Стручни критички осврт

Станислав Милошевић, *Numeričke simulacije sudara galaksija i nastanka morfoloških podstruktura* (Нумеричке симулације судара галаксија и настанка морфолошких подструктура). Докторска дисертација. Београд: Математички факултет Универзитета у Београду, 2023, 110 стр. (основни текст на штампаним странама 1–97; ментор др Мирослав Мићић; чланови комисије: М. Мићић, Б. Вукотић, Д. Илић). Отворени приступ: Национални репозиторијум дисертација у Србији (НаРДуС).

I Предмет, грађа и мерило

Дисертација узима за предмет једно добро омеђено, а рачунски захтевно питање вангалактичке динамике: настанак морфолошких подструктура — звезданих токова и љуски — при судару велике спиралне галаксије и њеног сателита, патуљасте галаксије, и то методом нумеричких симулација N-тела. Тежиште није на једном приказу појаве него на повезивању особина насталих структура с особинама родитељске галаксије: рад показује да се посматрана расподела металичности дуж Великог звезданог тока (Giant Stellar Stream, GSS) у халоу галаксије M31, као и металичност североисточне (NE) и западне (W) звездане љуске, може објаснити почетном, линеарно опадајућом расподелом металичности у патуљастом сателиту пре судара. То је, како ће се видети, и главна вредност рада и место на коме се сустичу његове најозбиљније замерке.

Пре свега осталог ваља изрећи мерило, изричито и без изузетка. Рукопис је пред комисијом био средином јуна 2023 (извештај Комисије носи датум 17.07.2023, а захвалница „maj 2023.“); рад се стога овде мери искључиво према литератури, стандардима, прописима и научном знању који су постојали и били доступни пре тог тренутка. Ништа што је настало касније није мерило: ни доцнија издања стандарда, ни радови објављени после предаје, ни новија посматрања. То правило важи и за списак литературе овог осврта — свака његова јединица објављена је пре тог рока, изузев саме дисертације, извештаја Комисије и извора за чињенице које се временом не мењају (уз назнаку). Треба напоменути и да је PDF рада у репозиторијуму састављен 04.09.2023, дакле после предаје рукописа комисији; садржина се, међутим, мери према тренутку предаје, а не према датуму последњег слога.

Наводи из дисертације преузети су дословно, у писму у коме је рад написан (латиница), с бројем штампане стране у загради (штампана страна = страна PDF-а умањена за осам); једначине, слике и табеле читане су са самих страна рада. Наводи

из извештаја Комисије и из спољних извора такође су дословни, у писму, односно језику извора. Тврдње о астрофизичким вредностима и о садржини цитираних радова сравњиване су с примарним изворима у издању важећем на рок.

Још једно треба рећи на почетку, јер одређује како се чита методолошки слој рада. Реч је о нумеричком, рачунарском истраживању изведеном као низ контролисаних огледа: почетни услови се задају пакетом GalactICs, а еволуција судара интегрише кодом Gadget2. Циљеви рада, при том, нису постављени као строге хипотезе које се потврђују или обарају, него претежно као условна, описна питања — да ли негативан почетни градијент металичности описује расподелу у GSS, како морфологија патуљка утиче на настале структуре. Мерило доказане или оповргнуте хипотезе на такав рад не сме се применити механички; оно што се од њега тражи јесте да оно што тврди буде тачно, доследно спроведено и одмерено према ономе што бројеви носе.

II Шта рад доноси

Осврт је дужан да почне оним што дисертација јесте, јер је то и највећи део онога што она вреди.

Прво и најважније, рад доноси објашњење посматране расподеле металичности дуж GSS. Ту расподелу — раст металичности од дела тока најближег M31 до средине, па опадање ка спољашњем крају, с два пика у централном делу — фотометријски су измерили Conn и сарадници (2016) и Cohen и сарадници (2018), али без објашњења порекла. Рад је квантитативно репродукује по деветнаест посматрачких поља помоћу Монте Карло модела почетне линеарно опадајуће металичности у патуљку, а два пика објашњава унутрашњом кинематиком тока: „Po prvi put je objašnjeno poreklo raspodele metaličnosti u strukturama nastalim u sudaru M31 i patuljaste galaksije.“ (стр. 2). Пикови се приказују као привремене структуре које настају кад се у истим пољима нађу две кинематички различите групе честица — рад изричито налази да „imamo bar dve kinematičke grupe čestica“ (стр. 82) одговорне за двопичну расподелу. Уз то иде и дисциплиновано разграничење: могућа, лака веза тих пикова с раније посматраном кинематичком компонентом (Kalirai и сар. 2006a) изричито је проверена и одбачена — „Korelacija pikova u raspodeli metaličnosti sa drugom komponentom iz rada Kalirai et al. (2006a) nije uočena“ (стр. 83) — уместо да се слагање прећутно припише.

Друго, рад повезује ток и систем љуски у један ударни сценарио. Истим негативним радијалним градијентом металичности у патуљку истовремено се репродукује металичност и тока и обе љуске, а секвенца настанка (GSS у првом, NE у другом, W у трећем проласку кроз перицентар) уклапа се у раније моделе: „Potvrdili smo raniju

pretpostavku da sve strukture nastaju u istom sudaru od iste patuljaste galaksije.“ (стр. 96). Металичност љуски тиме постаје независан, додатни тест исте почетне расподеле — концептуално снажна поставка.

Треће, у трећем поглављу рад изводи контролисан оглед о утицају морфологије сателита. При истој маси и истом почетном растојању варирају се морфологија патуљка (сфероидна наспрам диск-патуљка), нагиб орбите и смер ротације, и прати како се мења скуп насталих токова и љуски и време распада остатка сателита. То је ужи, али чист методолошки захват: држи се један чинилац сталним, мења се други.

