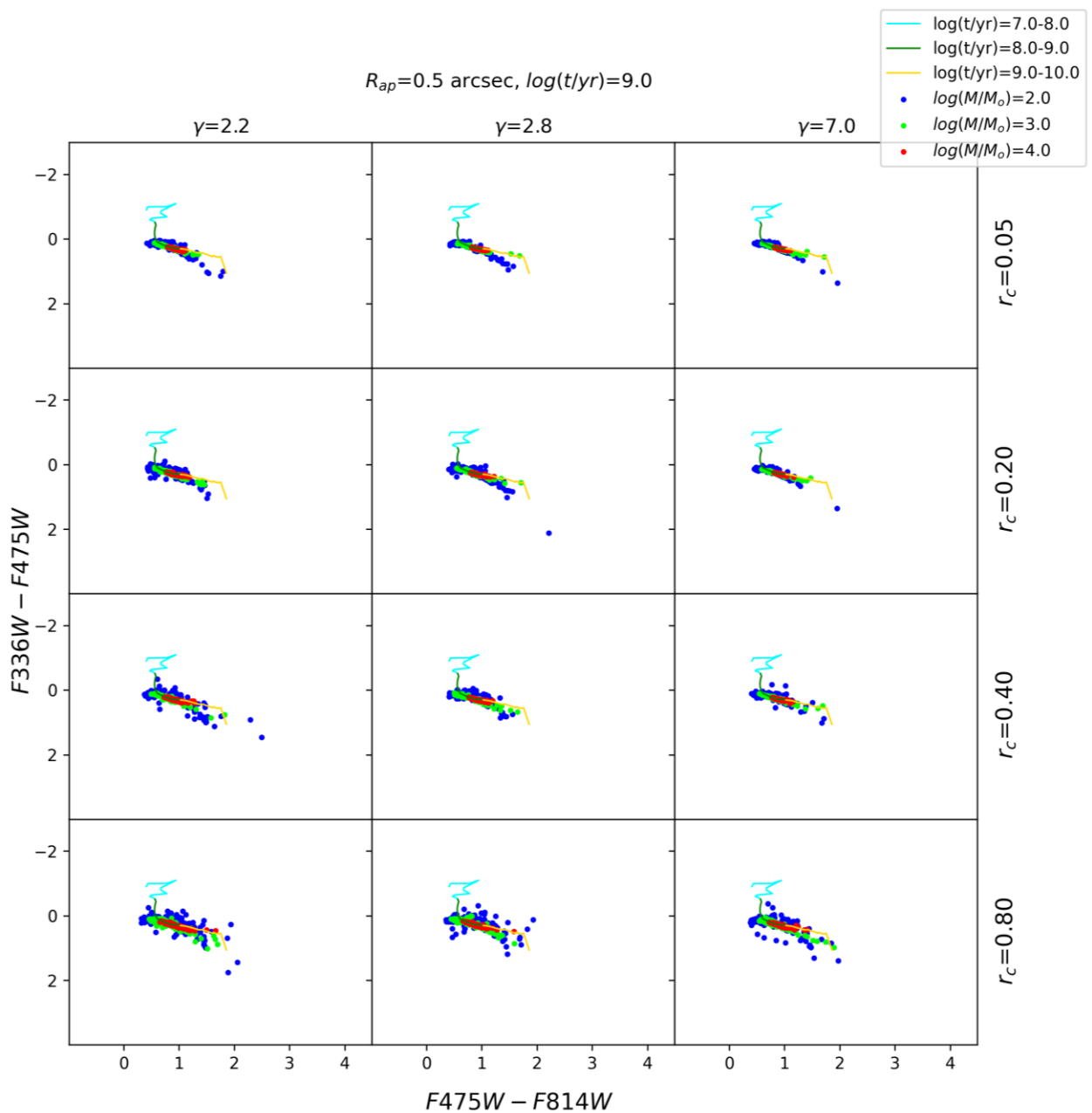
diagramų atveju panaudoti matavimai, gauti taikant  $R_{ap} = 0.5 \text{ arcsec}$  dydžio apertūrą. Tokios pačios diagramos tik matuojant didesne apertūra pateiktos [2 Priede](#) – P2.3 ir P2.4. Šiose diagramose linijomis pažymėti PADOVA ([Bressan et al. 2012](#)) SSP modeliai, skirtingos linijos spalvos išskiria skirtingus modelių amžių intervalus.

3.4 pav. galima pastebėti, kad jaunų spiečių atveju, šiame tiriamame masių intervale praktiškai nepriklausomai nuo masės yra dengiamas labai didelis CCD plotas – spalvos rodiklių skirtumai tarp tų pačių parametrų spiečių siekia kelis ryškius. Kaip galima matyti lyginant su SSP modelių kreive, matavimų sklaida didžiąja dalimi vyksta didesnio amžiaus kryptimi. Toks rezultatas iliustruoja, jog jaunų (~10–100 mln. m.), mažos masės ( $10^2 - 10^4 M_{\odot}$ ) spiečių atveju dėl IMF stochastiškumo, jų fotometrinių matavimai pasižymi labai dideliu neapibrėžtumu, kas gali nulemti labai netiksliai nustatomus jų fizinius parametrus, kaip ir minėta anksčiau. Spiečių amžius gali būti nustatomas žymiai didesnis nei išties yra – spalvos rodiklių sklaida dengia praktiškai visą amžių intervalą lyginant su SSP modeliais. Beje, jaunų spiečių atveju matome, kad tipinė dirbtinių spiečių padėtis CCD daug skiriasi nuo SSP modelių, kuriems taikoma pilnai užpildytos IMF prielaida. Tai rodo, kad tokios mažos masės jauniems spiečiams ši aproksimacija nėra tinkama. 3.4 pav. taip pat galima pastebėti, jog didesnės koncentracijos spiečių atveju spalvos rodiklių sklaida yra šiek tiek mažesnė, tad tokių spiečių fotometrinių parametrai yra patikimesni. Lyginant 3.4 pav. su didesnės apertūros matavimais [P2.3](#), galima pastebėti, kad naudojant didesnę apertūrą matavimų sklaida yra šiek tiek mažesnė. Tačiau būtina paminėti tai, kad mažos masės spiečiams realioje situacijoje dažniausiai tenka taikyti mažą apertūrą, kadangi išorinę blausią spiečiaus dalį užgožia galaktikos fonas bei išryškėja tik pats spiečiaus branduolys. Todėl taikant didesnę apertūrą M31 atveju, fotometrinių matavimai, tikėtina, jog būtų sugadinti išskiriamų pavienių ryškių fono žvaigždžių. 3.5 pav. galima pastebėti, kad ties 1 mlrd. m. metų spalvos rodiklių sklaida labai sumažėja ir dirbtinių spiečių matavimai gana gerai atitinka SSP modelius. Taip pat išryškėja masės efektas, jog masyvesni spiečiai pasižymi mažesne matavimų sklaida. Tad masyvesniems spiečiams ( $\sim 10^4 M_{\odot}$ ) stochastinių efektų įtaka nedidelė, matavimai patikimesni ir fiziniai parametrai, nustatomi remiantis integralinės fotometrijos rezultatais, bus tikslesni, nei jaunesnių spiečių atveju. Nors CI sklaida sumažėja ir mažos masės spiečiams ( $10^2 - 10^3 M_{\odot}$ ), tokie spiečiai ties 1 mlrd. m. generuoja jau pakankamai silpną šviesos srautą (žr. [P1.1-P1.2 pav.](#)), tad teigti, jog tokių spiečių matavimai yra patikimesni negalima, nes realioje situacijoje, tokie spiečiai pakankamai tankiame fone būtų užgožiami ir apskritai neaptinkami. Apibendrinant šiame poskyryje aptartus duomenis, galima teigti, kad generavimo stochastiškumo efektai mažos/vidutinės masės spiečiams ( $10^2 -$

$10^4 M_{\odot}$ ) stipriai paveikia jų fotometrinius matavimus, kuomet jie jauni (10–100 mln. m.), o tai nulemia mažesnę spiečiams nustatomų fizinių parametrų tikslumą.



**3.4 pav.** Generavimo stochastiškumo efektų įtaka skirtingų parametrų spiečių dvispalvėms (CCD) diagramoms. Čia visoms generacijoms atitinkamame modelių tinklo mazge paimti vienos stebėjimo krypties rezultatai. Spalvota kreivė žymi PADOVA SSP modelius. Spiečių amžius – 10 mln. m., apertūros dydis –  $R_{ap} = 0.5 \text{ arcsec}$ .



**3.5 pav.** Tas pats kaip ir 3.4 pav., tik čia spiečių amžius – 1 mlrd. m.

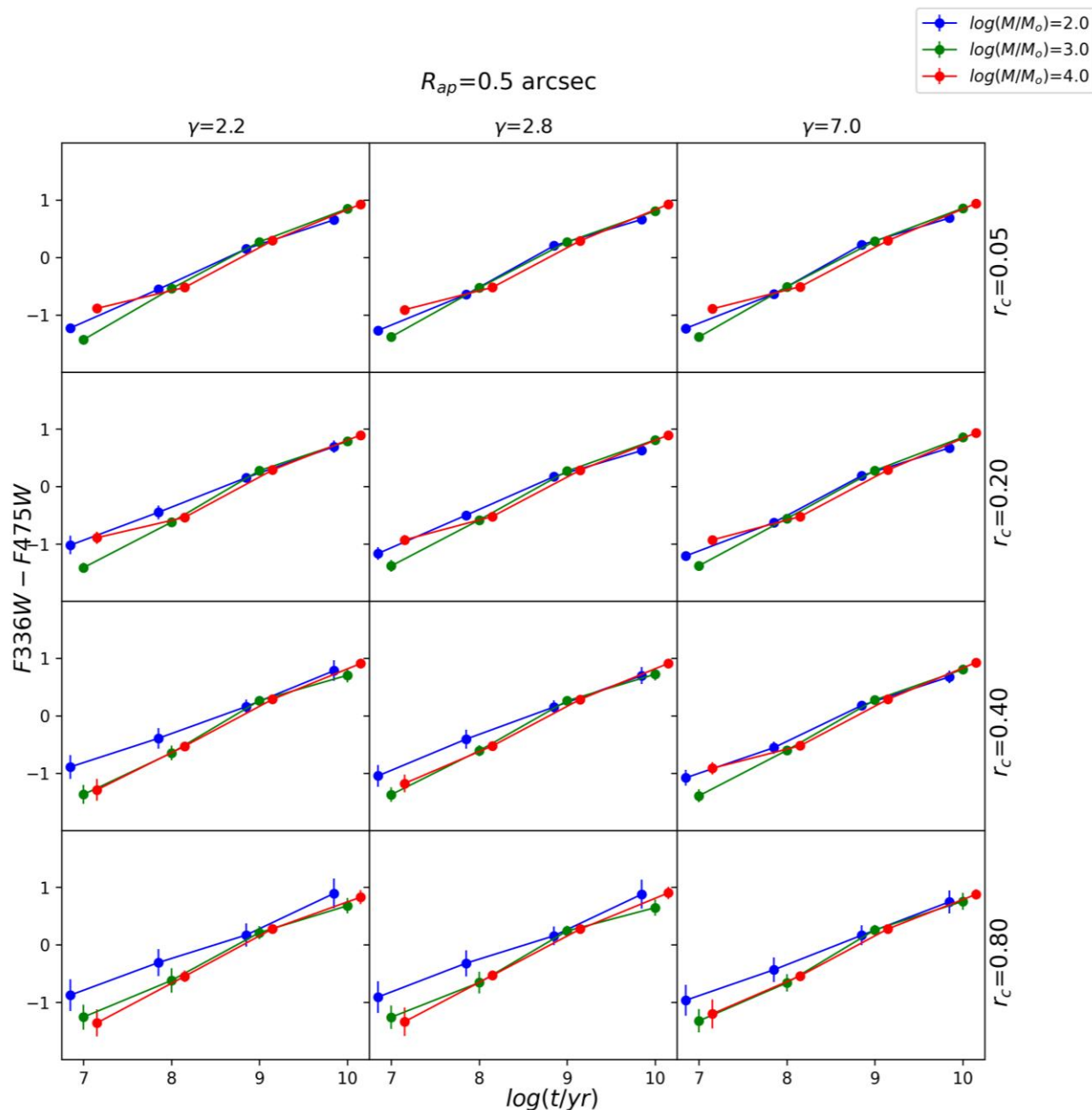
### 3.3. Stebėjimo krypties įtaka fotometriniams parametrams

Tam, kad būtų geriau suprastas ir įvertintas realiai matuojamų fotometrinių parametru tikslumas, būtina išsiaiškinti ir stebėjimo krypties atsitiktinumo sukeltus neapibrėžtumus. Tuo tikslu, kiekviename modelių tinklo mazge dirbtiniams spiečiams buvo pamatuota vidutinė spalvos rodiklių sklaida dėl spiečių projektavimo skirtingomis kryptimis. Vidutinė sklaida buvo suskaičiuota taip: kiekvienai generacijai atitinkamame tinklo mazge suskaičiuojamas standartinis CI nuokrypis imant 13 skirtingų stebėjimo kryptių matavimų rezultatus, ir tuomet paimtas visų

100 generacijų vidurkis. CI sklaida dėl stebėjimo krypties efektų pavaizduota 3.6 ir 3.7 pav. panašiu principu kaip ir generacijos efektų atveju (3.2, 3.3 pav.). Lyginant su generavimo efektais, vidutinė stebėjimo krypties įtaka fotometrinių parametrų matavimams žymiai mažesnė. Didelės koncentracijos spiečių atveju ( $r_c = 0.05 - 0.20 \text{ arcsec}$ ) ji apskritai reikšmingos įtakos neturi, tačiau mažesnės koncentracijos spiečiams ( $r_c = 0.40 - 0.80 \text{ arcsec}$ ) stebėjimo krypties efektas egzistuoja. Čia spalvos rodiklių sklaida vidutiniškai svyruoja dešimtųjų ryškio ribose. [Naujalis et al. \(2021\)](#) teigimu, jų tirtų PHAT apžvalgos spiečių imties atveju, sisteminės fotometrijos paklaidos patiems blausiausiems spiečiams siekia iki 0.05 ryškio, tad lyginant su šiais neapibrėžtumais, stebėjimo krypties efektai tokių spiečių atveju yra reikšmingi ir į juos būtina atsižvelgti atliekant spiečių fotometrinius matavimus. Reikia pastebėti, kad pati didžiausia sklaida sukeliama dėl stebėjimo krypties efektų yra jaunų (10–100 mln. m.) spiečių atveju. Patiems jauniausiems spiečiams efektų dydis panašus visoms tirtoms masėms. Tiesa masyvesnių ( $10^4 M_\odot$ ) spiečių atveju sklaida pereinant prie didesnių amžių reikšmingai sumažėja, tuo tarpu mažesnės masės spiečiams stebėjimo krypties įtaka išlieka daugmaž to paties lygmens. Stebėjimo krypties įtaka fotometriniams parametrų matavimams yra reikšminga mažiau koncentruotų spiečių atveju dėl to, kad juose yra didesnė tikimybė ryškiai (masyviai, evoliucionavusiai), didelę dalį spiečiaus šviesos generuojančiai žvaigždei būti toliau nuo spiečiaus centro. Stebint iš skirtingų kampų tą patį spiečių, ši žvaigždė (ar žvaigždės) gali projektuotis toliau ar arčiau nuo spiečiaus projekcinio centro – t. y. gali patekti arba nepatekti į matavimo apertūrą ir nuo to stipriai priklausys išmatuoti spiečiaus spalvos rodikliai. Žinoma, naudojant didesnio spindulio apertūrą didėja tikimybė išvengti šio efekto, tačiau kaip minėta anksčiau, mažos masės, jaunų spiečių atveju, kuriems ir stebimi didžiausi ryškių žvaigždžių erdvinio pasiskirstymo efektai, dažnai tenka naudoti mažas apertūras, kad fotometrija nebūtų sugadinta fono žvaigždžių. Taigi, atliekant mažos masės jaunų spiečių tyrimus, būtina atsižvelgti ir į stebėjimo krypties stochastiškumo sukeltus matuojamų fotometrinių parametrų neapibrėžtumus.

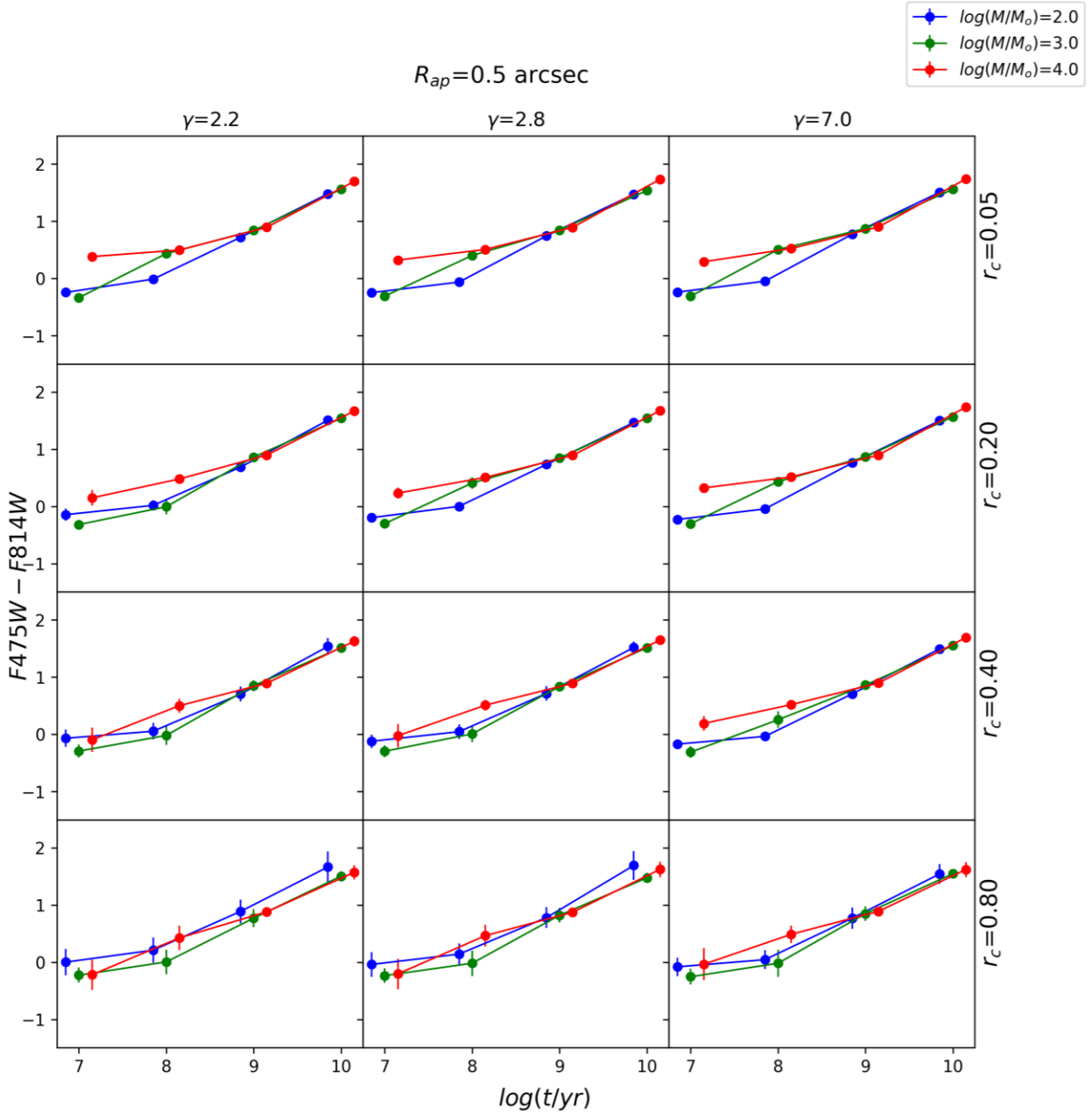
3.8 ir 3.9 pav. pavaizduota 10 mln. m. ir 100 mln. m. amžiaus skirtingų parametrų CCD, kuriose vienos iš generacijų atitinkame tinklo mazge visų 13 skirtingų stebėjimo krypties atveju gauti matavimai. Čia galima pastebėti, kad mažiau koncentruotų spiečių atveju, stebint tą patį spiečių iš skirtingo kampo, jo matavimai ir padėtis CCD gali skirtis – spalvos rodikliai gali skirtis daugiau nei ryškiumu. Tai dar kartą iliustruoja, jog dėl erdvinio ryškių žvaigždžių pasiskirstymo spiečiuje

stochastiškumo bei stebėjimo krypties atsitiktinumo, fotometriniai spiečių parametrai pasižymi dideliu neapibrėžtumu, kas savo ruožtu nulems spiečių fizinių parametų tikslumą.

