

РОЗПОДІЛ ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ В ГАЛО БЛИЗЬКИХ ГІГАНТСЬКИХ ГАЛАКТИК

Для чотирьох близьких гігантських галактик (M81, NGC3368, Молочний шлях, M31) за кінематикою їх супутників побудовані профілі зростання орбітальних мас в залежності від припливного індексу, а також профілі густини темної матерії гало. Оцінені частини маси гало між віріальними радіусами та радіусами поверхні нульової швидкості.

Вступ. Одною з невирішених проблем космології є характер розподілу темної матерії (ТМ) відносно видимої речовини. Зокрема ця проблема виявляється у невідповідності локальних оцінок відносної густини ТМ з глобальною густиною $\Omega_m \cong 0.26$ [1]. Наприклад, підсумовування віріальних мас груп та скупчень у об'ємі радіусом 50 Мпк дало оцінку локальної густини $\Omega_m \cong 0.08 \pm 0.02$ [2], тобто більш ніж у три рази меншу за глобальну середню густину. Низькі значення локальної густини підтверджувались і в інших роботах, наприклад в [3]. Обговорюються [4] три можливі причини: а) групи та скупчення оточені темними ореолами, їх основна маса знаходиться за межами віріального радіуса, б) Місцевий об'єм (МО) не є репрезентативним, оскільки розташований всередині гігантського войда, с) основна частина матерії не прив'язана до світних груп та скупчень, а розподілена між ними у вигляді масивних темних згущень. Автор [4] схиляється до третьої причини, а проти першої є такий факт. В роботі [5] було показано, що повна маса скупчення Діви, $M_T = (8.0 \pm 2.3) \cdot 10^{14} M_{Sun}$, яка визначена в межах радіуса d_0 поверхні нульової швидкості, не сильно відрізняється від віріальної маси $M_{vir} = (7.0 \pm 0.4) \cdot 10^{14} M_{Sun}$ в межах віріального радіуса d_{vir} , тобто у шарі від d_{vir} до d_0 знаходиться 12% від повної маси. Аналогічна ситуація має місце і навколо Місцевої групи галактик [6]. Для пояснення парадоксу "загубленої ТМ" треба шукати нові спостережні дані.

За останні 15 років були проведені масові вимірювання відстаней до найближчих галактик кількома спостережними командами, спираючись на унікальну роздільну здатність Космічного телескопа імені Габбла. Використання зір кінцівки гілки червоних гігантів (TRGB, Tip of Red Giant Branch) за "стандартну свічку" (див. [7]) дозволило визначити відстані до більш ніж 300 найближчих галактик з похибкою $\sim 10\%$. Результатом цієї роботи став, зокрема, каталог UNGC (The Updated Nearby Galaxy Catalog [8]), який містить найбільш повне зведення різних спостережуваних характеристик для ~ 800 галактик, розташованих в межах 11 Мпк. UNGC на даний час є найбільш повною і однорідною вибіркою сусідніх галактик, для більшості з яких відомі просторові координати, світності та променеві швидкості. На відміну від більшості каталогів, обмежених за потоком, ця вибірка є обмеженою за відстанню. Це робить UNGC найбільш придатним для порівняння зі спостереженнями на масштабах МО ($\sim 0,1-10$ Мпк) результатів моделювання розподілу ТМ.

На основі даних з каталогу UNGC у [9] було оцінено орбітальні маси 15 великих галактик Місцевого об'єму, що мають найбільшу кількість супутників, зокрема Молочного шляху (Milky Way, MW) та галактики M31 в Андромеді. В даній роботі ми робимо спробу за наявними даними для вказаних 15 галактик оцінити профілі зростання орбітальних мас в області до поверхні нульової швидкості, та перевірити гіпотезу про "темну периферію" гігантських світних галактик серед розглянутих у [9]. При цьому ми не використовуємо жодної теоретичної моделі розподілу ТМ, лише спостережну залежність орбітальної маси від припливного індексу, який визначає відстань від галактики до її супутників.

Орбітальні маси близьких галактик. Визначення мас груп галактик з використанням даних про їх променеві швидкості та взаємні відстані є одною з класичних задач позагалактичної астрономії. Бекол та Тримейн [10] запропонували метод, що ґрунтується на понятті проекційної маси $q \equiv G^{-1}(\Delta V)^2 R_p$, де ΔV – радіальна компонента швидкості галактики відносно центра групи, R_p – проекційна відстань у картинній площині відносно центра. Ними було показано,

що для сферично симетричної системи середнє значення $\langle q \rangle = \frac{\pi M}{32} (3 - 2\langle e^2 \rangle)$. У випадку, коли у групі домінує за масою одна галактика ("патрон" групи), що оточена карликовими супутниками, з наведеного значення $\langle q \rangle$ отримують оцінку маси "патрона" в залежності від середнього квадрата ексцентриситета:

$$M_{orb} = \frac{32}{\pi G} (3 - 2\langle e^2 \rangle)^{-1} \langle (\Delta V)^2 R_p \rangle, \tag{1}$$

де ΔV та R_p відраховуються відносно швидкості та положення "патрона".