Четврто, теоријски увод није пука компилација. Теорема виријала није само пренета из уџбеника него изведена у облику непосредно употребљивом за проверу равнотеже модела — „izveden je oblik ove teoreme koji je najpraktičniji za testiranje stabilnosti modela galaksija u početnom trenutku.“ (стр. 10) — чиме је увод методолошки повезан с оним што рад стварно ради.

Пето, рад одликује методолошка уздржаност коју ваља именовати, јер је ређа од супротне. У поступку моделовања све је фиксирано осим онога што се испитује — „Jedino je variran gradijent inicijalne raspodele metaličnosti u patuljastoj galaksiji.“ (стр. 70); стандардна девијација Монте Карло расподеле није произвољна него везана за посматрану дисперзију; поређење за W љуску отворено је означено као оно што јесте — „radi kvalitativnog poredenja“ (стр. 92); а домет метода признат је на правом месту: „iako nismo razmatrali fiziku gasa u galaksijama.“ (стр. 97). Закључци су, уз то, бројчано одредиви (нагиб, средње металичности, време формирања), што уопште и омогућава овакву детаљну расправу.

Најзад, потребно је поштено рећи и оно што надилази појединачне вредности: где год су се тврдње рада могле сравнити с примарним изворима и с унутрашњом доследношћу, у највећем делу су се показале поузданим. Резултати поглавља 3 и 4 објављени су у рецензираним часописима (Serbian Astronomical Journal и Monthly Notices of the Royal Astronomical Society), а из истраживања су произашла и два рада са SCI листе — један као први аутор у категорији M21, други самостално у M23. Та поузданост фактографске и рачунске основе није споредна: она је оно што уопште омогућава да се о раду расправља овако детаљно.

III Циљеви, претпоставке и метод

Циљеви рада изложени су као пројектна питања, а не као нумерисане хипотезе. То није мана по себи, али чини да се терет доказивања премести на конкретне резултате поглавља 4 и 5. Најважније методолошке замерке тичу се управо мере којом се тај терет носи.

Носећи квантитативни резултат — процена да је најбоље слагање расподеле металичности дуж тока на 2,9 милијарди година од почетка судара — почива на мери одступања симулиране и посматране металичности. Ту мера и њен опис нису усклађени: текст је зове збиром квадрата — „Najpre je izračunata suma kvadrata razlike ove dve vrednosti“ (стр. 74) — док одговарајућа једначина, у којој под кореном стоји квадрат једне разлике, заправо даје збир апсолутних одступања по деветнаест поља. Мера, уз то, није пондерисана уцртаним грешкама посматрања, нема ни хи-квадрат, ни степене слободе, ни праг прихватања. То је стварна замерка: процена параметра без исказане неодређености остаје без мере поузданости. Водич о процени грешака у астрономији то формулише без остатка — „Any parameter estimate that is given without an error estimate is meaningless.“ (Andrae 2010) — а водичи о фитовању модела с грешкама траже да поређење укључи неодређености посматрања (Hogg, Bovy & Lang 2010; о опрезу с редукованим хи-квадратом и о непоузданости броја степени слободе код нелинеарних модела в. Andrae, Schulze-Hartung & Melchior 2010). Ваља, међутим, поштено сузити тежину: збир апсолутних одступања јесте ваљана мера растојања која монотоно казни свако одступање и добро рангира тренутке, а издвојени минимум на 2,9 Gyr сагласан је с независним динамичким показатељима (даљине и брзине дуж тока за интервал 2,4–2,9 Gyr). Реч је, дакле, о непрецизно описаној и непондерисаној мери, коју би требало ускладити с једначином и, у монографском издању, заменити пондерисаним хи-квадратом с прагом — а не о погрешном рачуну који руши налаз.

Из истог круга је и неодређеност почетног градијента, наведена као $\Delta[\mathrm{Fe/H}] = -0{,}3 \pm 0{,}2$. Тих ±0,2 није изведена статистичка грешка процене него полураспон унапред испитаних вредности (од −0,1 до −0,5); поступак његовог добијања као грешке није описан, па се лако чита као мерна неодређеност иако то није (Andrae 2010). То је смислена мера распона допустивих градијената, али би је требало изричито тако и назвати.

Метод Монте Карло, даље, узоркује само вредности металичности честица (хиљаду понављања при фиксираној динамици), не и саму динамику — једну реализацију почетних услова, орбите, масе и профила халоа. Наведене грешке по пољу стога одражавају расипање доделе металичности, а не највеће изворе неодређености. Међународни методолошки документ о простирању расподела методом Монте Карло управо на то упозорава: кад се узоркује само један улаз, резултат важи само за неодређеност тог улаза, а фиксни број понављања без контроле толеранције не даје контролу квалитета (JCGM 101:2008). У корист рада иде то што орбита и маса нису слободни параметри него су ограничени посматраним даљинама и брзинама дуж тока, па варирање динамике и није циљ баш овог поступка; али домет исказане грешке треба изричито ограничити на неодређеност металичности.

Најзад, испитан је само један функционални облик почетне расподеле — линеарно опадајући негативни градијент — иако рад сам наводи да „Pokazano je (posmatrački i teorijski) da ti gradijenti mogu biti i pozitivni i negativni“ (стр. 64), а варирана је само магнитуда: „Jedino je variran gradijent inicijalne raspodele metaličnosti u patuljastoj galaksiji.“ (стр. 70). Из тога следи да слагање подупире негативан линеаран градијент као доследан модел, али не искључује други облик који би дао исту средњу вредност. Пошто за ово нема писаног правила које би такав избор забрањивало, замерка се води као логички аргумент из саме грађе: закључак о прогенитору важи под претпоставком тог облика. У корист рада, избор није произвољан — циљ (одељак 1.6) био је управо условно постављен (испитати да ли негативан градијент описује расподелу), а облик је посматрачки мотивисан особинама патуљастих сфероидних (dSph) галаксија и репродукује оба посматрана градијента дуж тока.