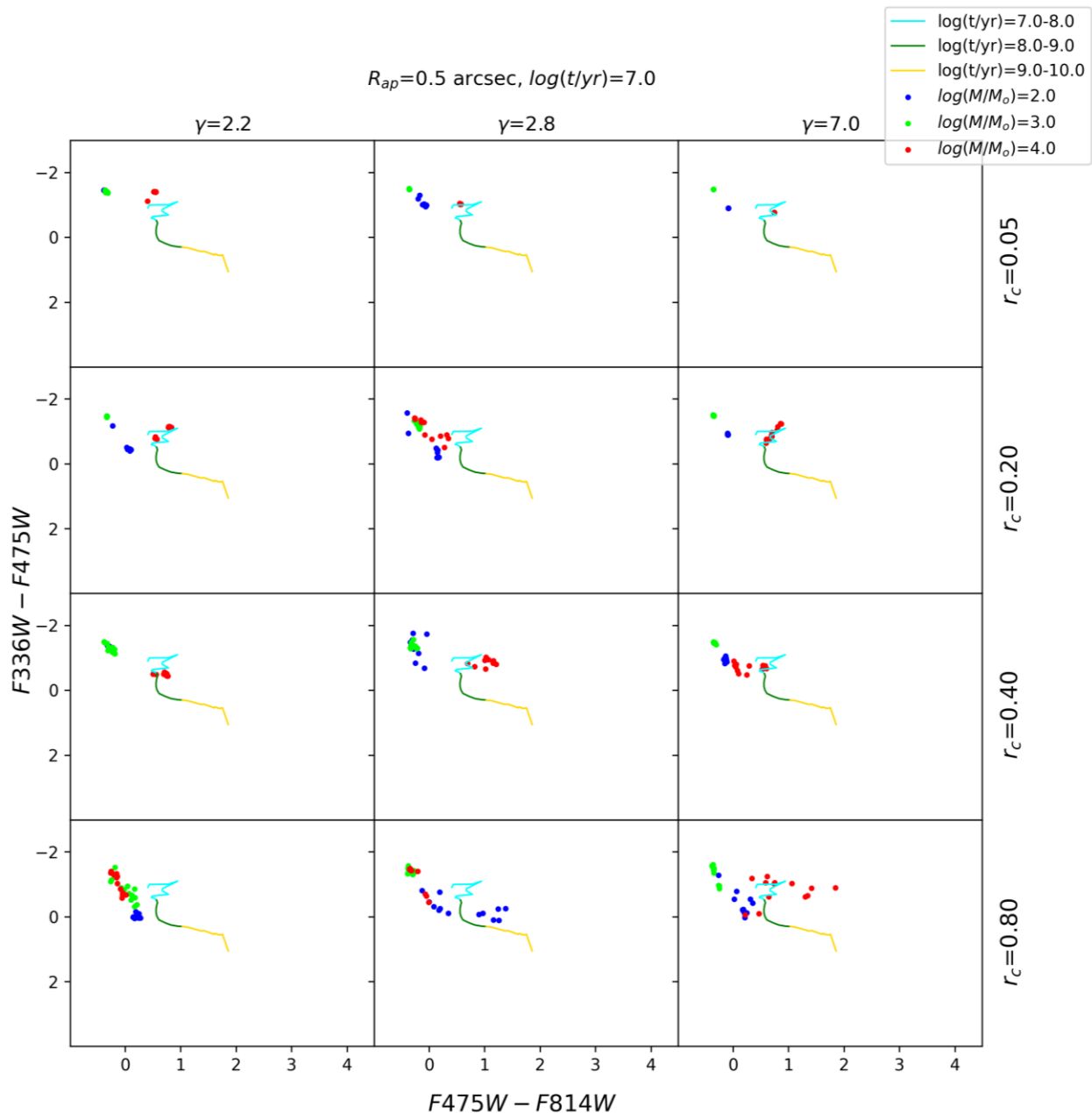


**3.6 pav.** Medianinės  $F336W - F475W$  spalvos rodiklio vertės bei stebėjimo krypties stochastinių efektų sukeltos vidutinės sklaidos (paklaidų „ūšai“) priklausomybė nuo evoliucinių ir geometrinių spiečių parametų. Matavimai gauti taikant  $R_{ap} = 0.5 \text{ arcsec}$  dydžio apertūrą.

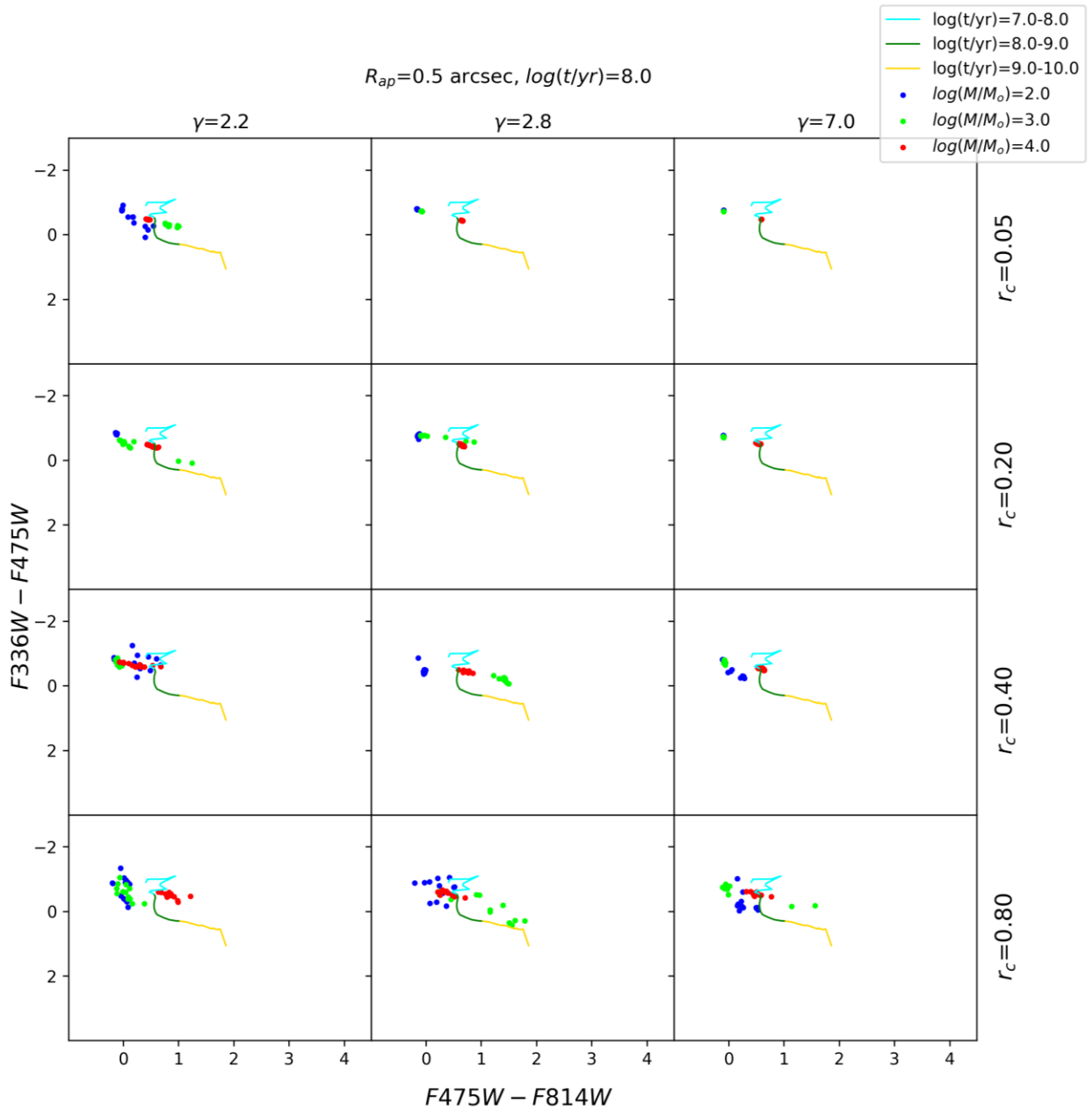




**3.7 pav.** Medianinės  $F475W - F814W$  spalvos rodiklio vertės bei stebėjimo krypties stochastinių efektų sukeltos vidutinės sklaidos (paklaidų „ūšai“) priklausomybė nuo evoliucinių ir geometrinių spiečių parametrų. Matavimai gauti taikant  $R_{ap} = 0.5 \text{ arcsec}$  dydžio apertūrą.



**3.8 pav.** Stebėjimo krypties atsitiktinumo efektų įtaka skirtingų spiečių dvispalvėms (CCD) diagramoms. Čia atitinkamuose modelių tinklo mazguose paimti vienos generacijos matavimai projektuojant spiečių iš visų 13 krypčių. Spalvota kreivė žymi PADOVA SSP modelius. Spiečių amžius – 10 mln. m., apertūros dydis –  $R_{ap} = 0.5 \text{ arcsec}$ . Analogiška diagrama, matuojant didesne apertūra, pateikta [2 Priede](#).

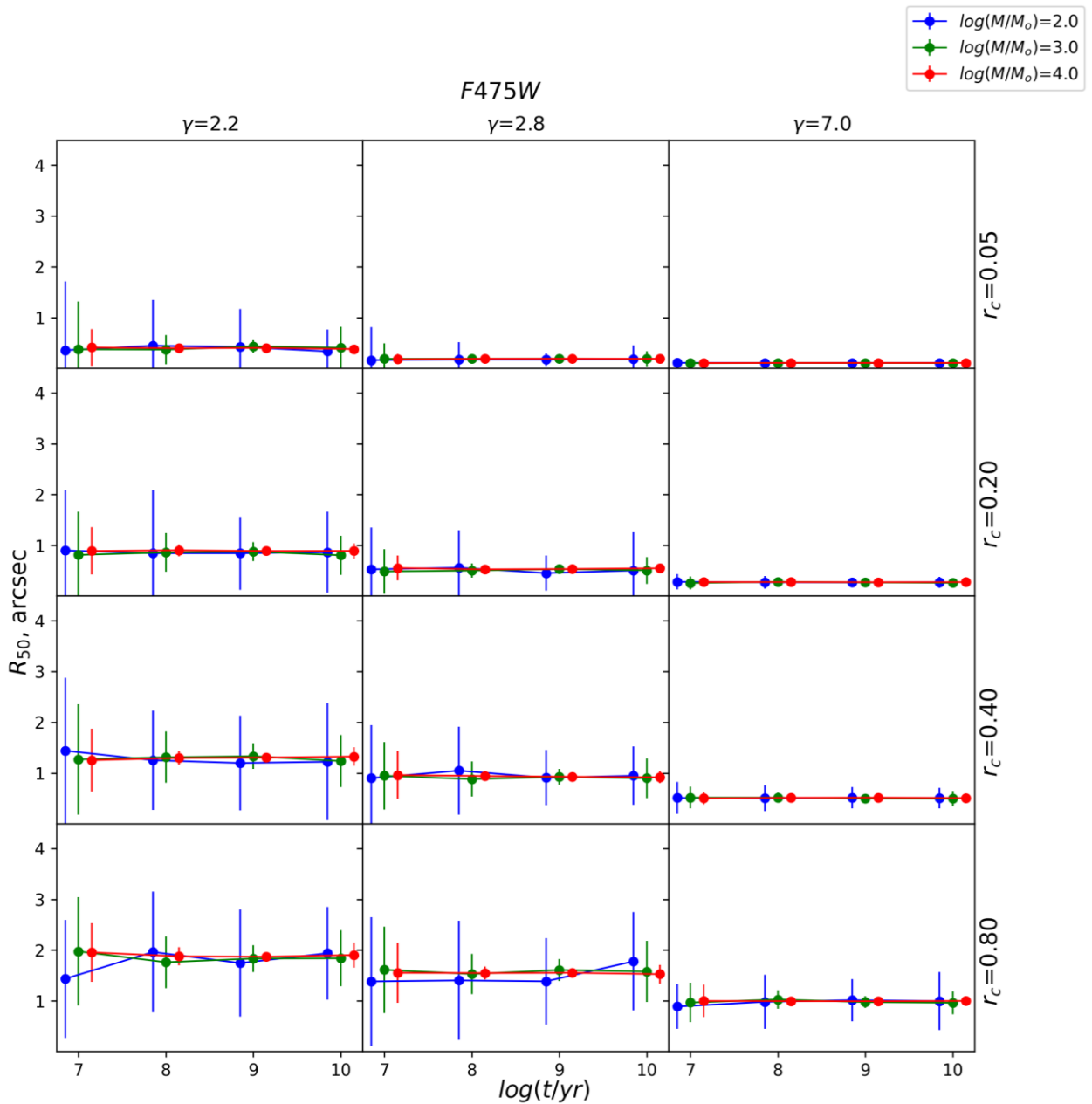


**3.9 pav.** Stebėjimo krypties efektų įtaka skirtingų parametrų spiečių dvispalvėms (CCD) diagramoms. Čia atitinkamuose modelių tinklo mazguose paimti vienos generacijos matavimai projektuojant spiečių iš visų 13 krypčių. Spalvota kreivė žymi PADOVA SSP modelius. Spiečių amžius – 100 mln. m., apertūros dydis –  $R_{ap} = 0.5 \text{ arcsec}$ . Analogiška diagrama, matuojant didesne apertūra, pateikta [2 Priede](#).

### 3.4. Generavimo stochastiškumo įtaka struktūriniam parametrams

Šiame poskyryje aptariama, kokius efektus skirtinga žvaigždžių IMF ir erdvinio žvaigždžių pasiskirstymo generacija gali sukelti spiečių struktūrinių parametru matavimams. 3.10 pav. pavaizduota kokia  $R_{50}$  (atitinka pusės šviesio spindulį) parametro sklaida pasižymi skirtingų geometrinių bei evoliucinių parametru spiečiai. Čia pateikti matavimo rezultatai *F475W* FJ, kitų filtrų analogiškos diagramos – [3 Priede](#). Iškart galima pastebėti, kad efektai nereikšmingi tik pačių kompaktiškiausių objektų atveju ( $r_c = 0.05 - 0.20 \text{ arcsec}$ ,  $\gamma > 3$ ). Tai galima paaiškinti, nes objektai praktiškai yra taškiniai šaltiniai (žr. [1 Priedą](#)), tad erdvinis žvaigždžių pasiskirstymas spiečiuje iš esmės radialiniam spiečiaus paviršinio šviesio profiliui įtakos neturi. Tačiau, kuo spiečius mažiau koncentruotas, tuo stipresni efektai stebimi. Didžiausia sklaida pasižymi patys jauniausi mažiausios masės spiečiai – čia  $R_{50}$  sklaida tam pačiam spiečiui gali siekti daugiau nei  $1 \text{ arcsec}$ , t. y. daugiau nei  $3.5 \text{ pc}$  M31 atstume.

Kadangi, kaip jau minėjome anksčiau, jauni spiečiai (10–100 mln. m.) gali turėti vieną ar kelias ryškias masyvias evoliucionavusias žvaigždes, kurios generuoja didžiąją dalį spiečiaus šviesos, tai jų erdvinis pasiskirstymas spiečiuje nulemia pusės paviršinio šviesio (ar kitą šviesio dalį ribojančio) spindulio dydį. Kadangi mažiau koncentruotų spiečių atveju tikimybė sugeneruoti žvaigždę toliau nuo spiečiaus centro yra didesnė, tai ir  $R_{50}$  vertės yra platesniame diapazone.  $10^3 - 10^4 M_{\odot}$  spiečiams būdingas R parametru sklaidos mažėjimas su spiečiaus amžiumi (iki ~1 mlrd. m.). Tą galima paaiškinti tuo, jog žvaigždžių IMF stochastiškumas laikui bėgant mažėja ir spiečiuose nebelieka žvaigždžių nustelbiančių kitų spiečiaus žvaigždžių šviesą bei atskirai sąlygojančių didelę įtaką spiečiaus radialiniam paviršinio šviesio profiliui. Sklaidos padidėjimą ties 10 mlrd. m. galima sieti su tuo, jog tokio amžiaus spiečiai generuoja gerokai mažiau šviesos ir negausi senų evoliucionavusių žvaigždžių populiaciją nulemia spiečiaus paviršinio šviesio pasiskirstymą, o nuo to priklauso nustatoma R parametru vertė. Lyginant skirtingų FJ duomenis, galima pastebėti, kad *F814W* juostos atveju stebima didžiausia sklaida, ypač jaunų spiečių atveju. Tokį efektą vėlgi galima sieti su masyviomis evoliucionavusiomis žvaigždėmis, kurios šioje juostoje skleidžia reikšmingą savo spinduliuotės dalį, kai tuo tarpu didžioji dalis ryškių MS žvaigždžių šioje spektro srityje spinduliuoja silpnai. Tad tokių spiečių radialinis paviršinio šviesio profilis šioje juostoje labai stipriai priklauso nuo šių trumpai gyvuojančių evoliucionavusių žvaigždžių skaičiaus.