Оцінку (1) називають орбітальною масою. У випадку нехтовно малих мас супутників орбітальна маса є оцінкою і головної галактики, і всієї групи. Середній квадрат ексцентриситета варіюється на фактор 3 між чисто радіальними ($e=1$) та чисто коловими ($e=0$) орбітами. При ізотропному розподілі швидкостей на орбітах з різними ексцентриситетами часто приймається $\langle e^2 \rangle = 1/2$. При обчисленні орбітальних мас в [9] приймалася ця умова на середній ексцентриситет орбіт. У даному розгляді теж приймається така умова.

Радіальні профілі темної матерії. На основі даних каталогу UNGC [8] був складений в [11] список "почтів" гігантських галактик в межах МО. При цьому використовувався припливний індекс Θ , що визначається таким чином:

$$\Theta = \max \left[\log \left(M_n^* / d_n^3 \right) \right] + C, n = 1, \dots, N. \tag{2}$$

Тут M_n^* – зоряна маса сусідньої n -ї галактики, d_n – її просторова відстань від галактики, що розглядається. Зоряна маса галактики M^* оцінюється за її світністю L_K у K -смузі з прийняттям $M^*/L_K = M_{Sun}/L_{K,Sun}$ [12]. Ранжування галактик, що оточують певну галактику, за величиною припливної сили $F_n \sim M^*/d_n^3$, дозволило знайти найбільш впливову сусідку, яка позначається як MD (main disturber). Стала $C = -10.96$ у (2) вибрана таким чином, щоби галактика з $\Theta = 0$ знаходилася на сфері нульової швидкості відносно її MD (деталі див. в [13]). Нульове значення Θ розділило потенціальні супутники на гравітаційно пов'язані з "патроном" ($\Theta \geq 0$) та галактики поля ($\Theta < 0$).

У роботі [9] були визначені орбітальні маси 15-и найбільших в межах МО галактик за кінематичними даними для галактик-супутників з $\Theta \geq 0$, тобто за гранично мале значення припливного індексу приймалося $\Theta = 0$. В даній роботі в межах кожного почту ми розглядаємо залежності оцінок орбітальних мас, варіюючи граничним (найменшим) значенням Θ . Тим самим ми будемо спостережні профілі густини темної матерії від логарифма просторової відстані. Дійсно, за означенням (2) припливного індексу в межах почту певного MD маємо зв'язок:

$$\Theta = -3 \log(d/d_0) \quad (3)$$

Тут d_0 – радіус сфери нульової швидкості, якому відповідає нульове значення припливного індексу, d – відстань від центра до супутника. Якщо $M_{orb}(\Theta)$ – спостережна залежність орбітальної маси від граничного (мінімального) значення припливного індексу, то профіль густини темної матерії у разі сферично симетричного розподілу має вигляд:

$$\rho(d) = -\frac{3M'_{orb}(\Theta(d))}{4\pi d^3 \ln 10}. \quad (4)$$

У чисельнику стоїть похідна від $M_{orb}(\Theta)$ за її аргументом Θ .

Якщо обмежитися поліноміальними апроксимаціями поблизу $\Theta = 0$,

$$y \equiv M_{orb}/10^{12} M_{Sun} = \sum_{i=0}^m C_i \Theta^i, \quad (5)$$

де m – ступінь полінома, то профіль густини (4) ТМ поблизу поверхні нульової швидкості представляється у вигляді:

$$\rho(d) = -\frac{3 \cdot 10^{12} M_{Sun}}{4\pi d^3 \ln 10} \sum_{i=1}^m i C_i \Theta^{i-1}. \quad (6)$$

Профілі густини для чотирьох близьких гігантських галактик. З усіх 15-и галактик, для яких в [9] визначені орбітальні маси, побудувати апроксимацію залежності $M_{orb}(\Theta)$ вдалося лише для чотирьох галактик, M81, NGC3368, MW та M31. Ми задалися таким правилом: обчислювати орбітальну масу не менше ніж за шістьма або у крайньому випадку п'ятьма супутниками в об'ємі, що визначається певним Θ . Це вилучило з розгляду дев'ять галактик з п'ятнадцяти. Наприклад, для найбільшої у нашій вибірці галактики NGC4594 ("Сомбреро") набралось шість супутників лише на поверхні нульової швидкості ($\Theta = 0$). Крім того, для двох галактик апроксимація дала зростаючу з Θ лінію, що суперечить фізичному смислу: маса ТМ в зростаючому об'ємі мусить лише зростати. Такі випадки теж були відкинуті. Для решти галактик залежності $M_{orb}(\Theta)$ подаються на чотирьох панелях рис. 1. Штрихові лінії відповідають апроксимації (5) з коефіцієнтами з табл.1. Число в дужках поруч з точкою означає кількість супутників, дані про які були використані для визначення орбітальної маси.