IV Теоријски увод и приказ литературе о Великом звезданом току и љускама

Увод је, у оном што носи тезу, добро постављен: избор негативног почетног градијента темељно је образложен прегледом посматрања dSph галаксија Локалне групе, а посматрачки циљ (расподела металичности с два градијента и два пика, оријентација, даљине и брзине дуж тока) изложен је тачно и с исправним позивима на изворе. Замерке које следе тичу се приказа туђих резултата и појединих чињеничних података у прегледу — ниједна не дира тезу, методе ни сопствене резултате.

У прегледном делу неколико навода треба разграничити или исправити. Миленијум II симулација приписана је раду Springel и сар. (2005), што је тачно за изворну Миленијум симулацију, али Миленијум II захтева засебну референцу (Boylan-Kolchin и сар. 2009), које у попису нема. Тврдња да су каснији радови N-тело моделом M31 одредили интервал судара на 2–3 Gyr важи за Sadoun и сар. (2014) и Hammer и сар. (2018), али је сврставање рада Miki и сар. (2016) у ту групу непрецизно (истакнута временска скала тог рада је око 0,8 Gyr од првог перицентра), као и опис рада Hammer и сар. (2018) као N-тело модела (реч је о хидродинамичком судару). Од три рада наведена као „посматрачки“ извор параметара халоа M31, рад Widrow, Perrett и Suyu (2003) заправо је полу-аналитички модел фитован на посматрања Kent (1989) и Braun (1991). Откриће NE и W структура приписано је раду Ferguson и сар. (2002), који их мапира али не именује као љуске (идентификацију даје тек Fardal и сар. 2007), а спорна реченица о прогенитору с централним овалом и диском граматички везује за патуљка атрибут који припада моделу M31. Приказ удаљености љуски (NE око 40, W око 20 kpc)

прецењује ивицу NE за двадесетак процената у односу на цитиране изворе. Свака од тих непрецизности лака је и уводна, а рад сродне податке на суседним странама често наводи тачно.

Из истог, уводног слоја потичу и чињенички подаци о типовима галаксија који не улазе ни у један нумерички модел, али их треба исправити. Опсег звезданих маса патуљастих сфероидних галаксија дат је као 10^7–10^{10} $M_\odot$, што прецењује стварне вредности за неколико редова величине — посматране dSph имају звездане масе реда 10^3–10^7 $M_\odot$ (McConnachie 2012; Mateo 1998), а тако висок опсег коси се и с апсолутном магнитудом наведеном у истој реченици. Маса супермасивне црне рупе у M87 дата је као ~10^9 $M_\odot$, док мерење даје $(6{,}5 \pm 0{,}7)\cdot 10^9$ $M_\odot$ (Event Horizon Telescope Collaboration 2019); поента реченице — да је реч о првој директно снимљеној супермасивној црној рупи — тачна је, али би прецизније било и рећи да је прва директно снимљена, пошто су такве црне рупе раније посматране посредно. Удео гаса 4%–25% и његов раст ка каснијим спиралним типовима верно су пренети из рада Young и Knezek (1989), уз ситну непрецизност да извор даје однос према динамичкој, а не видљивој маси. Космолошки удели слажу се с вредностима из Planck 2018, али је ознака Ω_m нескладно употребљена за тамну материју, док она по конвенцији означава укупну материју. Пошто ови подаци не улазе у моделе — масе симулираних галаксија задате су независно у поглављу 2 — реч је о чињеничким исправкама у уводном прегледу, које тезу не додирују.

V Модели галаксија, почетни услови и нумеричка поставка

Поглавље 2 садржи и добро мотивисане изборе и највећи део методолошких замерки рада. У корист рада: избор односа барионске и тамне масе патуљка образложен је применљивошћу на галаксије Локалне групе (Brook и сар. 2014), критеријум равнотеже сваке компоненте изричито је наведен — „Za stabilan model uzima se onaj kod koga je za svaku komponentu zadovoljena teorema virijala“ (стр. 38) — а модели се генеришу стандардним, рецензираним пакетом изведеним из равнотежне дистрибуционе функције.

Прва група замерки је формална и не дира резултате, али је вредна исправке. Поасонова једначина у прегледном делу написана је с погрешним предзнаком ($\nabla^2\Phi = -4\pi G\rho$ уместо $+4\pi G\rho$), што је у нескладу и с изразом за Њутнов потенцијал у истом раду; по стандардној конвенцији уз привлачну гравитацију и негативан потенцијал важи $+4\pi G\rho$ (Binney & Tremaine 2008, j. 2.10). Безсударна Болцманова једначина има погрешан предзнак члана с потенцијалом и није изједначена с нулом. Запис профила централног овала одступа од каноничног облика пакета (Widrow, Pym & Dubinski 2008): изостаје коефицијент, а знак у експоненту је премештен; у запису генерализованог NFW профила халоа стоји сувишан нормализациони фактор; у изразу за потенцијал диференцијал је означен као елемент брзине уместо

запреминског елемента; а иста ознака за радијус халоа мења значење у суседним једначинама (скала дужине наспрам радијуса одсецања). Све су то стварне, али чисто формалне омашке: потенцијал и силу рачунају пакети GalactICs и Gadget2 у исправном облику, па се погрешно сложене једначине не преносе ни на један резултат. Из истог реда су и ситне нумеричке непрецизности — јединица масе пакета GalactICs наведена је с одступањем од око 2,8% од вредности која следи из усвојених јединица, резолуција је у тексту заокружена на ред величине (тачне масе честица стоје у Табели 1), а исказ да је тамни хало двадесет пута масивнији од барионског дела заправо се односи на однос укупне и звездане масе.