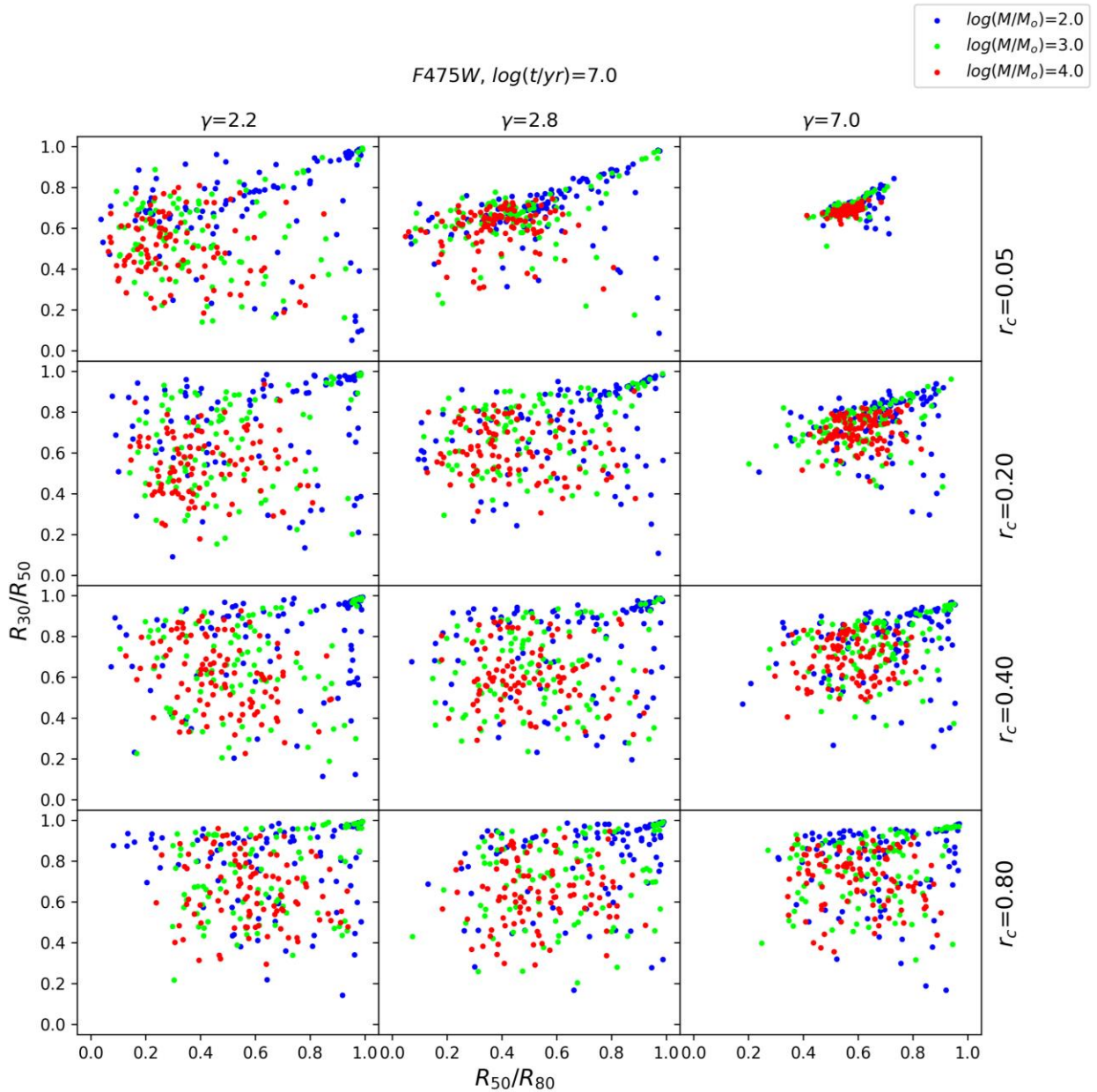


**3.10 pav.** Tipinės  $R_{50}$  vertės ir matavimų sklaidos, sukeltos generavimo stochastiškumo efektų, priklausomybė nuo spiečių evoliucinių ir geometrinių parametrų. Tipinės šio parametro vertės atitinkamuose modelių tinklo mazguose gautos apskaičiuotas medianą, į kurią įtraukiama po vieną kiekvienos generacijos modelį (vienos stebėjimo krypties matavimą). Sklaida apskaičiuota įvertinant šių 100 modelių matavimų standartinį nuokrypį. *F475W* FJ duomenys. Kitų juostų analogiški duomenys pateikti [3 Priede](#).

Stochastinių efektų įtaką spiečių struktūrinių parametrų matavimams taip pat galima įvertinti analizuojant R parametrų tarpusavio santykių diagramas. Dvi tokios diagramos, kur X ašyje santykis  $R_{50}/R_{80}$ , Y ašyje –  $R_{30}/R_{50}$  pavaizduotos 3.11 (spiečių amžius 10 mln. m.) ir 3.12 (100 mln. m.) paveiksluose, juose parodyti *F475W* juostos duomenys. Analogiškos diagramos su *F336W* FJ rezultatais pateiktos [3 Priede](#). Čia galima pastebėti, kad jauniausiems spiečiams R parametrų santykiai pasižymi dideliu neapibrėžtumu ir skirtingos tų pačių parametrų generacijos užima bene visą R parametrų santykių erdvę, nepriklausomai nuo modeliuojamos masės. Ties 10 mln. m. tik pačių kompaktiškiausių spiečių atveju galima pastebėti tam tikrą klasterizaciją, kad nepriklausomai nuo generacijos, objektai išsidėsto daugmaž toje pačioje parametrų erdvės vietoje – tą galima paaiškinti tuo, jog bene taškiniai šaltiniai ir jų radialinis profilis gerai sutampa su atitinkamos kameros PSF, tad erdvinis žvaigždžių pasiskirstymas tokiuose spiečiuose įtakos neturi. Taip pat galima pastebėti, jog dalis  $10^2 - 10^3 M_{\odot}$  spiečių generacijų R parametrų santykių erdvėje susitelkia ties [1.0; 1.0] tašku. Tai reiškia, kad iš esmės šių spiečių radialinį paviršinio šviesio profilį didžiąja dalimi nulemia vienos žvaigždės padėtis spiečiuje, nes skirtingą spiečiaus šviesio dalį ribojantys spinduliai yra praktiškai identiški.

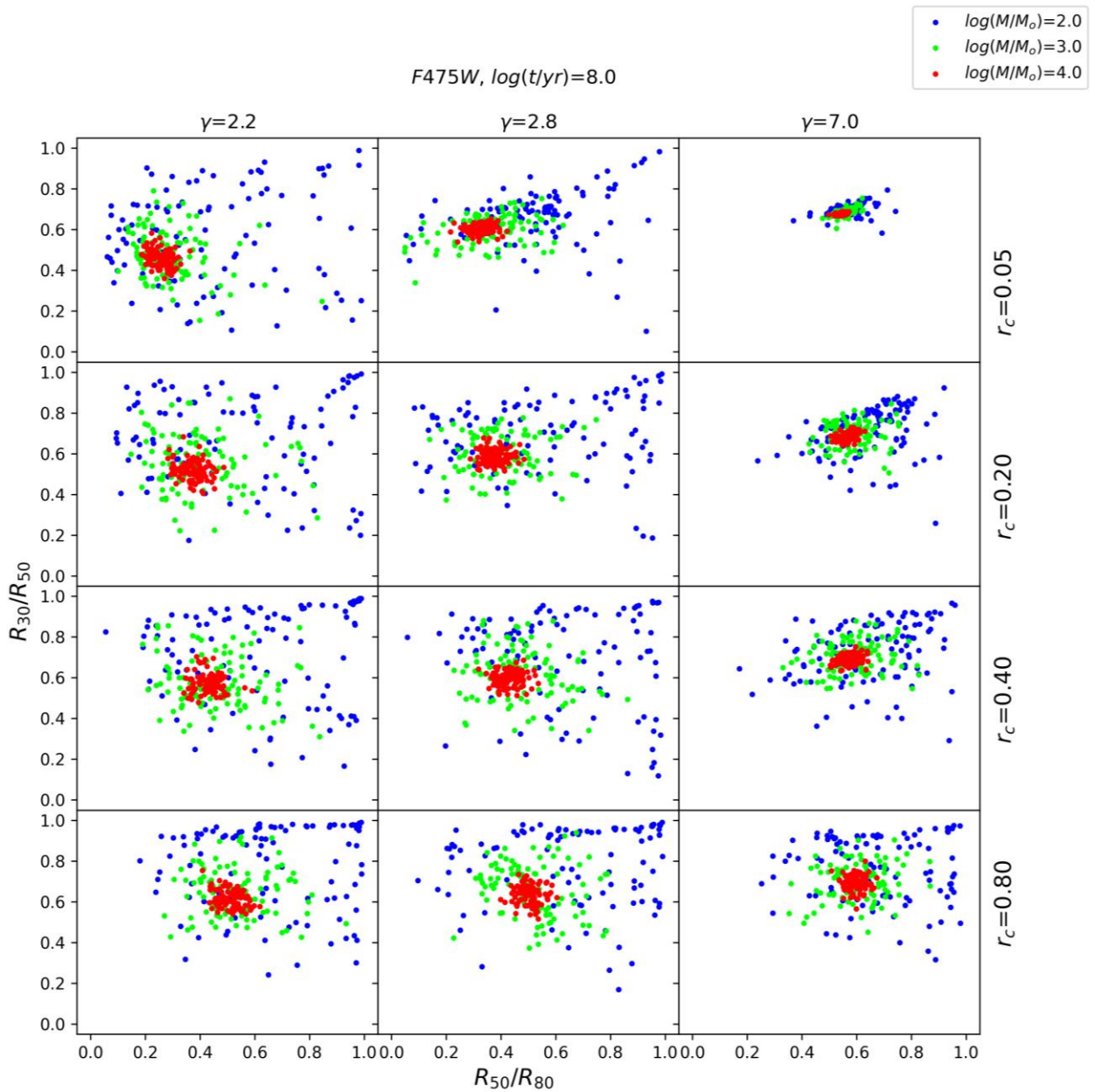
Perėjus prie 100 mln. m. metų spiečių, galima pastebėti, kad generacijų sklaida R parametrų santykių erdvėje stipriai sumažėja  $10^3 - 10^4 M_{\odot}$  masės spiečiams ir pastebima skirtingų generacijų klasterizacija ties tam tikra apibrėžta parametrų erdvės vieta, kurios centro padėtis priklauso nuo geometrinių spiečiaus parametrų  $\gamma$  ir  $r_c$ . Tuo tarpu mažiausios masės spiečiams sklaida išlieka pakankamai didelė ir dalis objektų vis dar yra susitelkę [1.0; 1.0] taško srityje. Taip pat galima pastebėti, jog tokia klasterizacija yra stipresnė *F336W* juostos duomenyse, kur net ir 10 mln. m. metų atveju, masyviausi čia tiriami dirbtiniai spiečiai demonstruoja reikšmingą klasterizaciją. Tai rodo, jog spiečiaus padėties tokioje parametrų erdvėje nustatymas, ypač naudojant mėlynos, UV spektro srities FJ, gali padėti geriau apibrėžti tiriamų spiečių struktūros ypatumus, bent jau  $10^3 - 10^4 M_{\odot}$ , 100 mln. m. – 1 mlrd. m. spiečiams.

Bendrai paėmus, tokie rezultatai rodo, jog stochastiniai ryškių žvaigždžių ir jų erdvinio pasiskirstymo spiečiuje efektai nulemia, kad mažos masės ( $10^2 - 10^3 M_{\odot}$ ) jaunų spiečių (~10 mln. m.) struktūrinių parametrų matavimai pasižymi labai dideliu neapibrėžtumu ir tiksliai apibūdinti jų struktūrą remiantis apertūrinės fotometrijos matavimais sunku, nes tokių objektų radialinį paviršinio šviesio profilį dažnu atveju gali nulemti vos viena žvaigždė ir jos erdvinė padėtis spiečiuje.



**3.11 pav.** Skirtingos tų pačių parametų spiečiaus generacijos R parametų santykių erdvėje. *F475W* FJ matavimų duomenys. Spiečių amžius – 10 mln. m. Analogiška diagrama su *F336W* duomenimis – [3 Priede](#).





**3.12 pav.** Skirtingos tų pačių parametų spiečiaus generacijos R parametų santykių erdvėje. *F475W* FJ matavimų duomenys. Spiečių amžius – 100 mln. m. Analogiška diagrama su *F336W* duomenimis – [3 Priede.](#)



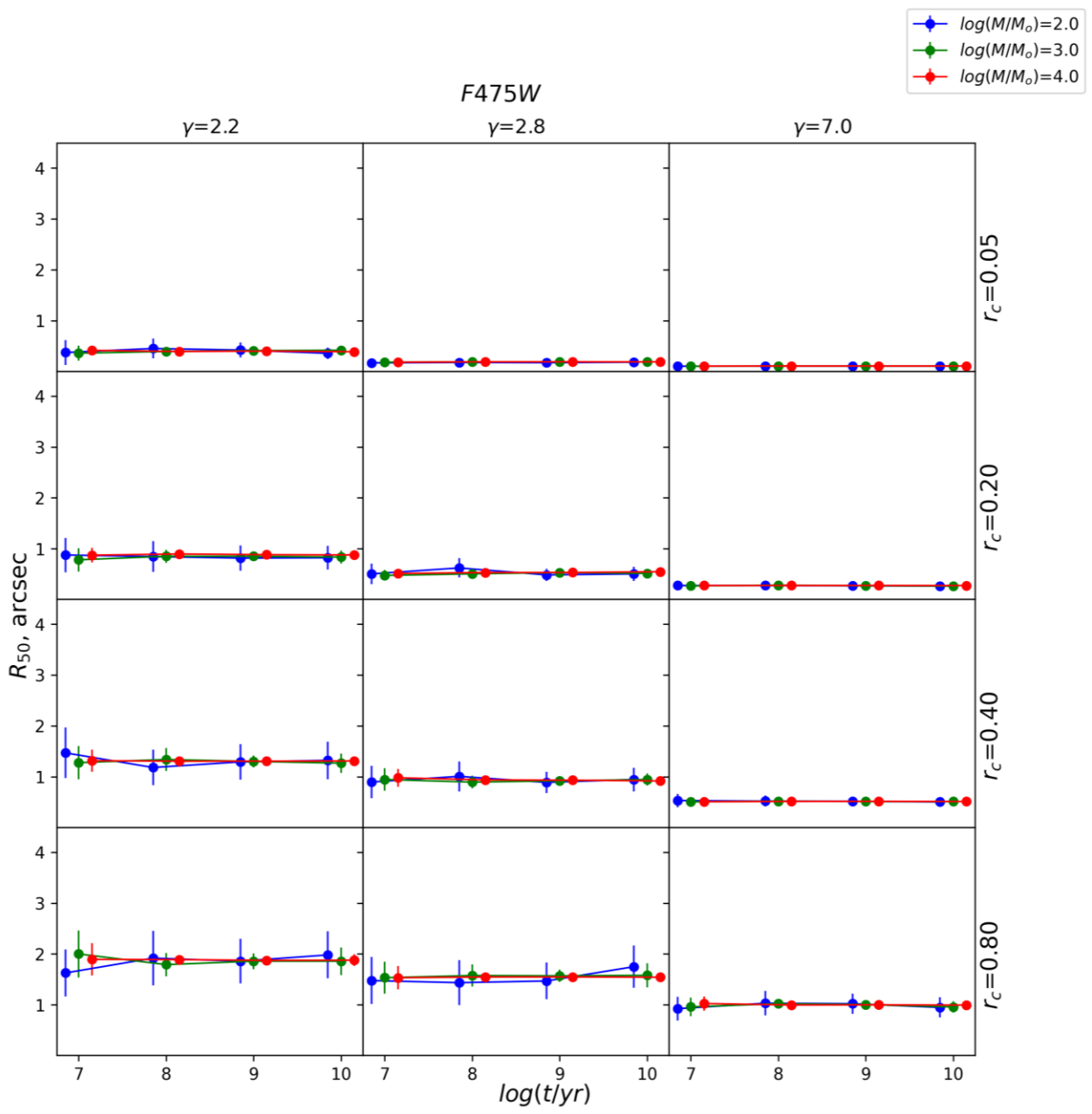
### 3.5. Stebėjimo krypties įtaka struktūriniais parametrams

Taip pat būtina įvertinti ir tai, kokie efektai struktūrinių parametrų matavimams pasireiškia tuos pačius spiečius stebint iš skirtingų krypčių. Kaip parodė 3.4. poskyryje aptarti rezultatai, pavienių ryškių žvaigždžių erdvinis pasiskirstymas spiečiuje turi labai didelę įtaką spiečių radialiniams paviršinio šviesio profiliams ir struktūrą nusakantiems parametrams. Tad tikėtina, jog stebint tuos pačius spiečius skirtingomis kryptimis, šios žvaigždės gali projektuotis skirtingais atstumais nuo spiečiaus centro ir nustatomi jų struktūriniai parametrai taip pat gali stipriai skirtis.

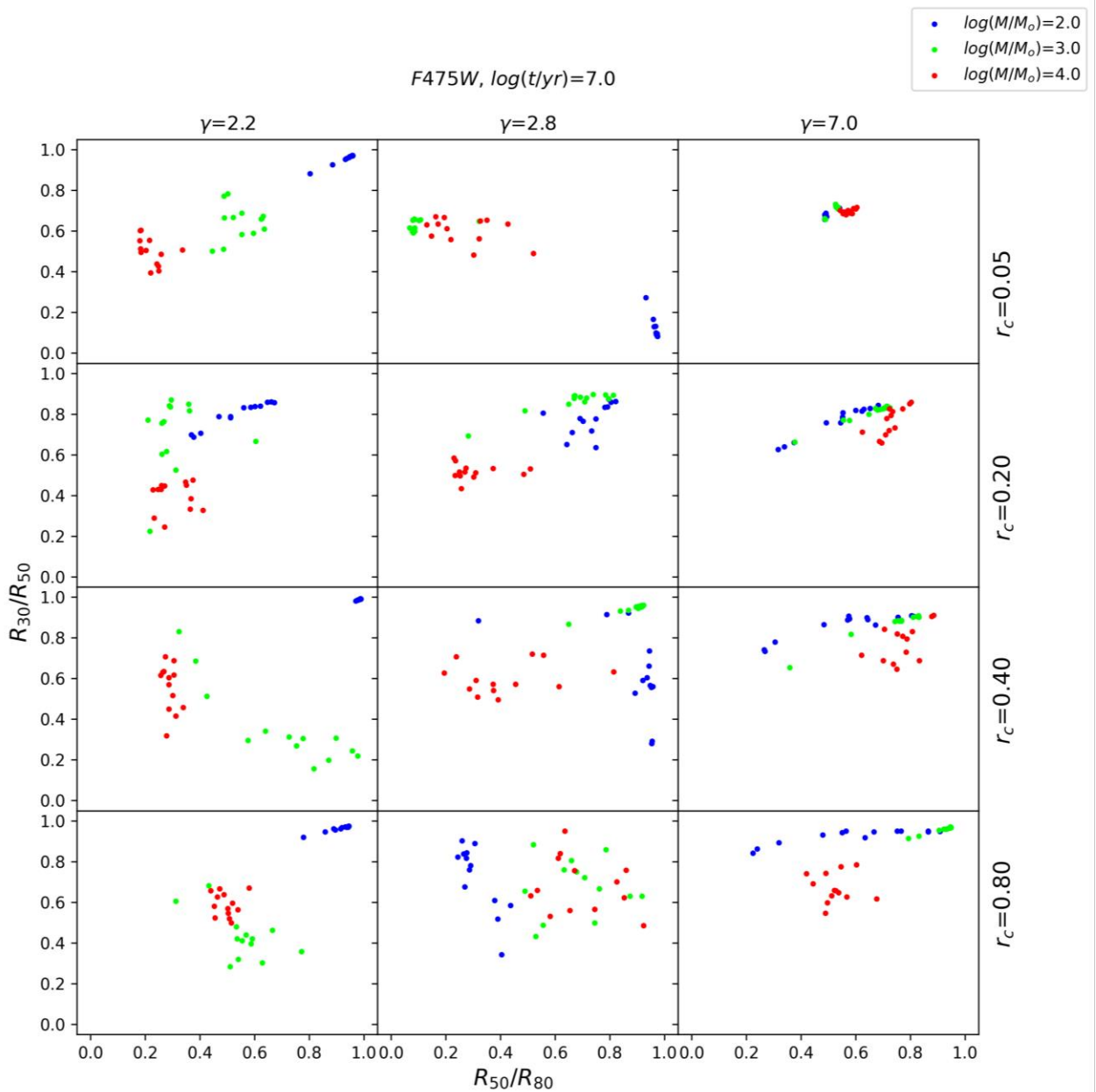
3.13 pav. pavaizduota tipinė  $R_{50}$  vertė atitinkamame modelių tinklo mazge, apskaičiuota pagal visus 1300 modelių jame, paklaidų „ūšai“ atitinka vidutinę šio parametro sklaidą dėl stebėjimo krypties efektų, čia pateikti *F475W* juostos duomenys. Vėlgi, kompaktiškiausiems objektams ( $r_c = 0.05 - 0.20 \text{ arcsec}, \gamma = 7.0$ ) stebėjimo kryptis įtakos neturi, kadangi nepriklausomai nuo to, koku kampu stebi, taškinio šaltinio kuriamas radialinis profilis praktiškai toks pat. Tačiau, mažiau koncentruotų spiečių atveju pasireiškia reikšminga sklaidą dėl matavimų rezultatų skirtumų stebint tą patį spiečių iš skirtingų krypčių. Mažiausios masės spiečiai pasižymi didžiausia sklaida ir efektas išlieka panašus visame amžių intervale. Masyvesniems spiečiams stipriausias efektas stebimas ties 10 mln. m., vėlesniuose amžiuose sklaida dėl stebėjimo krypties mažėja. Bendrai paėmus,  $R_{50}$  matavimų neapibrėžtumas dėl stebėjimo krypties atsitiktinumo svyruoja kelių dešimtųjų *arcsec* ribose, o gali siekti net apie  $0.5 \text{ arcsec}$ , kas Andromedos galaktikos atstume atitinka  $\sim 1.8 \text{ pc}$ . Tad stebėjimo kampo atsitiktinumas gali daryti reikšmingą įtaką spiečių dydžių matavimams, ypač ankstyvose spiečių evoliucinėse stadijose ( $\sim 10-100$  mln. m.). To priežastis – ryškių žvaigždžių erdvinio pasiskirstymo stochastiškas pobūdis, ypač padrikesniems objektams: didelę dalį spiečiaus šviesos srauto generuojanti žvaigždė, stebint iš skirtingų krypčių, gali projektuotis skirtingais atstumais nuo spiečiaus centro ir radialinis paviršinio šviesio spiečiaus profilis skirsis.