Друга група замерки погађа нумеричку поставку и поновљивост, и ту је језгро озбиљније. За све честице коришћена је јединствена дужина ублажавања ε = 100 pc, иако су масе честица врло различите (у моделу M31 барионске и тамне честице разликују се за ред величине, а патуљак има још лакше честице), без образложења тог избора. Литература о оптималном ублажавању у бесколизионим кодовима показује да оптимално ε зависи и од расподеле масе и од броја честица: „The value of this optimal softening depends both on the mass distribution and on the number of particles used to represent it. For higher number of particles the optimal softening is smaller.“ (Athanassoula, Fady, Lambert & Bosma 2000; в. и Merritt 1996, где ε ∝ N^(−1/3)). У корист рада иде то што је ε мала у односу на скале дужине компоненти (реда kpc), па је утицај на глобалну морфологију структура ограничен, и што наменске студије конвергенције за избор ε нису уобичајене ни у самој струци (Dehnen & Read 2011).

Тежа је, међутим, чињеница да рад нигде не приказује ни развој модела у изолацији пре судара (да би се показало да мирују и да се профили и однос 2T/|Ω| одржавају), ни анализу конвергенције по броју честица, ублажавању и временском кораку. То није ситница за ову врсту рада. Дефинишући рад коришћеног пакета сам упозорава да су његови модели равнотежни, али подложни неаксисиметричним нестабилностима — „it is susceptible to non-axisymmetric instabilities and therefore provides a natural starting point for numerical studies of galactic dynamics.“ (Widrow, Pym & Dubinski 2008) — управо зато што стабилност у симулацији треба проверити; неравнотежни почетни услови воде вештачкој промени профила и убрзаном плимском распаду сателита (Kazantzidis, Magorrian & Moore 2004), а формални критеријуми конвергенције профила и кружних брзина одавно су дати (Power и сар. 2003). У корист рада: пакет GalactICs изводи почетне услове из (готово) самоусаглашене равнотежне дистрибуционе функције, па су модели по конструкцији приближно равнотежни, а тврдња о равнотежи није произвољна. Ипак, без изричитог теста стабилности и конвергенције поузданост динамичких структура остаје непотврђена онолико колико би могла бити.

С поновљивошћу иде и то што кодови (Gadget2, GalactICs) нису наведени ни с бројем верзије, ни с адресом преузимања, ни с опцијама превођења, и што рад нема изјаву о доступности података — почетни услови, параметарски фајлови, излази и програми за обраду нису депоновани ни потпуно описани. Начела цитирања софтвера траже управо навођење тачне верзије коришћеног програма (Smith, Katz & Niemeyer 2016, начело специфичности), а начела поновљивог рачунарског истраживања траже архивирање тачних верзија и јаван приступ подацима и скриптама (Sandve и сар. 2013; Wilkinson и сар. 2016). Часопис у коме је аутор објавио — Monthly Notices of the Royal Astronomical Society — изричито тражи изјаву о доступности података: „The inclusion of a Data Availability Statement is a requirement for articles published in MNRAS.“ У корист рада: оба кода наведена су својим дефинишућим рецензираним радовима (што је уобичајен и прихваћен начин навођења средства), а модели M31 и патуљка за GSS потпуно су задати масама и бројем честица (Табеле 1 и 3), па се могу регенерисати. Конкретна и тежа тачка овде је Табела 2: за осам сценарија патуљка из поглавља 3 не даје ни број честица ни масу честице, па се њихова масена резолуција не може реконструисати из рада. Ове замерке овај осврт не узима за суштинскуману која дира резултате, него за препоруку да се у монографском издању додају верзија кодова, изјава о доступности и недостајући параметри Табеле 2.

VI Симулације судара спиралне и патуљасте галаксије

Поглавље 3 је по замисли морфолошко и квалитативно, и вредно је као контролисан оглед: „Jedino je variran“ поменути чинилац, при истој маси и почетном растојању, а резултати су објављени у рецензираном раду (Milošević 2022). У тим оквирима, међутим, стоји неколико замерки које се воде као логички аргумент из саме грађе, јер за њих нема писаног правила.

Сви кључни искази поглавља — број токова и љуски, њихове удаљености, време распада остатка — изведени су визуелним очитавањем мапа честица и мапа површинске густине (снимци на кораку реда 0,1–0,2 Gyr), без бројчане мере: без криве везане масе остатка, без измерених удаљености с грешком, без алгоритма пребрајања. Тврдња да за две морфологије љуске нису једнако интензивне, односно масивне, почива на очитавању боје с мапа чија легенда није калибрисана на масу, па израз масивније прекорачује оно што слика непосредно показује. Општи закључци изведени су, уз то, из једне масе, једног односа маса, једног растојања и по једне реализације по сценарију, без процене расипања међу реализацијама, па их треба читати као демонстрацију типова структура за ту конфигурацију, а не као статистички поткрепљено уопштавање.

Једно дијагностичко правило заслужује посебну реч, јер је најизложеније. Резиме тврди: „Ukoliko se formiraju dva zvezdana toka, možemo pouzdano pretpostaviti da je roditeljska galaksija patuljasta sa diskom.“ (стр. 55). Тако постављено, правило је преоштро: број токова временски је променљив (за диск-моделе D3 и D9 рад најпре бележи један, па два тока), па реч „поуздано“ важи само у развијеном делу судара и уз израженост токова, а не независно од тренутка посматрања ни од распона маса и растојања. Из истог реда је и мања унутрашња неусаглашеност — остатак сфероидне патуљасте на једном месту се „распада“ већ после првог перицентра, а на другом готово потпуно тек после два: разлика је степенована, али би доследнија терминологија о једном од главних исхода поглавља била на месту.

Посебну пажњу тражи поузданост тврдње о времену распада остатка сателита, јер је она нумерички осетљива. Показано је да недовољна масена или сила резолуције и неадекватно ублажавање производе вештачки плимски распад подхалоа — „inadequate force-softening, which causes excessive mass loss and artificial tidal disruption“ (van den Bosch & Ogiya 2018) — и да за такве случајеве постоје проверљиви критеријуми поузданости. Рад не показује да су његови остаци изнад тог прага, па би у наставку истраживања требало разграничити физички распад од нумеричког. Уз то иду и лектурске омашке, укључујући и ону у натпису Слике 3.1 („miijarde“), које не мењају смисао али их треба исправити.

VII Велики звездани ток: динамика, металичност и поређење с посматрањима

Ово је најјаче поглавље рада и место његовог оригиналног доприноса, изнад свих замерки. Репродукција посматране расподеле металичности дуж тока по деветнаест поља, објашњење два пика двема кинематичким групама и дисциплиновано одбацивање везе с ранијом компонентом (стр. 83) чине целину коју ранији радови нису дали, а поређење је вођено поштено — рад изричито наводи и поља у којима слагања нема (прво поље контаминирано халоом, два спољна поља за брзине).

Замерке овог поглавља већим делом су већ изречене у одељку III, јер потичу из методске поставке заједничке целом раду: непондерисана и непрецизно описана мера слагања, испитан само један облик почетне расподеле, ±0,2 као распон а не грешка, Монте Карло који узоркује само металичност. Овде их не треба понављати, него сместити у контекст поглавља. Три поређења дају нешто различите тренутке најбољег слагања — брзине 2,4–2,5 Gyr, попречни градијент 2,4 Gyr, металичност дуж тока 2,9 Gyr — а рад бира 2,9 Gyr. Тај избор је образложен (деветнаест густо распоређених поља дуж тока наспрам свега четири попречна и два одступајућа спољна поља за брзине) и физички смислен, јер структуре не настају истовремено; али би формално усаглашавање тренутака из различитих критеријума ојачало једнозначност процене. Закључци о расподели металичности почивају, најзад, на

обележавању бесколизионих честица сталном металичношћу, пошто модел нема гас ни формирање звезда; то је стандардан и примерен поступак за практично безгасне dSph сателите, а рад је о њему потпуно отворен.

Формалне омашке овог поглавља лаке су: опис Табеле 4 упућује угаоне координате поља на једначине густине и потенцијала уместо на једначине којима су координате дефинисане; натпис Слике 4.17 двоструко греши (упут на погрешну слику и погрешне панеле), док суседни натпис исто повезивање даје тачно; издање Gilbert и сар. (2018) наведено је у тексту, али не и у натписима двеју слика; записана линеарна функција металичности изоставља централни члан, па при нултом радијусу даје нулу уместо централне вредности из самог модела; а децимални знак се наизменично пише тачком и зарезом. Последње је вредно једне напомене о стандарду: децимални зарез је у српском уобичајен (Правопис српскога језика, Матица српска, 2010), али се знак не сме мешати, а међународни стандард то изричито тражи за табеле — „For numbers in a table, the format used should not vary within one column.“ (BIPM, SI брошура, 9. изд., 2019).

VIII Звездане љуске NE и W

Поглавље 5 доводи модел до краја: истим негативним радијалним градијентом репродукује се металичност и тока и обе љуске, чиме је сценарио јединственог судара физички доследно затворен. Поређење за NE љуску квантитативно је и поштено — по пет поља, с изричито наведеним одступањем: „Za vremenski interval izmedu 2,4 i 2,7 milijardi godina imamo podudaranje sa posmatranim vrednostima za sva posmatračka polja“ (стр. 92), уз отворено признање да у самим љускама градијент није уочен — „ne možemo uočiti neki gradijent u NE ljusci“ (стр. 92). Све је фиксирано осим почетне расподеле, што омогућава чист тест управо тог чиниоца.

Замерке су доследне поставци и воде се, где нема писаног правила, као логички аргумент. Поређење за W љуску сведено је на једну средњу вредност и изричито означено као квалитативно — „radi kvalitativnog poredenja“ (стр. 92) — јер појединачне вредности по пољима за W нису објављене; отуда тежину теста носи NE љуска, а W служи као слабији, допунски показатељ доследности. Слагање средњих вредности при том не искључује други облик расподеле исте средње вредности, па је реч „оправдава“ (у тврдњи да слагање металичности љуски оправдава линеарни облик почетне расподеле) прејака: слагање подупире негативан линеаран градијент као доследан модел, али не и као једини могући. Најбоље слагање за поједине структуре, даље, пада у различите тренутке (NE 2,4–2,7, W 2,7–2,9, ток 2,9 Gyr) баш зато што структуре настају секвенцијално, па временско ограничење судара није један тренутак него интервал 2,4–2,9 Gyr — физички очекиван, али шири него што би јединствен тренутак дао.