Erdvinio ryškių žvaigždžių pasiskirstymo stochastiškumo įtaką radialiniam spiečiaus profiliui stebint tą patį objektą skirtingomis kryptimis galima įvertinti pagal  $R$  parametrų santykių diagramas. 3.14 ir 3.15 pav. diagramose pateikta po 13 tos pačios generacijos tam tikrame modelių tinklo mazge matavimų iš skirtingų stebėjimo krypčių. Čia galima pastebėti, jog daliai jaunų spiečių būdinga gana didelė  $R$  parametrų santykių sklaida stebint tą patį spiečių iš skirtingų krypčių, o tai reiškia, kad tas pats spiečius gali pasižymėti drastiškai skirtingu radialiniu profilu. Tuo tarpu, kai kurių iš jų (ypač  $10^2 M_{\odot}$  atveju) matavimai susitelkia ties  $[1.0, 1.0]$  tašku arba kuriam nors vienam santykiui būdinga vertė  $\sim 1.0$ . Tai rodo, kaip jau minėta, kad pavienė ryški

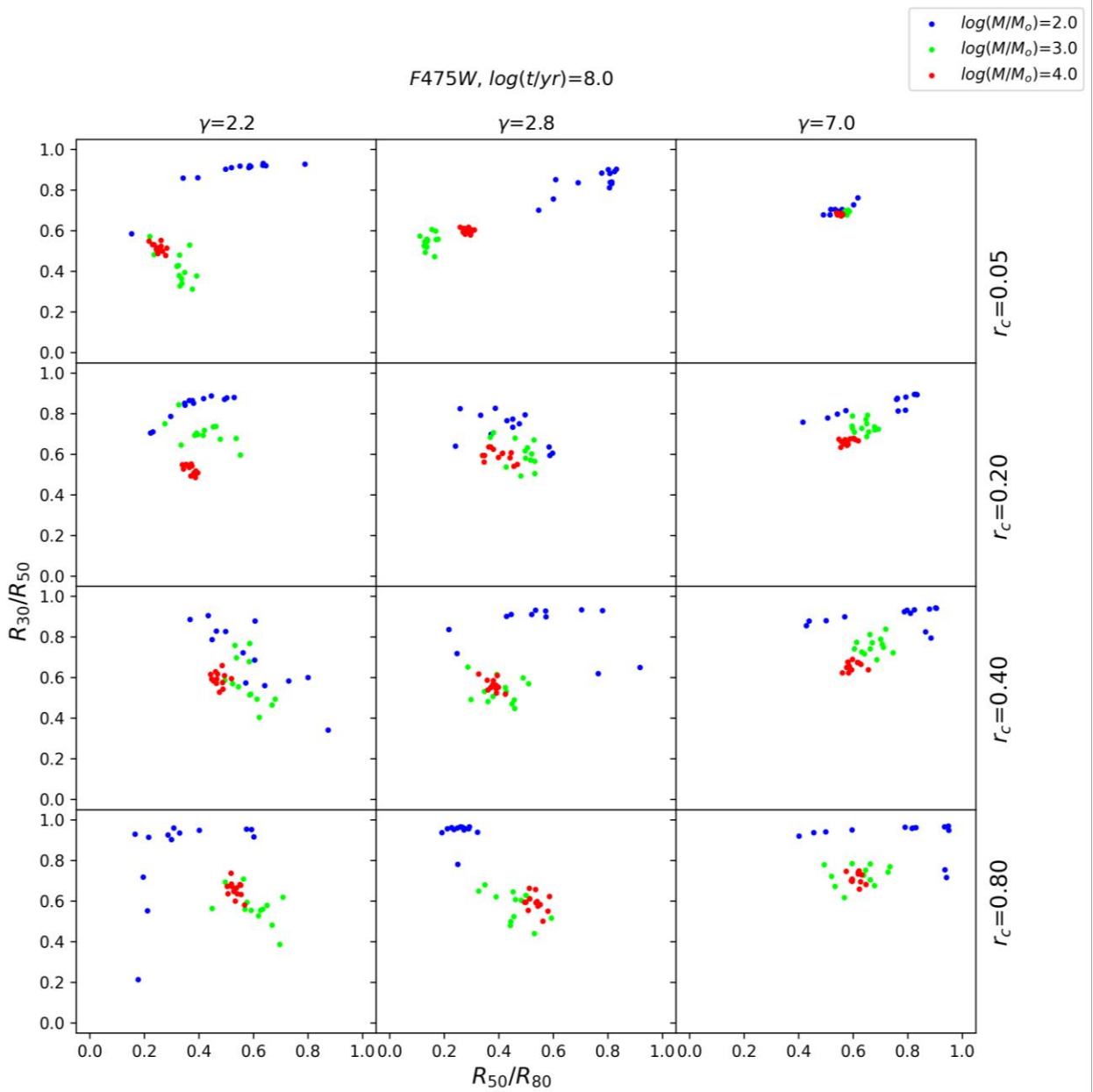
žvaigždė ir jos padėtis spiečiuje iš principo nulemia bendrą objekto radialinį paviršinio šviesio profilį ir matuojamus struktūrinius parametrus. Bendrai paėmus, tokie rezultatai rodo, kad atliekant mažos/vidutinės masės jaunų spiečių struktūros tyrimus, būtina atsižvelgti ir į stebėjimo krypties neapibrėžtumo įtaką matavimų tikslumui.



**3.13 pav.** Tipinės  $R_{50}$  vertės ir matavimų vidutinės sklaidos, sukeltos skirtingos stebėjimo krypties efektų, priklausomybė nuo spiečių evoliucinių ir geometrinių parametrų. Tipinės šio parametro vertės atitinkamuose modelių tinklo mazguose gautos apskaičiuotas medianą, į kurią įtraukiami visi 1300 modeliai tame mazge. Sklaida apskaičiuota įvertinant parametro standartinį nuokrypį visoms 100 generacijų atskirai ir tuomet apskaičiuotas vidurkis. *F475W* FJ duomenys.



**3.14 pav.** Stebėjimo krypties įtaka R parametų santykiams. Čia kiekviename modelių tinklo mazge parodyta po vieną spiečiaus generaciją atliekant matavimus iš 13 skirtingų stebėjimo krypčių. *F475W* FJ duomenys. Spiečių amžius – 10 mln. m. Analogiška diagrama kitai generacijai – [3 Priede](#).



**3.15 pav.** Tas pats kaip ir 3.14 pav., tik čia spiečių amžius – 100 mln. m. Analogiška diagrama kitai generacijai – [3 Priede](#).

## Išvados

Šiame darbe buvo panaudotas mokslo tiriamųjų darbų II/III ir III/III metu kurtas bei tobulintas dirbtinių 3D žvaigždžių spiečių ir jų vaizdų modeliavimo algoritmas. Buvo sugeneruotas platus modelių tinklas, dengiantis realių M31 galaktikoje stebimų spiečių parametrų ribas. Penkiuose šimtuose tinklo mazgų sugeneruota po 100 individualių dirbtinių spiečių, kurių kiekvieno vaizdai modeliuoti 3 fotometriniuose juostose, kad atitiktų M31 PHAT apžvalgos stebėjimus, ir suprojektuoti į 2D vaizdus žiūrint iš 13 skirtingų kryptų. Šiems modeliams atlikta apertūrinė fotometrija, išmatuotos augimo kreivės, nustatyti dirbtinių spiečių ryškiai bei spalvos rodikliai naudojant skirtingo dydžio apertūras, nustatyti skirtingas pilnutinio šviesio dalis ribojantys spinduliai. Remiantis šiais matavimais, ištirti ryškių žvaigždžių erdvinio pasiskirstymo spiečiuose stochastiniai efektai spiečių fotometriniais bei struktūriniais parametrams.

Nustatyta, kad tų pačių evoliucinių (masė, amžius) bei geometrinių ( $r_c, \gamma$ ) parametrų jauni (10–100 mln. m.) mažos masės ( $10^2 - 10^4 M_\odot$ ) spiečiai dėl žvaigždžių sukeliamų stochastinių efektų pasižymi labai didele spalvos rodiklių sklaida. Tai savo ruožtu gali nulemti, kad naudojant integralinės fotometrijos rezultatus, spiečių fiziniai parametrai bus nustatomi netiksliai. Taip pat įvertinta, kad stebint tą patį spiečių iš skirtingų kryptų, spalvos rodiklių sklaida dėl žvaigždžių erdvinio pasiskirstymo stochastiškumo jauniems mažos masės spiečiams gali siekti iki kelių dešimtųjų ryškio, o tai viršija statistines fotometrinių matavimų paklaidas. Todėl atliekant fotometrinius spiečių matavimus, būtina atsižvelgti ir į stebėjimo krypties neapibrėžtumo efektus.

Taip pat ištirta, kad dėl ryškių žvaigždžių ir jų erdvinio pasiskirstymo stochastiško pobūdžio, jauniems mažos masės spiečiams nustatomi struktūriniai parametrai pasižymi labai dideliu neapibrėžtumu – PHAT apžvalgos kontekste tų pačių evoliucinių ir geometrinių parametrų spiečiui pusės šviesio spindulio sklaida gali siekti net  $\sim 1 \text{ arcsec}$ , kas M31 atstume atitinka  $> 3.5 \text{ pc}$ . Pastebėta, jog dalies  $10^2 - 10^3 M_\odot$  spiečių radialinius paviršinio šviesio profilius gali nulemti viena ar kelios ryškios žvaigždės. Stebint tą patį spiečių skirtingais kampais, jo radialinis profilis gali stipriai skirtis, o nustatomo spiečiaus dydžio sklaida jauniausių spiečių atveju gali siekti net  $\sim 0.5 \text{ arcsec}$ , kas Andromedos galaktikos atstume atitinka  $\sim 1.8 \text{ pc}$ .

## Literatūros sąrašas

- Aarseth S. J., Henon M., Wielen R., A Comparison of Numerical Methods for the Study of Star Cluster Dynamics, *Astronomy & Astrophysics*, 37, 183 (5 pp), 1974.
- Bastian N., Adamo A., Gieles M. et al., Stellar clusters in M83: formation, evolution, disruption and influence of the environment, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 419, 2606 (pp 17), 2012.
- Bastian N., Gieles M., Lamers H. J. G. L. M. et al., The star cluster population of M 51. II. Age distribution and relations among derived parameters, *Astronomy & Astrophysics*, 431, 905 (20 pp), 2005.
- Bialopetravičius J., Narbutis D., Vansevicius V., Deriving star cluster parameters with convolutional neural networks. I. Age, mass, and size, *Astronomy & Astrophysics*, 621, A103 (10 pp), 2019.
- Bialopetravičius J., Narbutis D., Study of Star Clusters in the M83 Galaxy with a Convolutional Neural Network, *The Astronomical Journal*, 160, 264 (11 pp), 2020.
- Bressan A., Marigo P., Girardi L. et al., PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427, 127 (19 pp), 2012.
- Bridžius A., Narbutis D., Stonkutė R. et al., Accuracy of Star Cluster Parameters from Integrated UBVRIJHK Photometry, *Baltic Astronomy*, 17, 337 (13 pp), 2008.
- Brown G., Gnedin O. Y., Radii of young star clusters in nearby galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 508, 5935 (19 pp), 2021.
- Clark J. S., Negueruela I., Crowther P. A., Goodwin S.P., On the massive stellar population of the super star cluster Westerlund 1, *Astronomy & Astrophysics*, 434, 949 (21 pp), 2005.
- Crowther P. A., Caballero-Nieves S. M., Bostroem K. A. et al., The R136 star cluster dissected with Hubble Space Telescope/STIS. I. Far-ultraviolet spectroscopic census and the origin of He II  $\lambda 1640$  in young star clusters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 458, 624 (26 pp), 2016.
- Daugevičius K. 2021, magistro studijų mokslo tiriamasis darbas II/III, VU.
- Daugevičius K. 2022, magistro studijų mokslo tiriamasis darbas III/III, VU.
- Deveikis V., Narbutis D., Stonkutė R. et al., Simclust – a Program to Simulate Star Clusters, *Baltic Astronomy*, 17, 351 (11 pp), 2008.
- Elson R. A. W., Fall S. M., Freeman K. C., The Structure of Young Star Clusters in the Large Magellanic Cloud, *Astrophysical Journal*, 323, 54 (25 pp), 1987.
- Fioc M., Rocca-Volmerange B., PEGASE: a UV to NIR spectral evolution model of galaxies. Application to the calibration of bright galaxy counts, *Astronomy & Astrophysics*, 326, 950 (14 pp), 1997.
- Fouesneau M., Johnson L. C., Weisz D. R. et al., The Panchromatic Hubble Andromeda Treasury. V. Ages and Masses of the Year 1 Stellar Clusters, *The Astrophysical Journal*, 786, 117 (17 pp), 2014.
- Glatt K., Grebel E. K., Sabbi E. et al., Age Determination of Six Intermediate-Age Small Magellanic Cloud Star Clusters with HST/ACS, *The Astronomical Journal*, 136, 1703 (25 pp), 2008.
- Grudić M. Y., Hopkins P. F., Faucher-Giguère C.-A. et al., When feedback fails: the scaling and saturation of star formation efficiency, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475, 3511 (18), 2018a.
- Grudić M. Y., Guszejnov D., Hopkins P. F. et al., From the top down and back up again: star cluster structure from hierarchical star formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 481, 688 (15 pp), 2018b.

- Johnson L. C., Seth A. C., Dalcanton J. J. et al., Panchromatic Hubble Andromeda Treasury. XVI. Star Cluster Formation Efficiency and the Clustered Fraction of Young Stars, *The Astrophysical Journal*, 827, 33 (24 pp), 2016.
- King I., The structure of star clusters. I. An empirical density law, *Astronomical Journal*, 67, 471 (15 pp), 1962.
- King I., The structure of star clusters. III. Some simple dynamical models, *Astronomical Journal*, 71, 64 (12 pp), 1966.
- Kroupa P., On the variation of the initial mass function, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 322, 231 (16 pp), 2001.
- Krumholz M. R., Fumagalli M., da Silva R. L. et al., SLUG – stochastically lighting up galaxies – III. A suite of tools for simulated photometry, spectroscopy, and Bayesian inference with stochastic stellar populations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452, 1447 (24 pp), 2015.
- Krumholz M. R., McKee C. F., Bland-Hawthorn J., Star Clusters Across Cosmic Time, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 57, 227 (pp 76), 2019.
- Lada C. J., Lada E. A., Embedded Clusters in Molecular Clouds, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 41, 57 (73 pp), 2003.
- Larsen S. S., The structure and environment of young stellar clusters in spiral galaxies, *Astronomy & Astrophysics*, 416, 537 (17 pp), 2004.
- Larsen S. S., an ISHAPE User’s guide (pp 14), 2006.
- Leitherer C., Schaerer D., Goldader J. D. et al., Starburst99: Synthesis Models for Galaxies with Active Star Formation, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 123, 3 (38 pp), 1999.
- Mackey A. D., Gilmore G. F., Surface brightness profiles and structural parameters for 53 rich stellar clusters in the Large Magellanic Cloud, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, 338, 85 (35 pp), 2003a.
- Mackey A. D., Gilmore G. F., Surface brightness profiles and structural parameters for 10 rich stellar clusters in the Small Magellanic Cloud, *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, 338, 120 (11 pp), 2003b.
- McConnachie A. W., Irwin M. J., Ferguson A. M. N. et al., Distances and metallicities for 17 Local Group galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 356, 979 (19), 2005.
- de Meulenaer P., Narbutis D., Mineikis T., Vansėvičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters. I. Age, mass, and extinction degeneracies, *Astronomy & Astrophysics*, 550, A20 (10 pp), 2013.
- de Meulenaer P., Narbutis D., Mineikis T., Vansėvičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters. II. The degeneracies of age, mass, extinction, and metallicity, *Astronomy & Astrophysics*, 569, A4 (7 pp), 2014.
- de Meulenaer P., Narbutis D., Mineikis T., Vansėvičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters. III. Application to M 31 PHAT clusters, *Astronomy & Astrophysics*, 574, A66 (8 pp), 2015a.
- de Meulenaer P., Narbutis D., Mineikis T., Vansėvičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters. IV. The M 33 star cluster system, *Astronomy & Astrophysics*, 581, A111 (13 pp), 2015b.
- de Meulenaer P., Stonkutė R., Vansėvičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters. V. M 31 PHAT star clusters, *Astronomy & Astrophysics*, 602, A112 (8 pp), 2017.
- Mora M. D., Larsen S. S., Kissler-Patig M. et al., Imaging of star clusters in unperturbed spiral galaxies with the Advanced Camera for Surveys. II. A comparison of star cluster systems in five late type spirals, *Astronomy & Astrophysics*, 501, 949 (pp 16), 2009.
- Narbutis D., Semionov D., Stonkutė R. et al., Deriving structural parameters of semi-resolved star clusters. FitClust: a program for crowded fields, *Astronomy & Astrophysics*, 569, A30 (10 pp), 2014.
- Naujalis R., Stonkutė R., Vansėvičius V., Deriving physical parameters of unresolved star clusters. VI. Adaptive aperture photometry of the M31 PHAT star clusters, *Astronomy & Astrophysics*, 654, A6 (10 pp), 2021.

- Portegies Zwart S. F., McMillan S. L. W., Gieles M., Young Massive Star Clusters, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 48, 431 (88 pp), 2010.
- Robitaille T., Bressert E., APLpy: Astronomical Plotting Library in Python, *Astrophysics Source Code Library*:1208.017, 2012.
- Ryon J. E., Bastian N., Adamo A. et al., Sizes and shapes of young star cluster light profiles in M83, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 452, 525 (15 pp), 2015.
- Ryon J. E., Gallagher J. S., Smith L. J. et al., Effective Radii of Young, Massive Star Clusters in Two LEGUS Galaxies, *The Astrophysical Journal*, 841, 92 (16 pp), 2017.
- San Roman I., Sarajedini A., Holtzmann J. A., Garnett D. R., Newly identified star clusters in M33 – III. Structural parameters, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426, 2427 (14 pp), 2012.
- Vansevičius V., Kodaira K., Narbutis D. et al., Compact Star Clusters in the M31 Disk, *The Astrophysical Journal*, 703, 1872 (12 pp), 2009.



# Žvaigždžių spiečių struktūrinių parametru stochastiškumas

## Santrauka

Šiame darbe pristatomas sukurtas 3D žvaigždžių spiečių ir jų vaizdų modeliavimo algoritmas. Sugeneruotas modelių tinklas parametru erdvėje apima PHAT apžvalgoje stebėtus M31 galaktikos spiečius. Iš viso sugeneruota 50000 3D dirbtinių spiečių, jų vaizdai modeliuoti 3 skirtingose fotometriniuose juostose, imituojant stebėjimą iš 13 skirtingų krypčių. Sumodeliuotiems spiečių vaizdams atlikta apertūrinė fotometrija ir pamatuotos augimo kreivės. Remiantis šiais matavimais, įvertinta žvaigždžių sukeliamų stochastinių efektų įtaka spiečių fotometriniams ir struktūriniams parametrams.

**Darbo tikslas** – ištirti žvaigždžių spiečių struktūrinių ir fotometrinių parametru stochastiškumą.

### Pagrindiniai uždaviniai:

- Sukurti 3D žvaigždžių spiečių ir jų vaizdų, atitinkančių realius PHAT apžvalgoje stebimus Andromedos galaktikos (M31) spiečius, modeliavimo algoritmą bei programas.
- Nustatyti ryškių žvaigždžių ir jų erdvinio pasiskirstymo spiečiuose stochastiškumo įtaką žvaigždžių spiečių struktūrinių ir fotometrinių parametru tikslumui.

### Pagrindinės išvados:

1. Nustatyta, kad jauni (10–100 mln. m.) mažos masės ( $10^2 - 10^4 M_{\odot}$ ) spiečiai dėl žvaigždžių sukeliamų stochastinių efektų pasižymi net kelis ryškius siekiančia spalvos rodiklių verčių sklaida, o tai gali nulemti, kad spiečių fiziniai parametrai bus nustatyti netiksliai.
2. Įvertinta, spalvos rodiklių sklaida dėl stebėjimo krypties efektų mažos masės spiečiams gali siekti iki kelių dešimtųjų ryškio, o tai viršija statistines fotometrinių matavimų paklaidas.
3. Dėl ryškių žvaigždžių erdvinio pasiskirstymo stochastiškumo, jauni mažos masės spiečiai pasižymi labai dideliu struktūrinių parametru neapibrėžtumu. PHAT apžvalgos kontekste, generavimo efektų sukeliama  $r_h$  sklaida gali siekti  $> 3.5 pc$ .
4. Pastebėta, jog dalies  $10^2 - 10^3 M_{\odot}$  spiečių radialinius paviršinio šviesio profilius gali nulemti viena ar kelios ryškios žvaigždės.
5. Stebint tą patį spiečių skirtingais kampais, jo radialinis paviršinio šviesio profilis gali stipriai skirtis, o spiečiaus dydžio sklaida jauniausių spiečių atveju gali siekti net  $\sim 1.8 pc$ .

# Stochasticity of Star Cluster Structural Parameters

## Summary

In this study we present algorithm for modelling 3D star clusters and their images. Grid of models which in parameter space covers M31 clusters observed in PHAT survey was generated. In total, 50000 artificial 3D star clusters were generated, their images were simulated in 3 photometric passbands, projecting into 2D from 13 different directions. Aperture photometry was performed on these simulated cluster images, curves of growth were measured. Based on these measurements, we investigated influence of star distribution stochastic effects onto cluster photometric and structural parameters.

**Aim of the study** – investigate stochasticity of star cluster structural and photometric parameters.

### Main tasks:

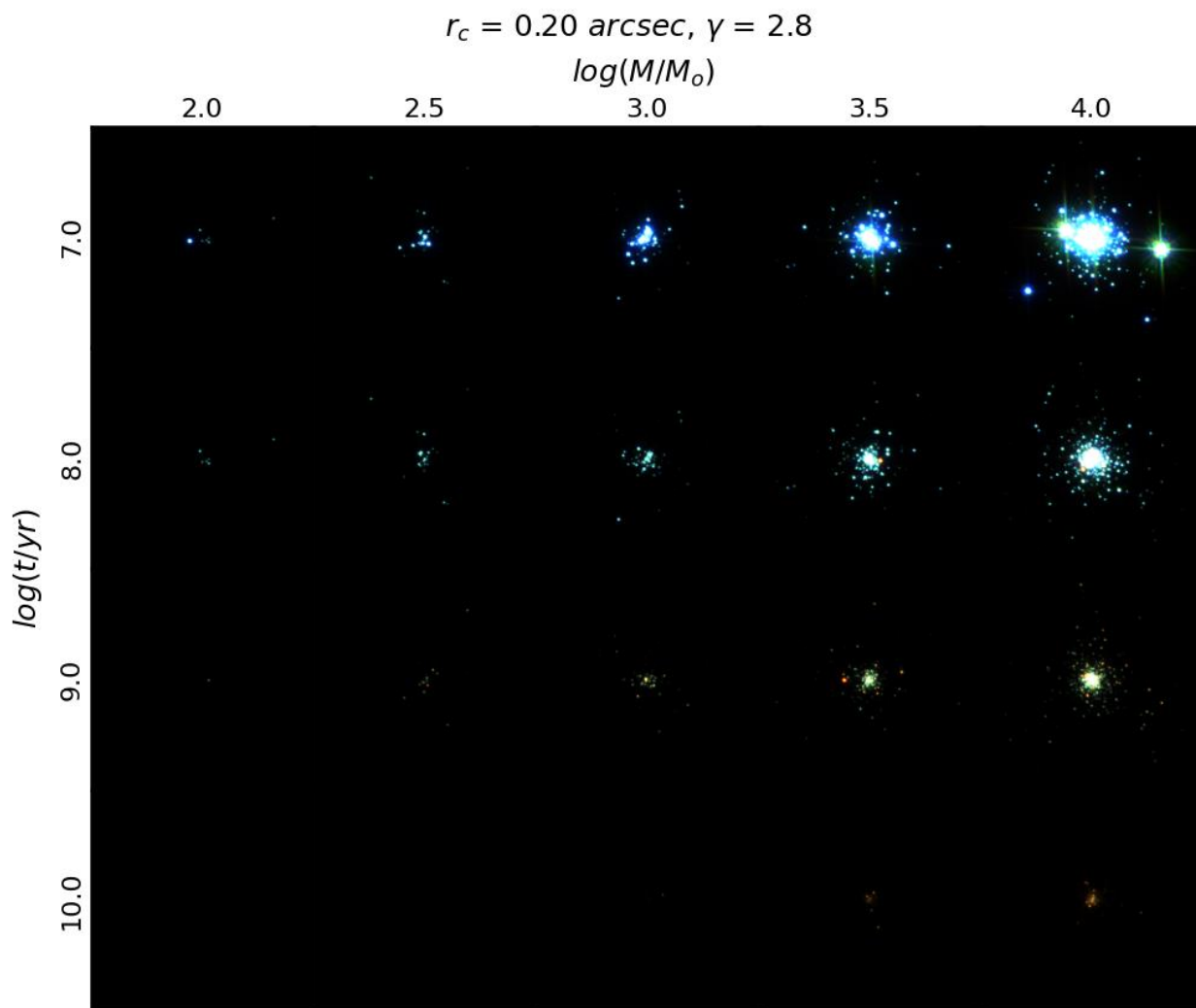
- Create algorithm and computer programs for modelling 3D star clusters and their images resembling real clusters of M31 observed in PHAT survey.
- Determine the effects of bright stars and their spatial distribution stochasticity on accuracy of cluster structural and photometric parameters.

### Main conclusions:

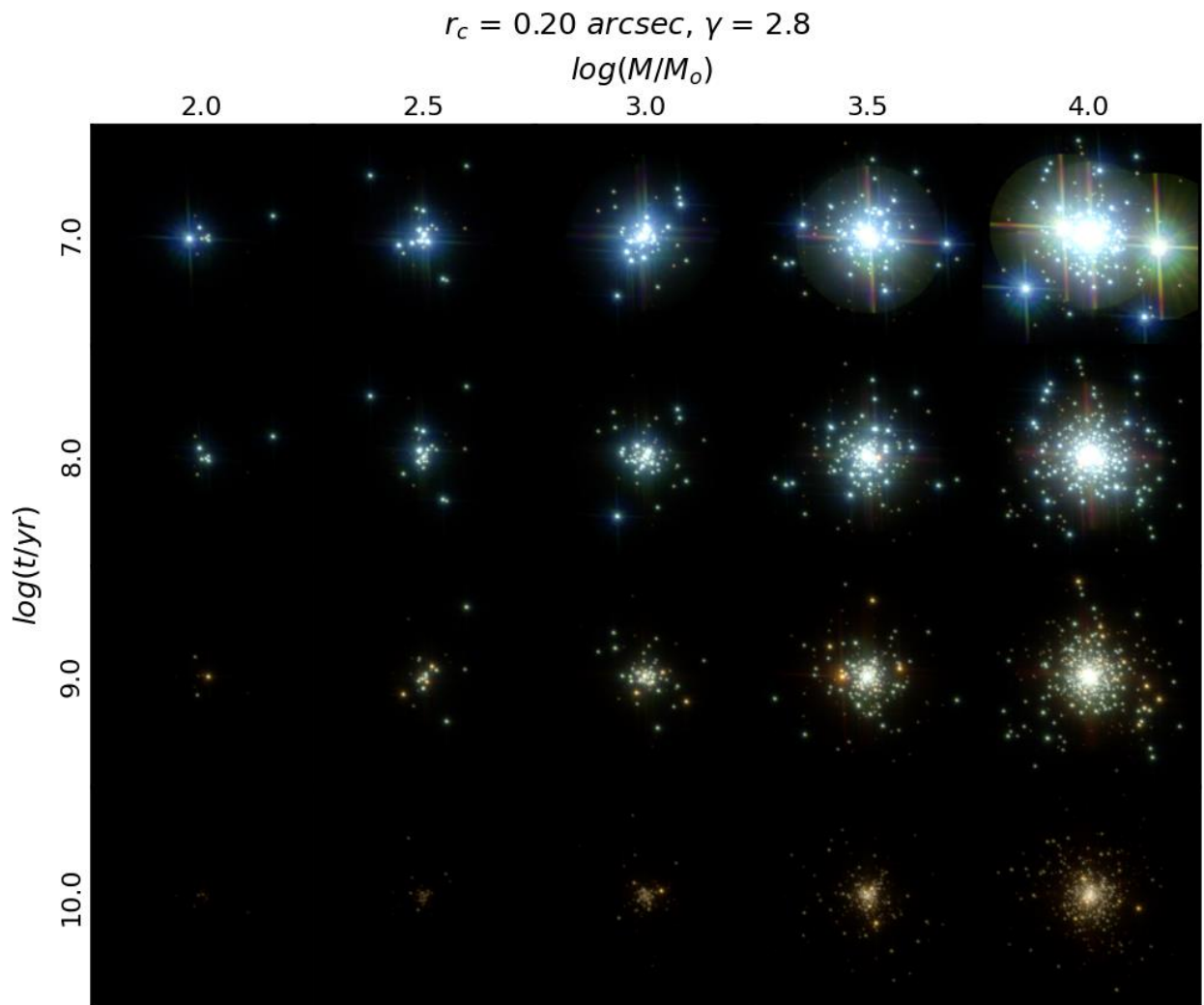
1. In case of young (10–100 Myr) and low mass ( $10^2 - 10^4 M_{\odot}$ ) clusters spread of colour indices can reach up to several magnitudes due to stochastic effects of bright stars. This can lead to inaccurately determined cluster physical parameters.
2. Due to effects of observation angle, low mass clusters can exhibit spread of color indices up to several tenths of magnitude, which exceed statistical uncertainties of photometric measurements.
3. Due to bright star spatial distribution stochasticity, young low mass clusters show large uncertainties of structural parameters. In the context of PHAT survey, spread of  $r_h$  can reach up to  $> 3.5 pc$ .
4. In the case of some  $10^2 - 10^3 M_{\odot}$  clusters, their radial surface brightness profile can be dominated by few or even one bright star.
5. The same cluster observed from different angles can exhibit drastically different radial surface brightness profile, and in the case of youngest clusters, their sizes when observing from different directions can differ up to even  $1.8 pc$ .

## Priedas Nr. 1

Šiame priede pateikiami spalvotų dirbtinių spiečių vaizdų pavyzdžiai. Mėlynas kanalas –  $F336W$ , žalias –  $F475W$ , raudonas –  $F814W$ . Visos spalvotos nuotraukos gautos naudojant *Python* paketą *APLpy* ([Robitaille ir Bressert 2012](#)).

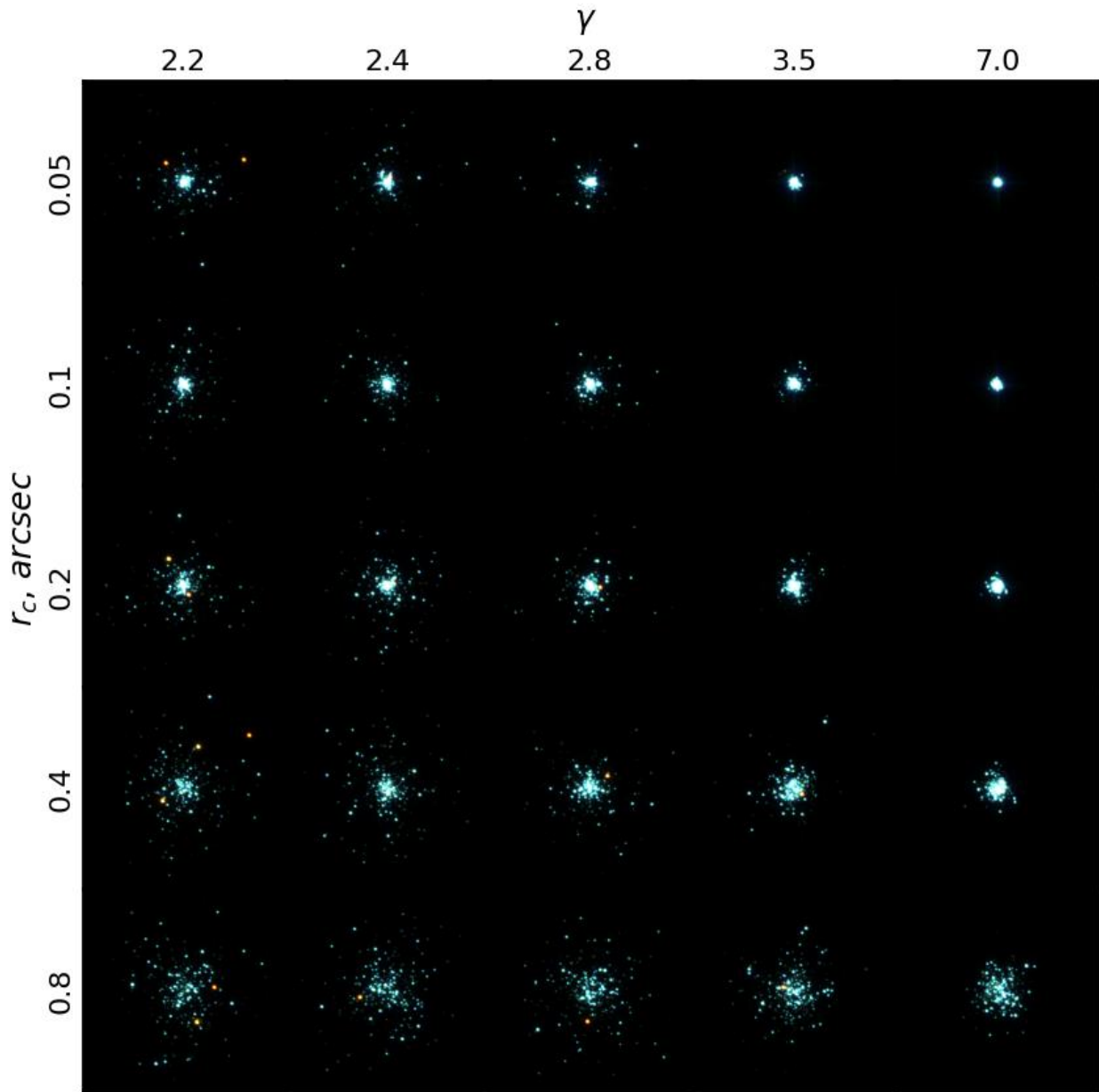


**P1.1 pav.** Skirtingos pradinės masės skirtingo amžiaus dirbtinių spiečių vaizdai. Žvaigždžių spinduliuojamas srautas sunormuotas tiesinėje skalėje. Visi čia pavaizduoti spiečiai sugeneruoti taikant tuos pačius EFF profilio parametrus, kurių vertės nurodytos nuotraukų viršuje.