Носећа тврдња о првенству у закључку поглавља тражи разграничење. „Prvi put smo dali objašnjenje raspodele metaličnosti u GSS i zvezdanim ljuskama.“ (стр. 96) у безусловном облику је непрецизно: концепт објашњења расподеле преко градијента прогенитора увели су раније радови које дисертација сама цитира (Miki и сар. 2016; Kirihara и сар. 2017; Fardal и сар. 2008). Пошто за оцену првенства нема писаног мерила, замерка се води као логички аргумент из грађе: оригиналан допринос који стварно стоји јесте прва квантитативна репродукција посматране расподеле дуж тока по деветнаест поља с два пика приписана најмање двема кинематичким групама, и истовремено металичности NE и W љуске поређене с посматрањима (Escala и сар. 2022) — а не безусловно првенство у моделирању металичности структура уопште. Тврдњу у закључку треба тако разграничити. Из истог круга је и уопштавање главног новог закључка са испитане конфигурације (сфероидна dSph одговарајуће масе, линеаран облик коме је варирана само магнитуда) на опште својство прогенитора; рад ту границу делом и сам признаје — „Morfologija same galaksije je otvoreno pitanje“ (стр. 96) — па би домет закључка требало изричито ограничити на испитану конфигурацију. Формалне омашке поглавља лаке су: распони времена у телу текста и у натпису Слике 5.6 не слажу се међусобно ни са стварним панелима; натпис Слике 5.3 упућује на непостојећу слику; Слика 5.1, дословно преузета из туђег рада, задржава и поља која поглавље не обрађује, што натпис не помиње; а формулација о пет посматрачких поља у NE и W љусци непрецизна је, јер пет поља важи за NE.

IX Једначине, слике, табеле и језик

Формални слој рада уредан је у нумерацији и садржају, али носи низ ситних омашки које ваља сабрати на једном месту. У једначинама прегледног и модел-дела јављају се погрешни предзнаци (Поасонова и безсударна Болцманова једначина), неканонични записи профила и пренете ознаке диференцијала и радијуса (в. одељак V) — све формалне природе, без последица по резултате које рачунају пакети. У унакрсним упутима поткрало се неколико грешака: Табела 4 упућује на погрешне једначине, натпис Слике 4.17 на погрешну слику и панеле, натпис Слике 5.3 на непостојећу слику, а натпис Слике 1.8 на погрешну слику. Јединица Хаблове константе одштампана је непотпуно (без друге косе црте; SI брошура, 9. изд., 2019, изричито каже да се коса црта у истом изразу не сме употребити више од једном без заграда), знаци децималне тачке/зареза и множења (× и ·) мешају се (в. одељак VII о SI брошури, 9. изд., 2019, и Правопис Матице српске, 2010), а ознака објекта у центру Млечног пута написана је погрешно (треба Sgr A*). Устаљени енглески израз за хијерархијски сценарио („bottom-up“) наведен је као „bottom-top“, а наслов Хабловог рада из 1926. одштампан је с грешком.

Терминолошки, за bulge се доследно користи „centralni oval“, а структуре које део изворне литературе за M31 назива „shelf“ рад доследно преводи као „ljuska“ (енгл. „shell“). Ови избори су описно разумљиви и доследно спроведени, а физички је реч о истим објектима; домаћи уџбеник уже области (Ангелов 2013) постоји као ослонац за устаљенију терминологију, па би у монографском издању вредело ускладити превод с изворним термином тамо где се позива на изворе који користе „shelf“. Уз то стоји и низ словних омашки које не мењају смисао (нпр. „miijarde“, „posmtranja“, „galaskije“), укључујући и понеку у натпису слике; све су лектурске и не дирају садржај.

X Научни апарат

Апарат је, у оном што чини основ научног навођења, уредан, и то ваља рећи пре замерки. Усклађеност позивања и пописа литературе потпуна је у оба смера — свако позивање у тексту разрешава се на постојећу јединицу, а свака од стотину шездесет јединица пописа заиста се и цитира — а слажу се и све ознаке издања. Извори преузетих слика уредно су наведени (двадесет пет натписа), посредног цитирања нема, а темељни радови цитирани су из изворника. Тиме је испуњен изричит захтев обавезујућег упутства Универзитета: „У попису литературе не сме бити радова који нису цитирани, ни оних на које се у раду не упућује.“ (Упутство о облику и садржају докторске дисертације, Универзитет у Београду, 24.05.2016). Литература је савремена и добро покрива скорашњи период.

Замерке апарату које стоје лаке су и претежно редакцијске. Две јединице за исти рад (Miki и сар. 2016a и 2016b) носе идентичну свеску и страну, па су ознаке a/b сувишне — реч је о транскрипционој омашци при уносу, коју треба свести на једну јединицу, а не о непостојећем извору. У једној библиографској јединици спојена су презимена коаутора без зареза и иницијала (Widrow, Perrett и Suyu 2003). Мрежни уџбеник (Bovy 2023) — једини мрежни извор у попису — наведен је без издавача, адресе и датума приступа, што одступа од формата осталих јединица и захтева међународног стандарда за мрежне ресурсе (ISO 690:2021); јединица је ипак идентификована аутором, насловом и годином и служи као општа референца. Назив кода пише се недоследно („Gadget2“, „Gadget 2“, „Gadget-2“), а један натпис слике меша приповедни и заградни облик навођења — козметичке недоследности које не изазивају двосмисленост. О изостанку верзије кодова и изјаве о доступности података већ је речено у одељку V, где им је и место. Најзад, сопствено саопштење о утицају дужине ублажавања на стабилност спиралних галаксија, методолошки везано за избор ϵ у овом раду, могло је бити наведено; његово навођење ојачало би образложење тог избора, док остала конференцијска саопштења не морају бити у попису.

XI Однос рада и реферата комисије

Извештај Комисије оцењује да дисертација „представља целовито научно дело“ и да је кандидат „показао самосталност у раду и широко познавање области вангалактичке астрономије“. Тај део оцене одговара стању у тексту: метод је стварно спроведен, концепт је промишљен, а рад доноси оригиналан допринос о коме је било речи.