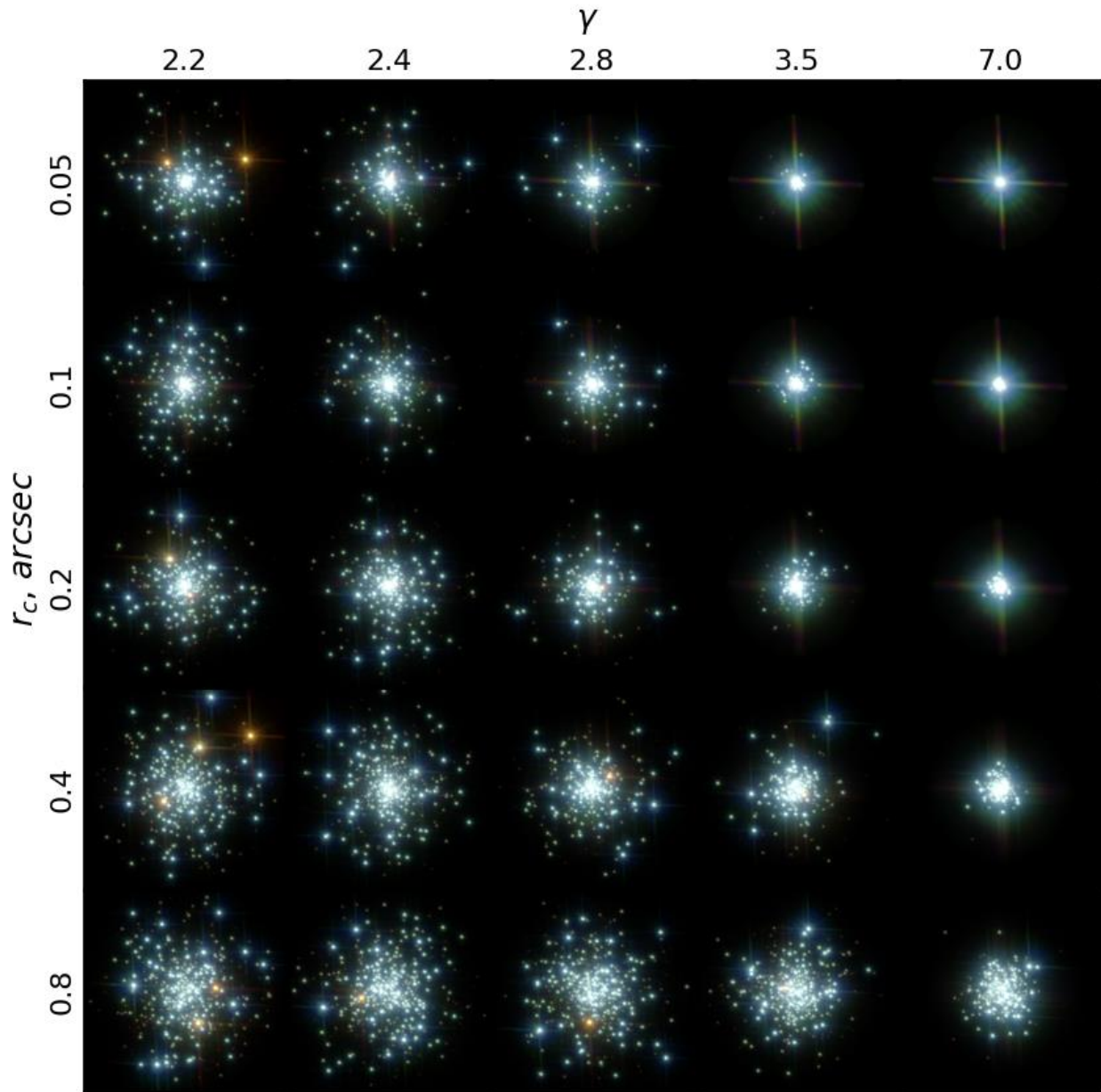
**P1.2 pav.** Tas pats kaip ir P1.1 pav., tik čia srautas sunormuotas logaritminėje skalėje.

$$\log(M/M_{\odot}) = 3.5, \log(t/\text{yr}) = 8.0$$



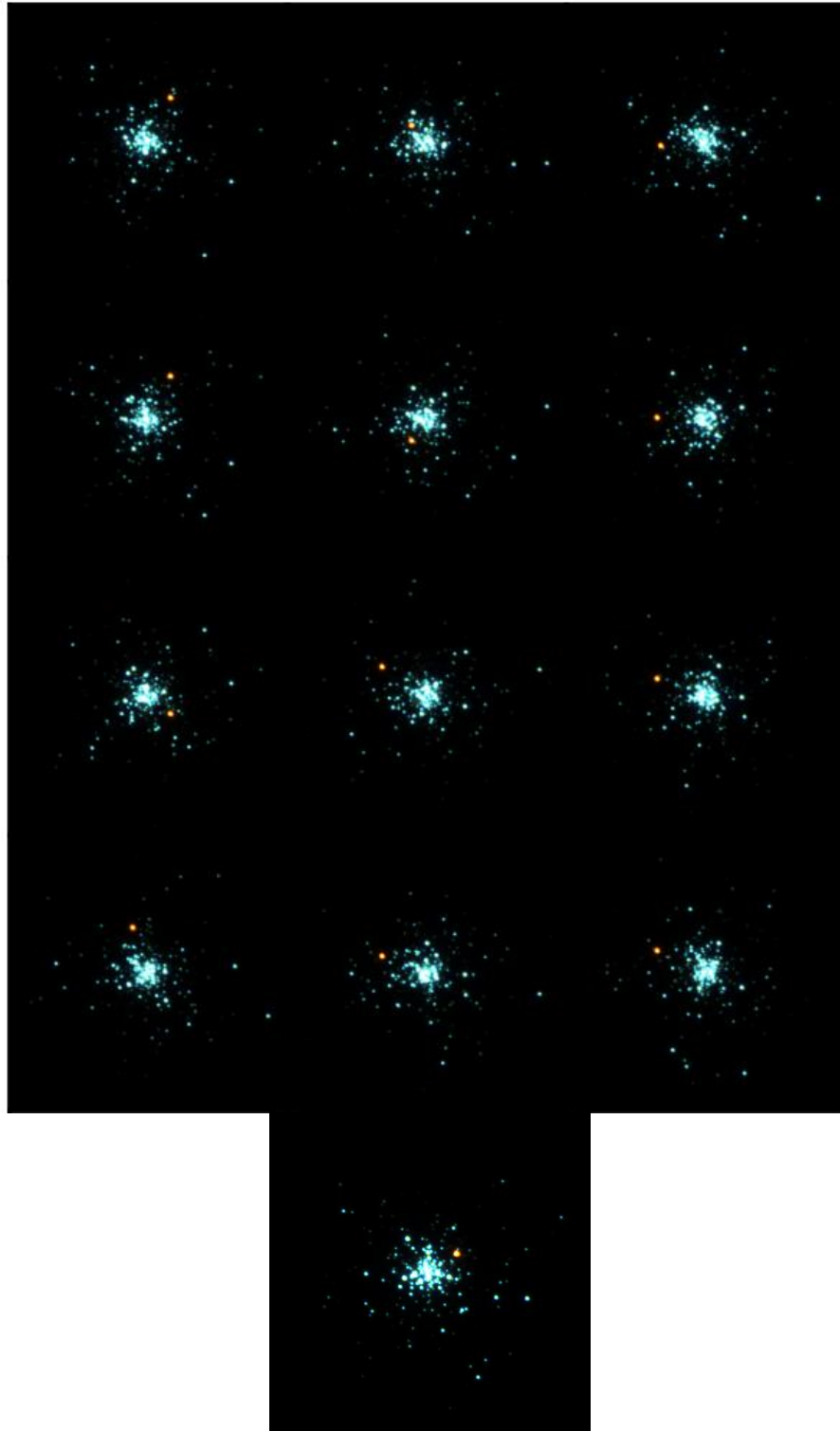
**P1.3 pav.** Tos pačios pradinės masės ir amžiaus spiečių su skirtingais žvaigždžių erdvinio pasiskirstymo parametrais  $r_c$  ir  $\gamma$  spalvoti vaizdai. Masė ir amžius nurodyti virš nuotraukų. Žvaigždžių srautas sunormuotas tiesinėje skalėje.

$$\log(M/M_o) = 3.5, \log(t/yr) = 8.0$$



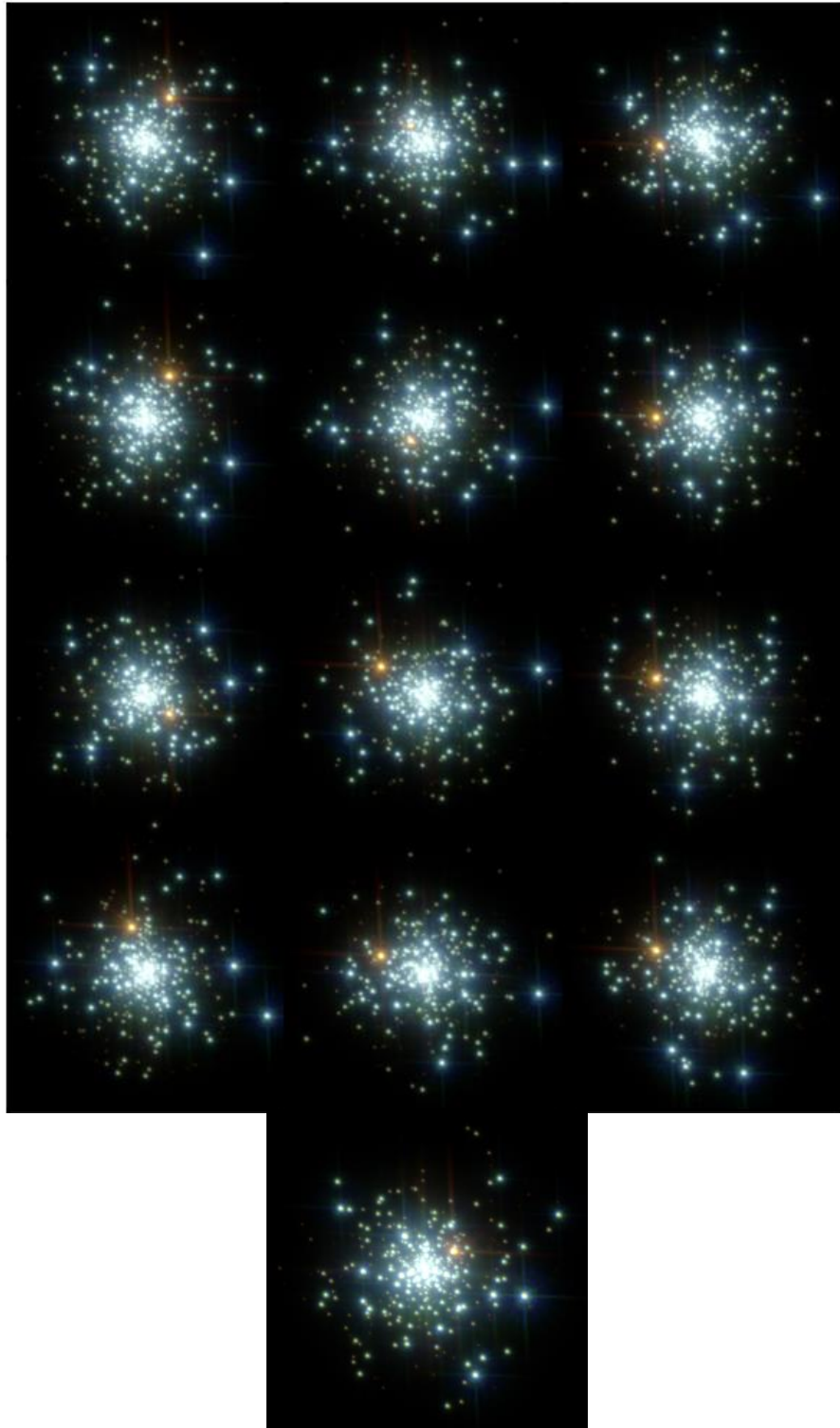
**P1.4 pav.** Tas pats kaip ir P1.3 pav., tik čia srautas sunormuotas logaritminėje skalėje.

$$\log(M/M_0) = 3.5, \log(t/\text{yr}) = 8.0$$
$$r_c = 0.4 \text{ arcsec}, \gamma = 2.8$$



**P1.5 pav.** To paties spiečiaus vaizdai iš 13 stebėjimo kryptių (2.4 pav.). Spiečiaus parametrai nurodyti virš nuotraukų. Žvaigždžių generuojamas srautas sunormuotas tiesinėje skalėje.

$$\log(M/M_o) = 3.5, \log(t/\text{yr}) = 8.0$$
$$r_c = 0.4 \text{ arcsec}, \gamma = 2.8$$