Формална страна поступка уредна је према важећим прописима. Услов објављеног рада пре одбране испуњен је — поглавље 4 везано је за рад у категорији M21 у коме је кандидат први аутор, а извештај тачно наводи два рада са SCI листе (један као први аутор у M21, други самостално у M23); категорије су у складу с важећим правилником о вредновању (Правилник о поступку и начину вредновања научноистраживачких резултата, Службени гласник РС бр. 24/2016). Рад је депонован у репозиторијуму заједно с извештајем, што одговара обавези јавне доступности (Закон о високом образовању, Службени гласник РС бр. 88/2017, чл. 40), и садржи све обавезне делове према упутству Универзитета (насловне стране на два језика, податке о комисији, сажетке, садржај, поглавља, литературу, биографију и потписане изјаве); празно поље „Datum odbrane“ одговара стању пре одбране. То што извештај не наводи датум пријаве теме ни именовања комисије није формални пропуст, јер прописана садржина извештаја те датуме и не тражи.

Две оцене извештаја, међутим, траже разграничење према стању у тексту, при чему ниједна не руши рад. Прва је „важна претпоставка рада“ да се почетном расподелом металичности у патуљку „може објаснити расподела металичности у Великом звезданом току и звезданим љускама“: та претпоставка јесте поткрепљена, али не строго тестирана — за једну форму, масу и орбиту, непондерисаном мером без прага, а за W љуску само наспрам једне средње вредности (в. одељке III и VIII; Andrae 2010; Andrae, Schulze-Hartung & Melchior 2010). Друга је оцена да је „По први пут је објашњена ова расподела, помоћу почетне расподеле металичности у патуљастој галаксији пре судара“ — формулација која преузима безусловно првенство из самог рада и коју треба разграничити спрам ранијих реконструкција почетног градијента (Miki и сар. 2016; Kirihara и сар. 2017; Fardal и сар. 2008), баш као што је показано у одељку VIII. Оно што у пуном обиму стоји и што извештај тачно издваја јесте објашњење два пика као привремених структура које настају при постојању најмање две кинематичке групе звезда — то је проверљив и оригиналан налаз.

XII Шта остаје

Кад се све сабере, добија се оцена коју вреди изрећи у једном комаду, без ублажавања и без претеривања.

Дисертација Станислава Милошевића солидан је и добро изведен нумерички рад који вангалактичкој динамици доноси целовит, физички доследан модел настанка морфолошких подструктура у халоу M31: истим негативним радијалним градијентом металичности у патуљастом сателиту репродукује се посматрана расподела металичности дуж Великог звезданог тока — укључујући два пика, која су по први пут објашњена двема кинематичким групама честица — и металичност NE и W звездане љуске, све у једном сударном сценарију. Уз то доноси и контролисан оглед о утицају морфологије сателита на настале структуре. Рад одликује ретка методолошка уздржаност: где год метод нешто не може, то се отворено каже. Резултати су објављени у рецензираним часописима, а тамо где су се могли проверити, држе.

Слабости су, по оцени овог осврта, тројаке, и ниједна не руши носеће тезе. Прва је мера и исказ поузданости: носећа процена времена формирања почива на непондерисаној мери одступања коју текст погрешно назива збиром квадрата, без пондерисања грешкама посматрања, без прага и без усаглашавања времена која дају различити критеријуми, а исказана неодређеност почетног градијента заправо је распон претраге, не грешка процене. Друга је опсег испитаног: закључак о облику почетне расподеле изведен је из једног функционалног облика, једне масе, једне морфологије и по једне динамичке реализације, па важи под тим претпоставкама, а тврдња о првенству изнета је шире него што грађа носи. Трећа је нумеричка поткрепа и поновљивост: рад не приказује ни тест стабилности модела у изолацији ни анализу конвергенције, задржава јединствену дужину ублажавања за честице различитих маса, не разграничава физички од могућег нумеричког распада остатка, и не даје ни верзије кодова ни изјаву о доступности података.

Изнад свега тога стоји једна правилност која иде у прилог раду: где год се могло проверити рачунски и према изворима, рад је поуздан, а највећи део онога што треба поправити већ је негде у раду тачно урађено или отворено назначено као ограничење — само на погрешном месту, недоследно спроведено или прешироко изречено.

Пет измена биле би, по оцени овог осврта, најплодније у евентуалном монографском издању или у наставку истраживања. Прво, заменити меру слагања пондерисаним хи-квадратом с грешкама посматрања и прагом, ускладити њен опис с једначином и изричито усагласити тренутке најбољег слагања из различитих критеријума (Andrae 2010; Andrae, Schulze-Hartung & Melchior 2010; Hogg, Bovy & Lang 2010). Друго, испитати алтернативне облике почетне расподеле (позитиван, нулти, нелинеаран) и, по могућству, више од једне масе и морфологије, означити ±0,2 изричито као распон претраге и допунити запис функције металичности централним чланом. Треће, додати тест стабилности модела у изолацији и анализу конвергенције (број честица, ублажавање, временски корак), разграничити физички од нумеричког

распада остатка сателита и пропагирати неодређеност почетних услова кроз Монте Карло поступак (Power и сар. 2003; van den Bosch & Ogiya 2018; Widrow, Pym & Dubinski 2008; Kazantzidis, Magorrian & Moore 2004; JCGM 101:2008), уз допуну Табеле 2 бројем и масом честица. Четврто, разграничити тврдњу о првенству и изричито именовати оно што је ново спрам ранијих модела градијента прогенитора. Пето, додати верзије кодова, адресу и изјаву о доступности података (Smith, Katz & Niemeyer 2016; захтев часописа MNRAS), исправити ситне омашке апарата и уводног прегледа и уједначити децимални и множилачки знак (SI брошура, 9. изд., 2019).

Уз ту врсту редакције — која у највећем делу не тражи ново истраживање, изузев испитивања алтернативних облика и провере конвергенције, што су природан наставак — ова дисертација остаје вредан и употребљив допринос, чији би јединствени ударни модел и објашњење расподеле металичности имали шта да кажу и ужем стручном читаоцу и уредништву часописа изван непосредне теме рада.