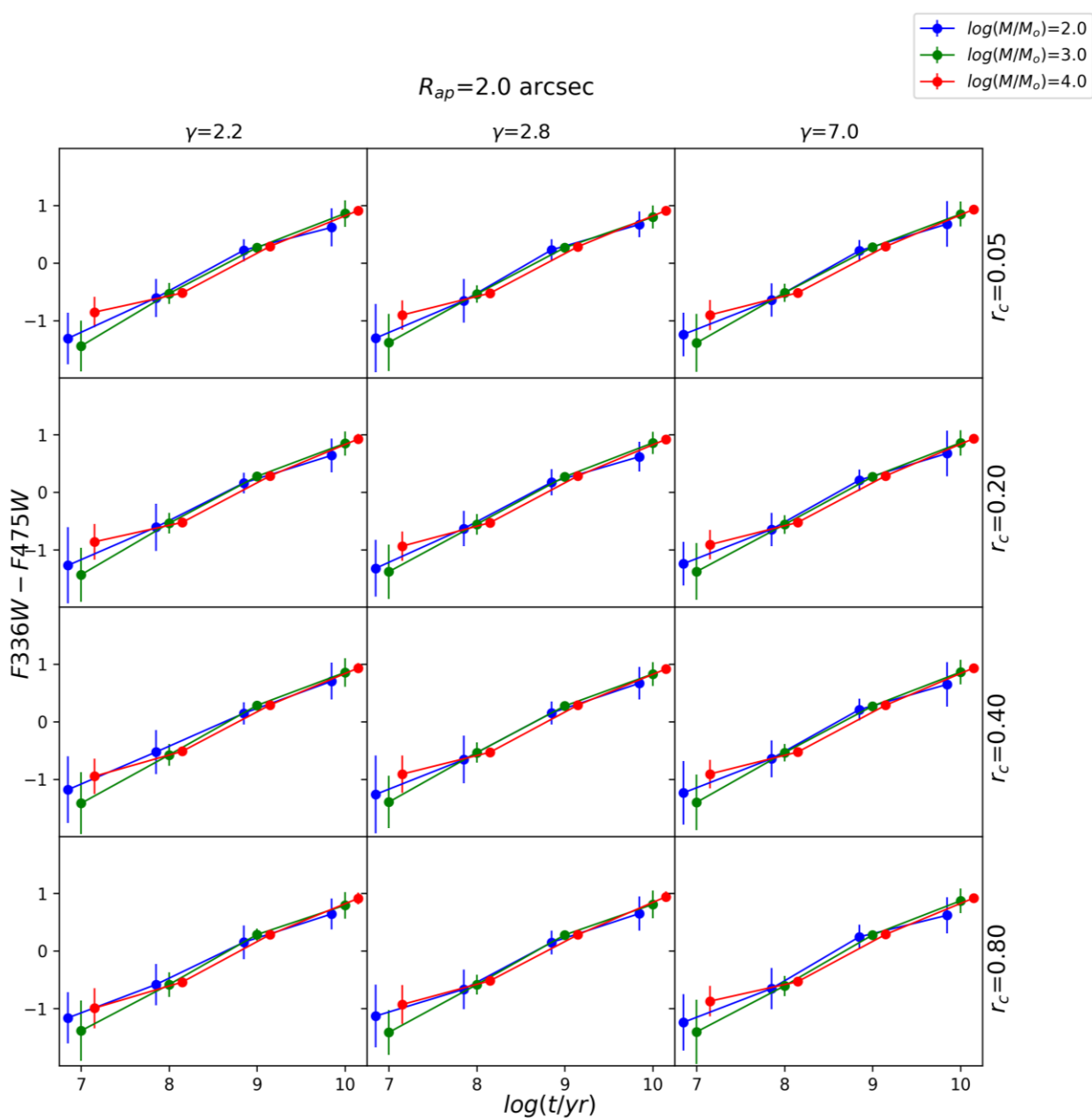


**P1.6 pav.** Tas pats kaip ir P1.5 pav., tik čia srautas sunormuotas logaritminėje skalėje.

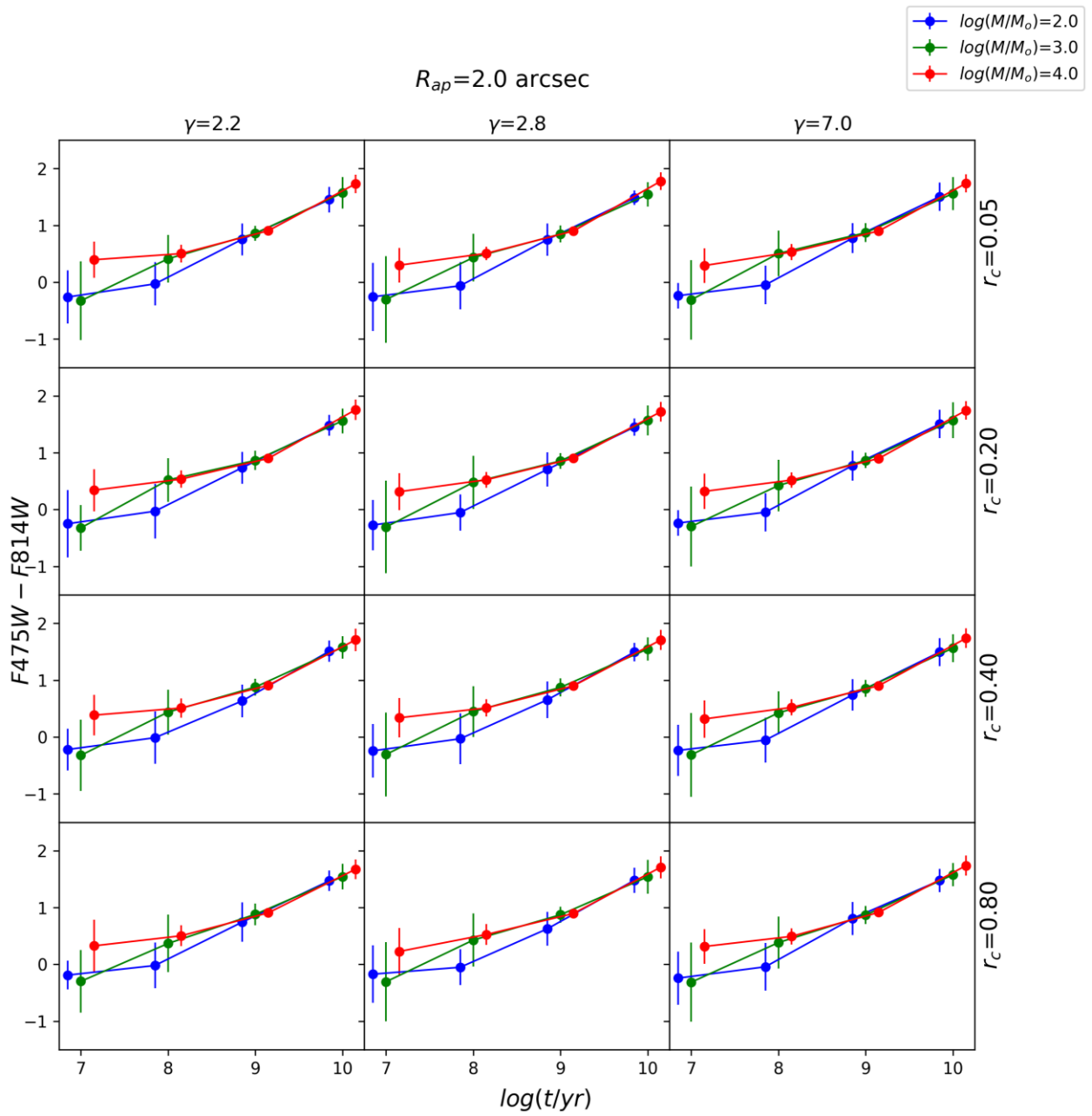


## Priedas Nr. 2

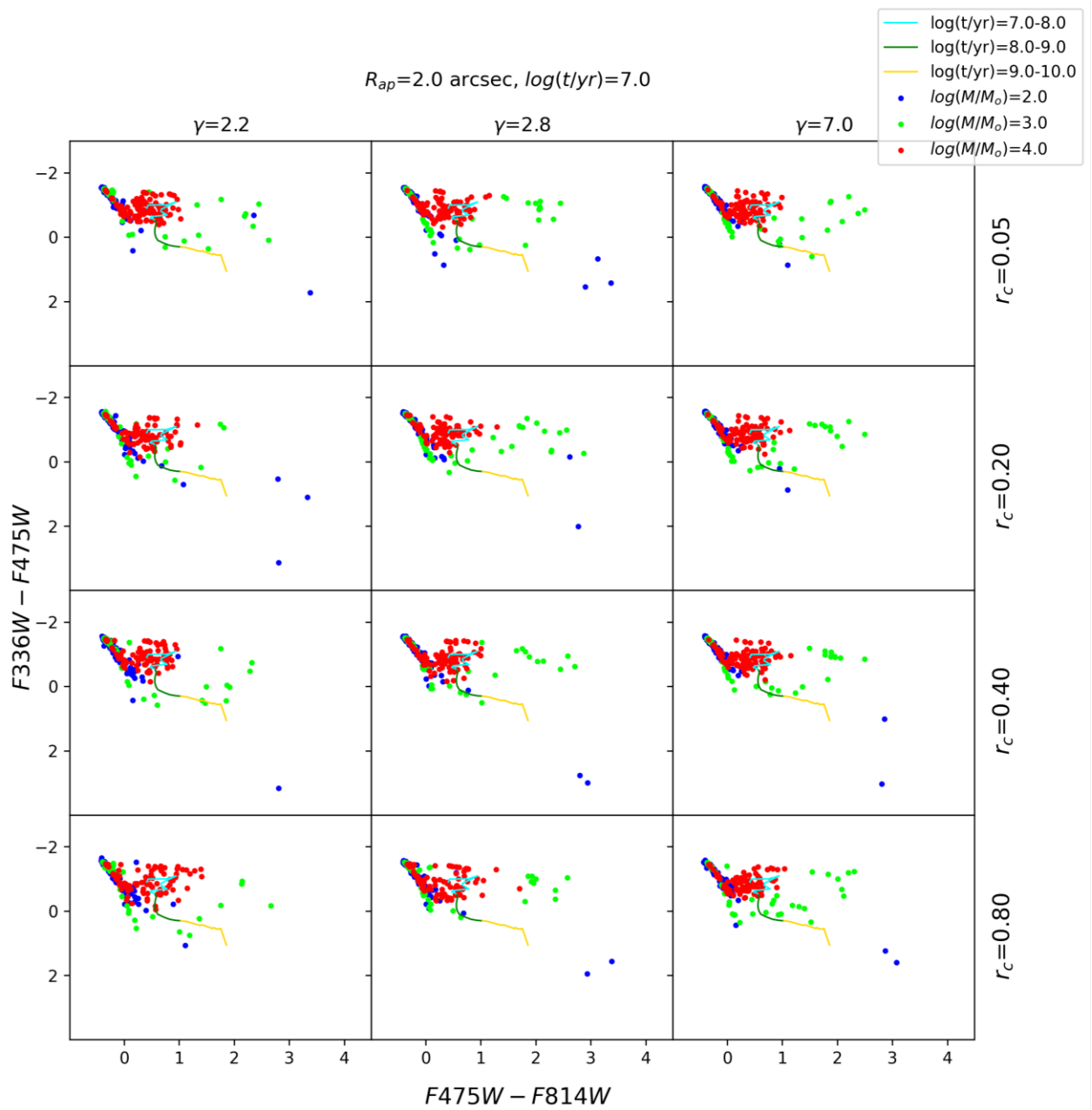
Šiame priede pateikiamos diagramos, skirtos papildyti 3.2 ir 3.3 poskyriuose atliekamą generavimo ir stebėjimo krypties stochastinių efektų fotometriniams spiečių parametrams analizę.



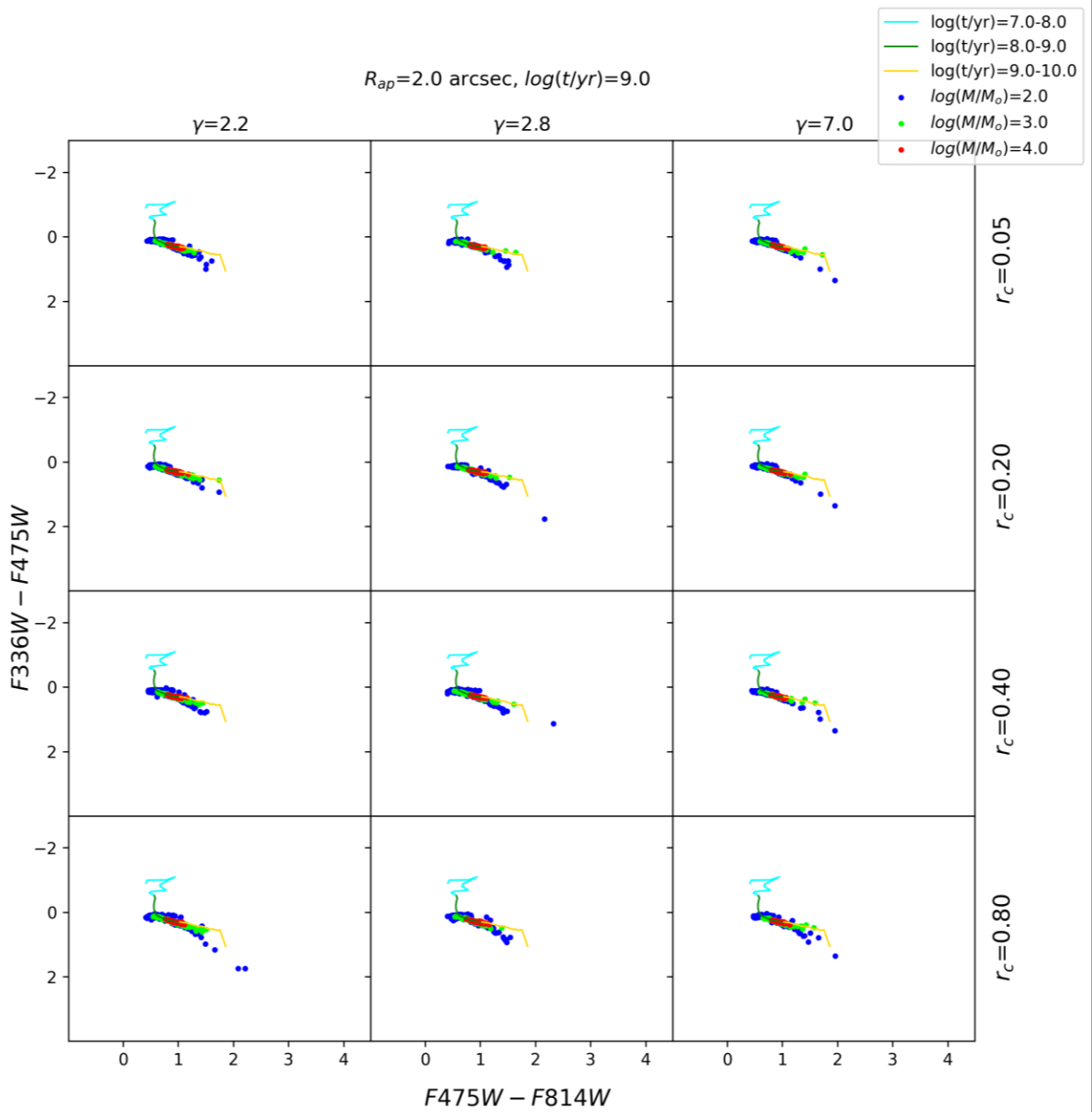
**P2.1 pav.** Tas pats kaip ir [3.2 pav.](#), tik čia naudojami matavimai  $R_{ap} = 2.0 \text{ arcsec}$  dydžio apertūroje.



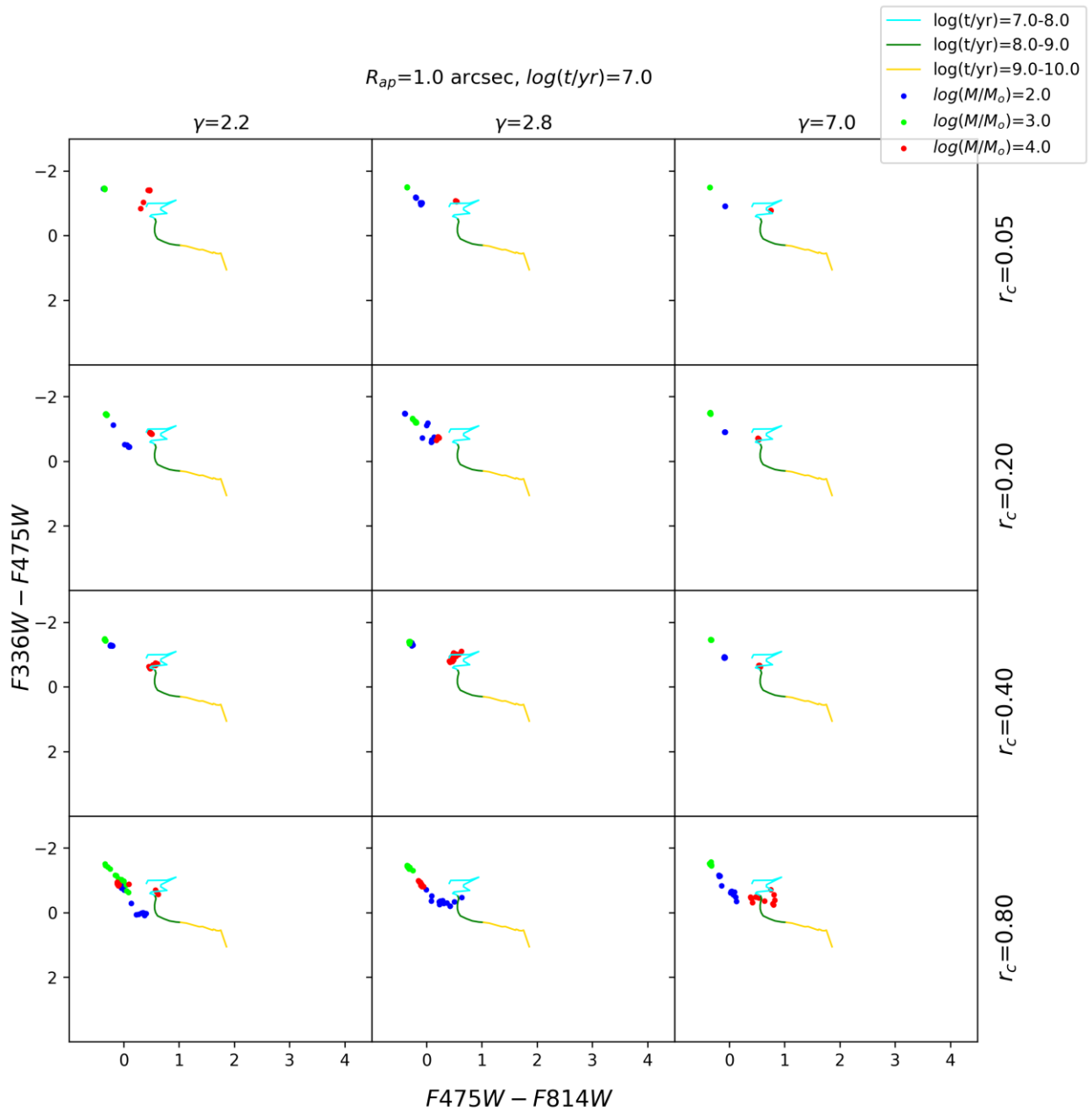
**P2.2 pav.** Tas pats kaip ir [3.3 pav.](#), tik čia naudojami matavimai  $R_{ap} = 2.0 \text{ arcsec}$  dydžio apertūroje.



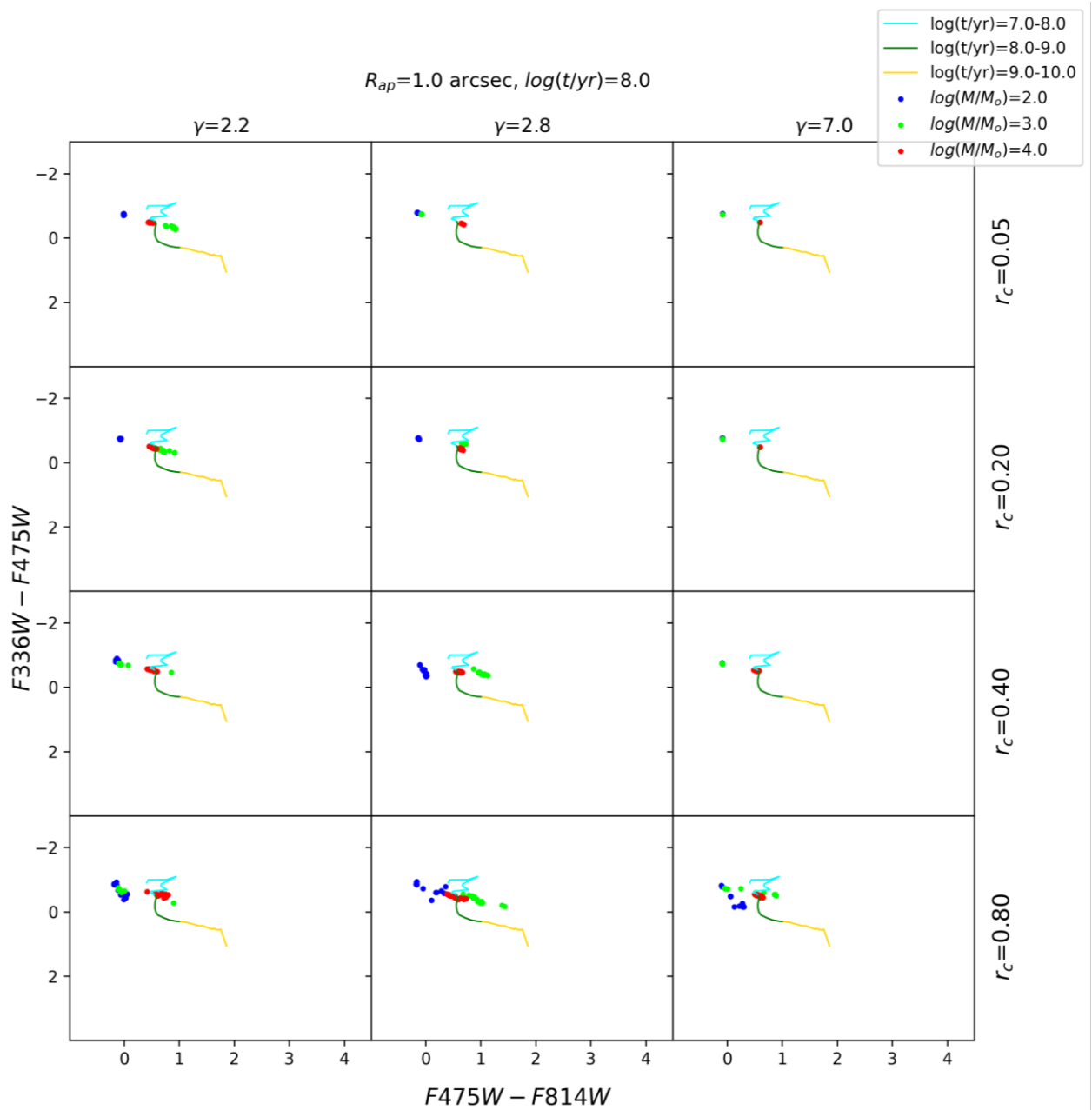
**P2.3 pav.** Tas pats kaip ir [3.4 pav.](#), tik čia naudojami matavimai  $R_{ap} = 2.0 \text{ arcsec}$  dydžio apertūroje.



**P2.4 pav.** Tas pats kaip ir [3.5 pav.](#), tik čia naudojami matavimai  $R_{ap} = 2.0 \text{ arcsec}$  dydžio apertūroje.

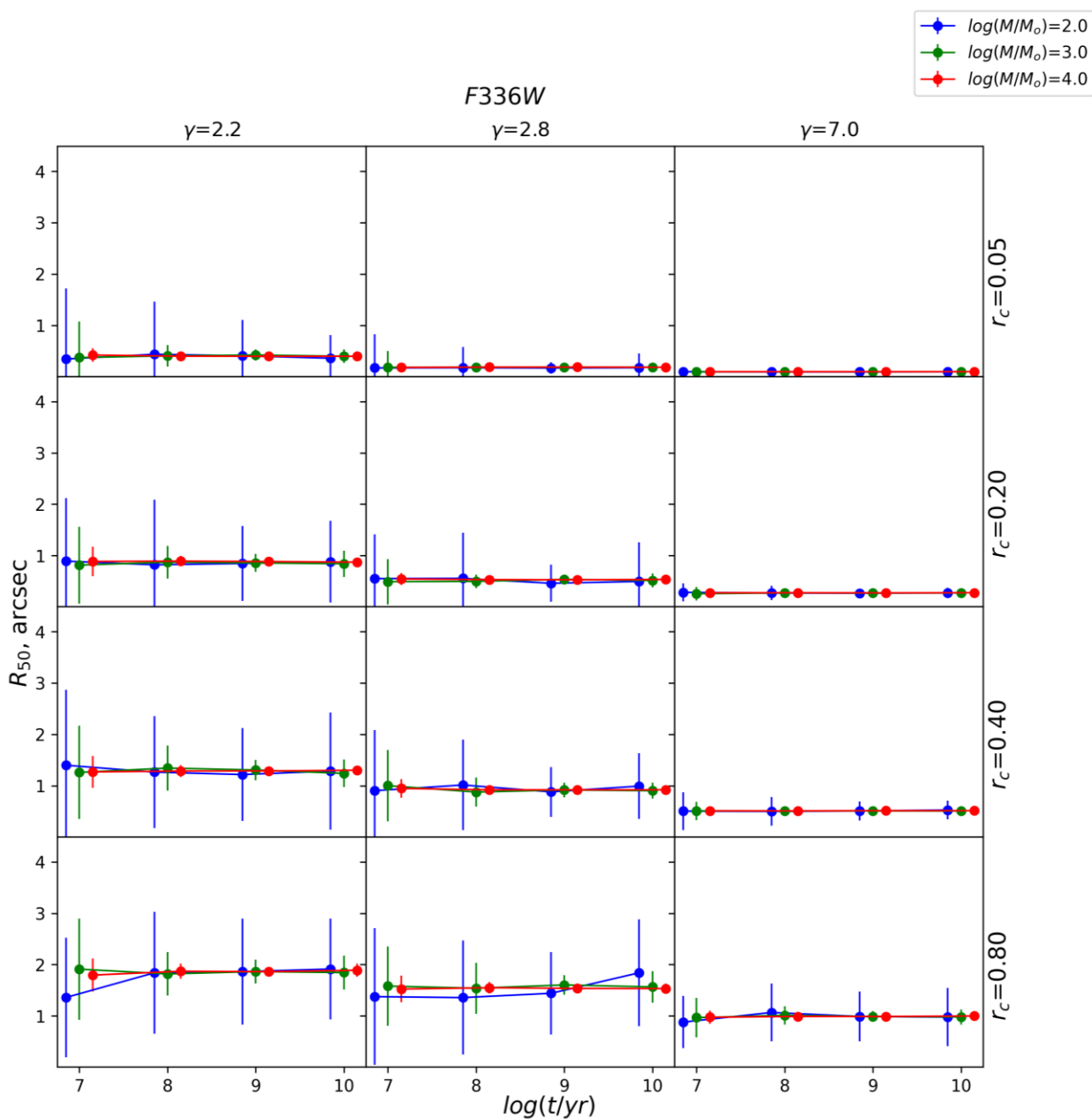


**P2.5 pav.** Tas pats kaip ir [3.8 pav.](#), tik čia naudojami matavimai  $R_{ap} = 1.0 \text{ arcsec}$  dydžio apertūroje.

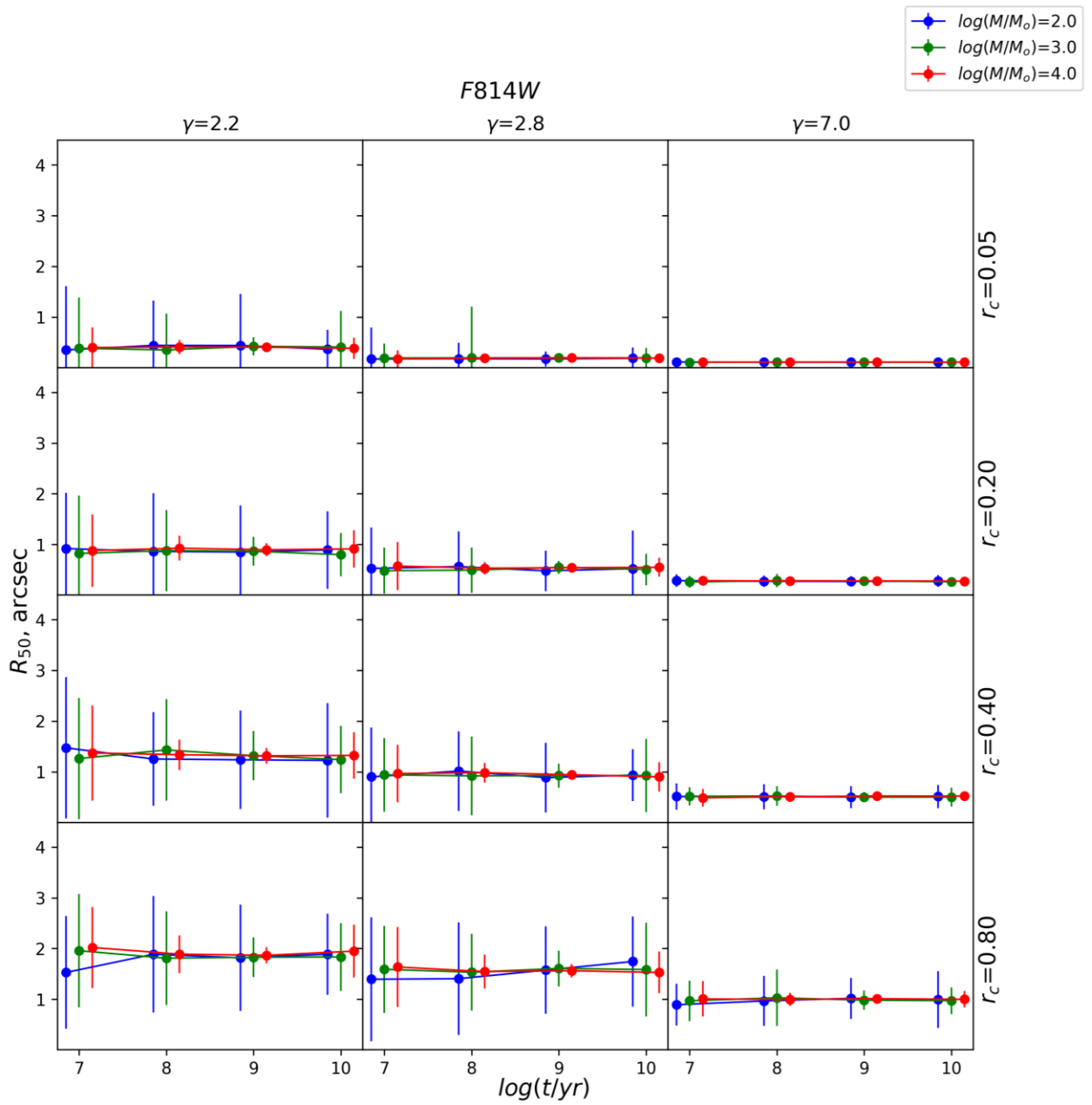


**P2.6 pav.** Tas pats kaip ir [3.9 pav.](#), tik čia naudojami matavimai  $R_{ap} = 1.0 \text{ arcsec}$  dydžio apertūroje.

# Priedas Nr. 3

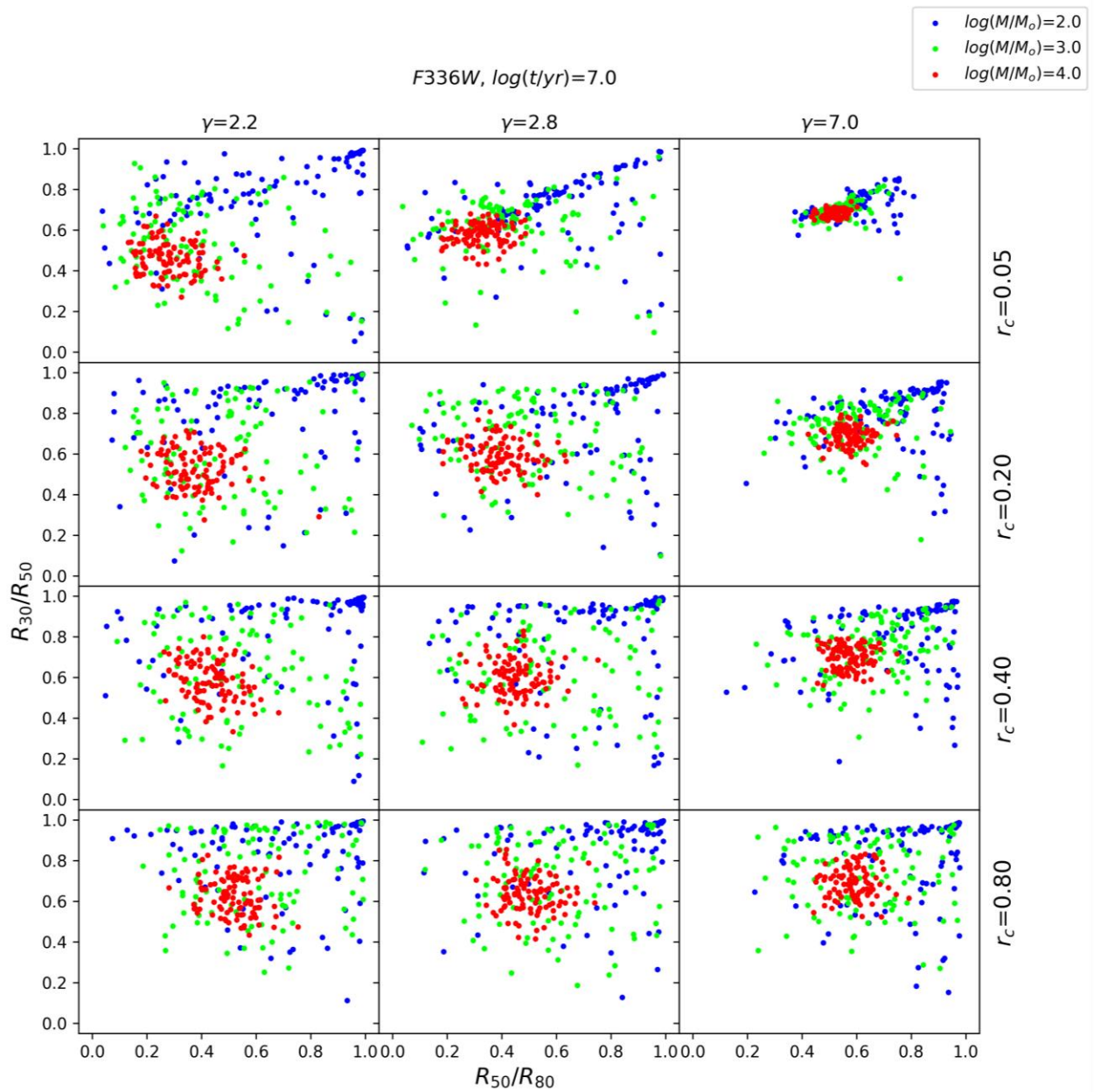


**P3.1 pav.** Tas pats kaip ir [3.10 pav.](#), tik čia *F336W* duomenys.

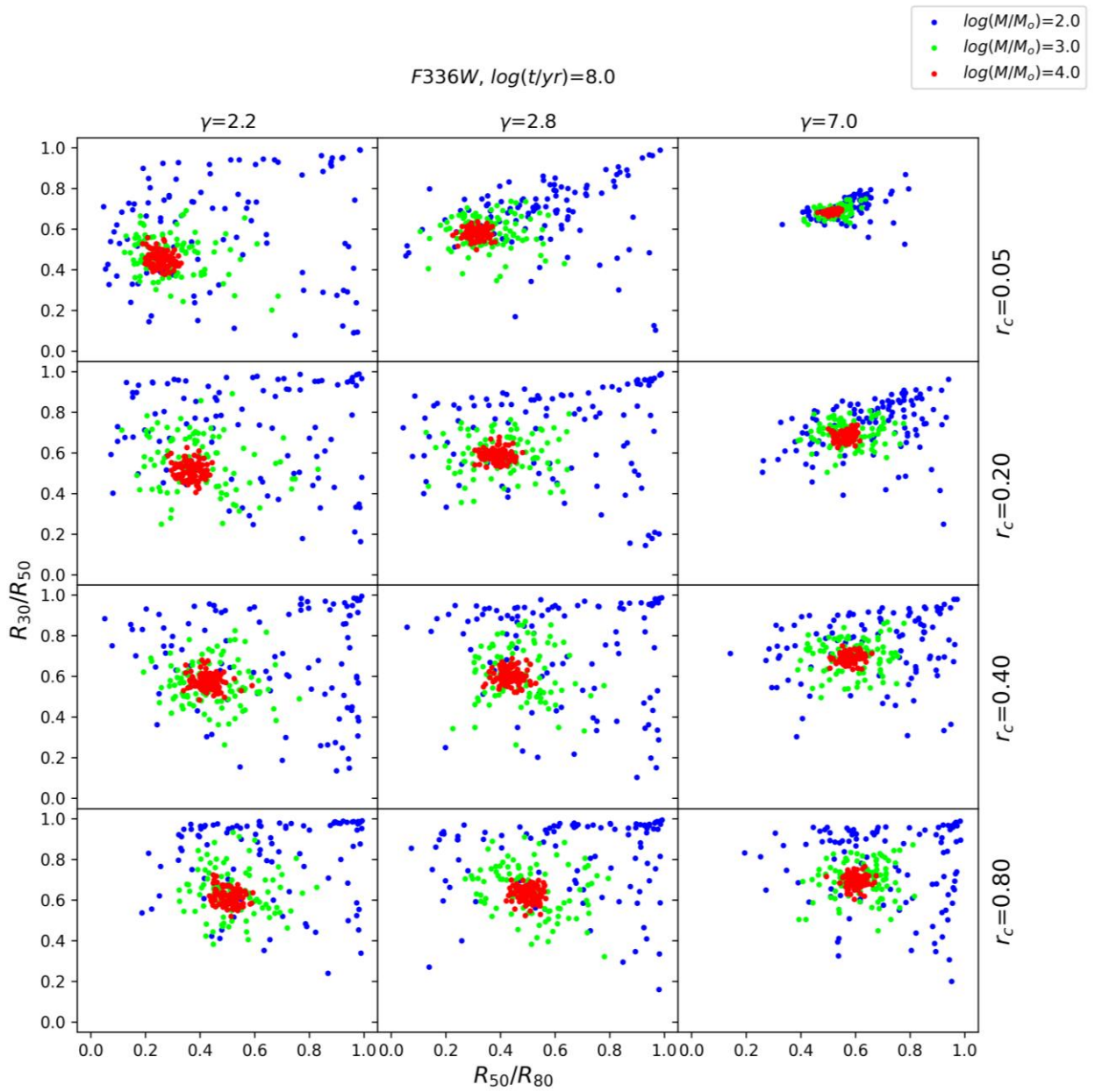


**P3.2 pav.** Tas pats kaip ir [3.10 pav.](#), tik čia *F814W* duomenys.

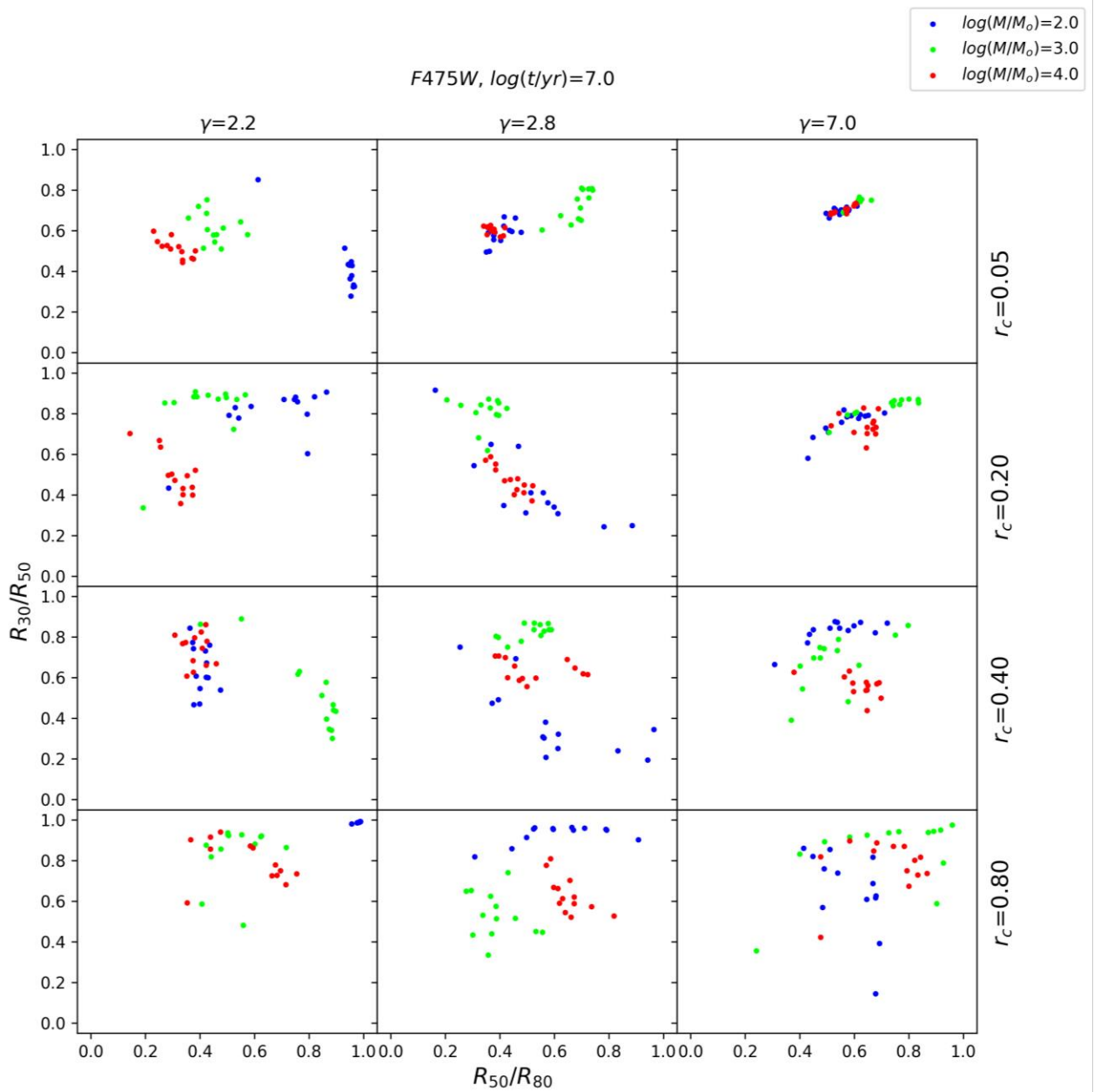




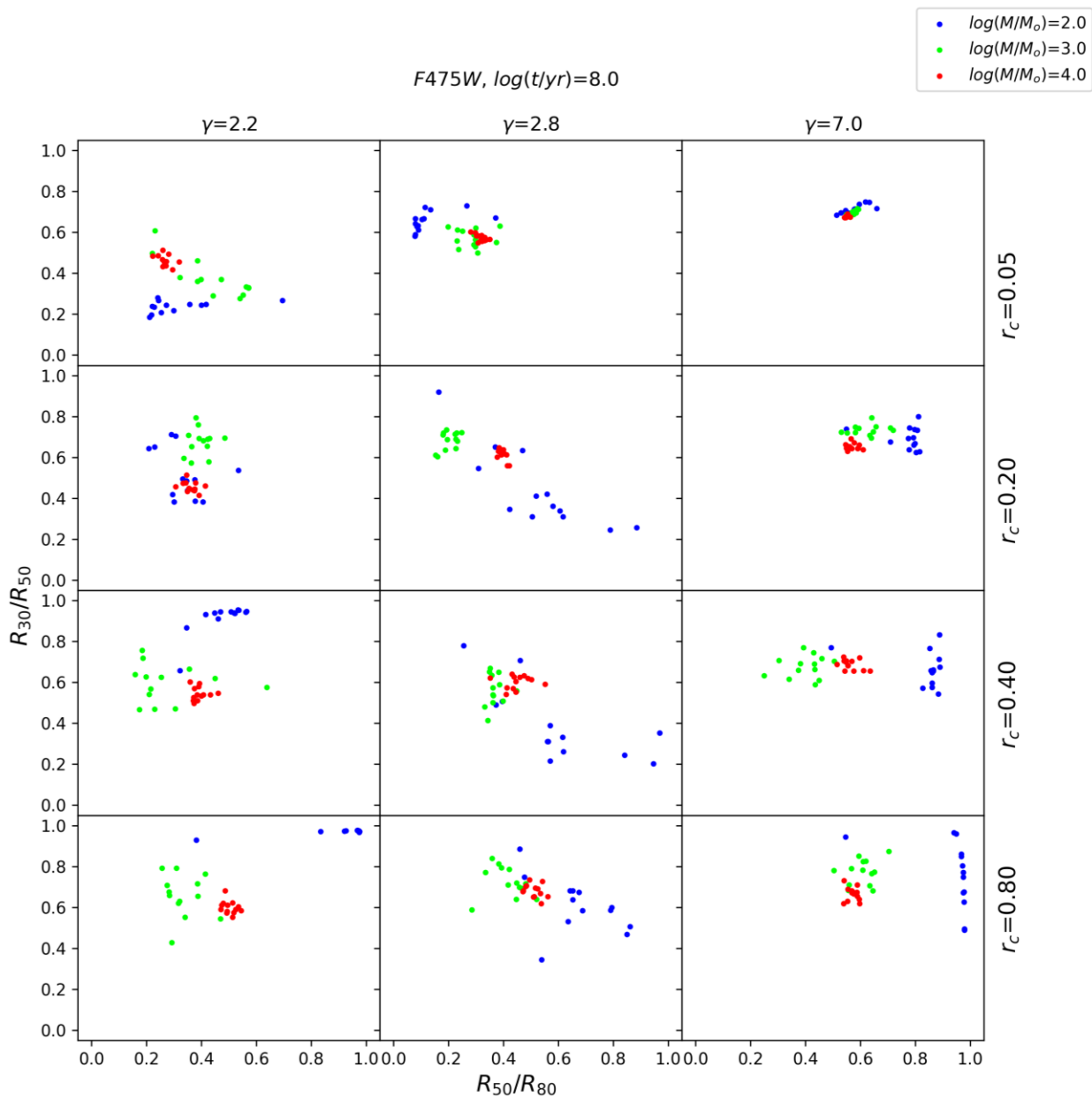
**P3.3 pav.** Tas pats kaip ir [3.11 pav.](#), tik čia *F336W* duomenys.



**P3.4 pav.** Tas pats kaip ir [3.12 pav.](#), tik čia  $F336W$  duomenys.



**P3.5 pav.** Tas pats kaip ir [3.14 pav.](#), tik čia kitų generacijų duomenys.



**P3.6 pav.** Tas pats kaip ir [3.15 pav.](#), tik čia kitų generacijų duomenys.