Литература

Предмет осврта

Милошевић, Станислав, *Numeričke simulacije sudara galaksija i nastanka morfoloških podstruktura* [докторска дисертација]. Математички факултет Универзитета у Београду, 2023. (НаРДуС.)

Извештај Комисије за преглед и оцену докторске дисертације Станислава Милошевића, Математички факултет Универзитета у Београду, 17.07.2023.

Нумеричке симулације N-тела, равнотежа и конвергенција

Athanassoula, E.; Fady, E.; Lambert, J. C.; Bosma, A., „Optimal softening for force calculations in collisionless N-body simulations“, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 314, 2000, 475–488.

Dehnen, W.; Read, J. I., „N-body simulations of gravitational dynamics“, *European Physical Journal Plus*, 126, 2011, 55.

Merritt, D., „Optimal Smoothing for N-Body Codes“, *The Astronomical Journal*, 111, 1996, 2462–2464.

Power, C.; Navarro, J. F.; Jenkins, A.; Frenk, C. S.; White, S. D. M.; Springel, V.; Stadel, J.; Quinn, T., „The inner structure of ΛCDM haloes – I. A numerical convergence study“, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 338, 2003, 14–34.

van den Bosch, F. C.; Ogiya, G., „Dark Matter Substructure in Numerical Simulations: A Tale of Discreteness Noise, Runaway Instabilities, and Artificial Disruption“, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475, 2018, 4066–4087.

Widrow, L. M.; Pym, B.; Dubinski, J., „Dynamical Blueprints for Galaxies“, *The Astrophysical Journal*, 679, 2008, 1239–1259.

Kazantzidis, S.; Magorrian, J.; Moore, B., „Generating Equilibrium Dark Matter Halos: Inadequacies of the Local Maxwellian Approximation“, *The Astrophysical Journal*, 601, 2004, 37–46.

Springel, V., „The cosmological simulation code GADGET-2“, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 364, 2005, 1105–1134.

Мера слагања, процена грешака и Монте Карло

Andrae, R., „Error estimation in astronomy: A guide“, arXiv:1009.2755 [astro-ph.IM], 2010.

Andrae, R.; Schulze-Hartung, T.; Melchior, P., „Dos and don’ts of reduced chi-squared“, arXiv:1012.3754 [astro-ph.IM], 2010.

Hogg, D. W.; Bovy, J.; Lang, D., „Data analysis recipes: Fitting a model to data“, arXiv:1008.4686 [astro-ph.IM], 2010.

JCGM 101:2008, *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ — Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, BIPM/JCGM, 2008.

Поновљивост рачунарског истраживања и цитирање софтвера

Sandve, G. K.; Nekrutenko, A.; Taylor, J.; Hovig, E., „Ten Simple Rules for Reproducible Computational Research“, *PLoS Computational Biology*, 9(10), 2013, e1003285.

Smith, A. M.; Katz, D. S.; Niemeyer, K. E. (FORCE11 Software Citation Working Group), „Software citation principles“, *PeerJ Computer Science*, 2, 2016, e86.

Wilkinson, M. D. и сар., „The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship“, *Scientific Data*, 3, 2016, 160018.

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (Oxford University Press), *General Instructions for authors* — одељци „Data Availability Statement“, „References and citations“ и „Units“ (снимак Internet Archive-а од 19.05.2023).

Јединице, ознаке и библиографско навођење

BIPM, *Le Système international d’unités / The International System of Units* (SI брошура), 9. изд., 2019 (издање важеће јуна 2023).

ISO 690:2021, *Information and documentation — Guidelines for bibliographic references and citations to information resources*, 4. изд., ISO, 2021.

Правопис српскога језика, Матица српска, Нови Сад, 2010 (измењено и допуњено издање).

Ангелов, Т., *Звездана астрономија*, Математички факултет Универзитета у Београду, 2013.

Формални оквир докторских студија (важећи на рок)

Закон о високом образовању, „Службени гласник РС“, бр. 88/2017 (важеће закључно са 67/2021), чл. 40.

Правилник о докторским студијама на Универзитету у Београду, пречишћен текст, октобар 2022 (чл. 23 и 34).

Упутство о облику и садржају докторске дисертације која се брани на Универзитету у Београду, Гласник Универзитета у Београду бр. 191, 24.05.2016.

Правилник о поступку, начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача, „Службени гласник РС“, бр. 24/2016, 21/2017, 38/2017.

Астрофизички извори за упоредне наводе (садржина се не мења с временом)

Planck Collaboration, „Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters“, *Astronomy & Astrophysics*, 641, 2020, A6.

Binney, J.; Tremaine, S., *Galactic Dynamics*, 2. изд., Princeton University Press, 2008.

Boylan-Kolchin, M.; Springel, V.; White, S. D. M.; Jenkins, A.; Lemson, G., „Resolving cosmic structure formation with the Millennium-II Simulation“, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398, 2009, 1150–1164.

de Vaucouleurs, G., „Recherches sur les nébuleuses extragalactiques“, *Annales d’Astrophysique*, 11, 1948, 247–287.

Event Horizon Telescope Collaboration, „First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole“, *The Astrophysical Journal*, 875, 2019, L1.

Mateo, M., „Dwarf Galaxies of the Local Group“, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36, 1998, 435–506.

McConnachie, A. W., „The observed properties of dwarf galaxies in and around the Local Group“, *The Astronomical Journal*, 144, 2012, 4.

Young, J. S.; Knezek, P. M., „The Variation of Molecular and Atomic Gas Fractions in Galaxies as a Function of Morphological Type“, *The Astrophysical Journal*, 347, 1989, L55–L58.