На графіках рис. 1 залежностей $M_{orb}(\Theta)$, точки, що відповідають мінімальній кількості супутників та мінімальному об'ємові, є крайніми лівими. Крайні ліві точки відповідають найбільшим значенням об'єму. При цьому, ми наносимо на графік також точки в інтервалі $\Theta \in [-0.5, 0.0)$ (якщо є такі). Це обумовлено необхідністю контролю залежності $M_{orb}(\Theta)$ поблизу $\Theta = 0$, вважаючи, що через похибки вимірювань точки з $\Theta \in [-0.5, 0.0)$ насправді знаходяться всередині сфери нульової швидкості. Апроксимуючі криві ми будемо будувати, однак (за винятком MW), за точками, що відповідають "фізичним" супутникам, тобто починаючи з $\Theta = 0$ до крайньої правої точки у шкалі значень Θ . Довжини вертикальних ліній позначають похибки визначення орбітальної маси.

Апроксимація вигляду (5) шукалася в класі поліномів не більш як четвертого порядку. Виявилось, що для всіх чотирьох галактик лінійні, а для M31 та NGC3368 і квадратичні складові можуть бути відкинуті внаслідок малої значущості за критерієм Фішера. Особливості апроксимацій для MW і M31 обговорюються нижче. В табл. 1 крім коефіцієнтів поліномів також подані інтервали значень Θ , на яких визначався поліном, а також відповідні інтервали відстані від центра, нормованої на радіус сфери нульової швидкості. У передостанньому стовпчику подані значення стандартного відхилення від лінії регресії та у дужках – їх значення, поділені на C_0 . Останні величини дозволяють порівнювати якість апроксимацій для різних MD в приблизно одному масштабі значень. В останньому стовпчику наведено оцінку χ частини ТМ на периферії гало (див.нижче).

M81 Для цього MD побудована апроксимація представляється найбільш правдоподібною, хоча почет з необхідними даними не є найчисельнішим (26 супутників в межах поверхні нульової швидкості). На Рис. 1а показані визначення орбітальних мас на відрізку $[-0.3, 2.9]$. Штрихова апроксимуюча лінія побудована за точками від $\Theta = 0$ до $\Theta = 2.9$, вона є поліномом четвертого порядку без лінійного члена (див. коефіцієнти в табл. 1). Найбільші відхилення від апроксимуючої кривої відбувається при $\Theta = 1.4$ при приєднанні до вибірки KDG073 та UGC05497, а також при $\Theta = 0.2$ при приєднанні UGC94483. Цікаво, що включення у вибірку галактики M82 з $\Theta = 2.8$ майже не порушує залежності. Профіль густини ТМ:

$$\rho(d) = \frac{10^{11} M_{Sun}}{d^3} \left\{ (8.2 \pm 1.6) \cdot \Theta(d) + (-6.8 \pm 1.8) \cdot [\Theta(d)]^2 + (1.4 \pm 0.5) \cdot [\Theta(d)]^3 \right\}, \quad (7)$$

де $\Theta = \Theta(d)$ задається у (3).

Таблиця 1

Коефіцієнти поліному (5) та інтервали апроксимації

MD	C ₀	C ₂	C ₃	C ₄	Θ	d / d ₀	σ (σ/C ₀)	χ, %
M81	4.92 ± 0.28	-3.95 ± 0.77	2.17 ± 0.59	-0.34 ± 0.12	(0, 2.9)	(0.1080, 1)	0.35 (0.071)	71
N3368	16.9 ± 1.1	-	-15.8 ± 4.0	7.5 ± 2.7	(0.2, 1.5)	(0.3162, 0.8577)	1.64 (0.097)	89
MW	1.566 ± 0.075	-0.78 ± 0.17	0.373 ± 0.073	-0.049 ± 0.012	(-0.5, 3.6)	(0.0631, 1.468)	0.094 (0.063)	52
M31	1.727 ± 0.043	-	0.116 ± 0.019	-0.052 ± 0.006	(0, 3.2)	(0.0858, 1)	0.11 (0.061)	~0

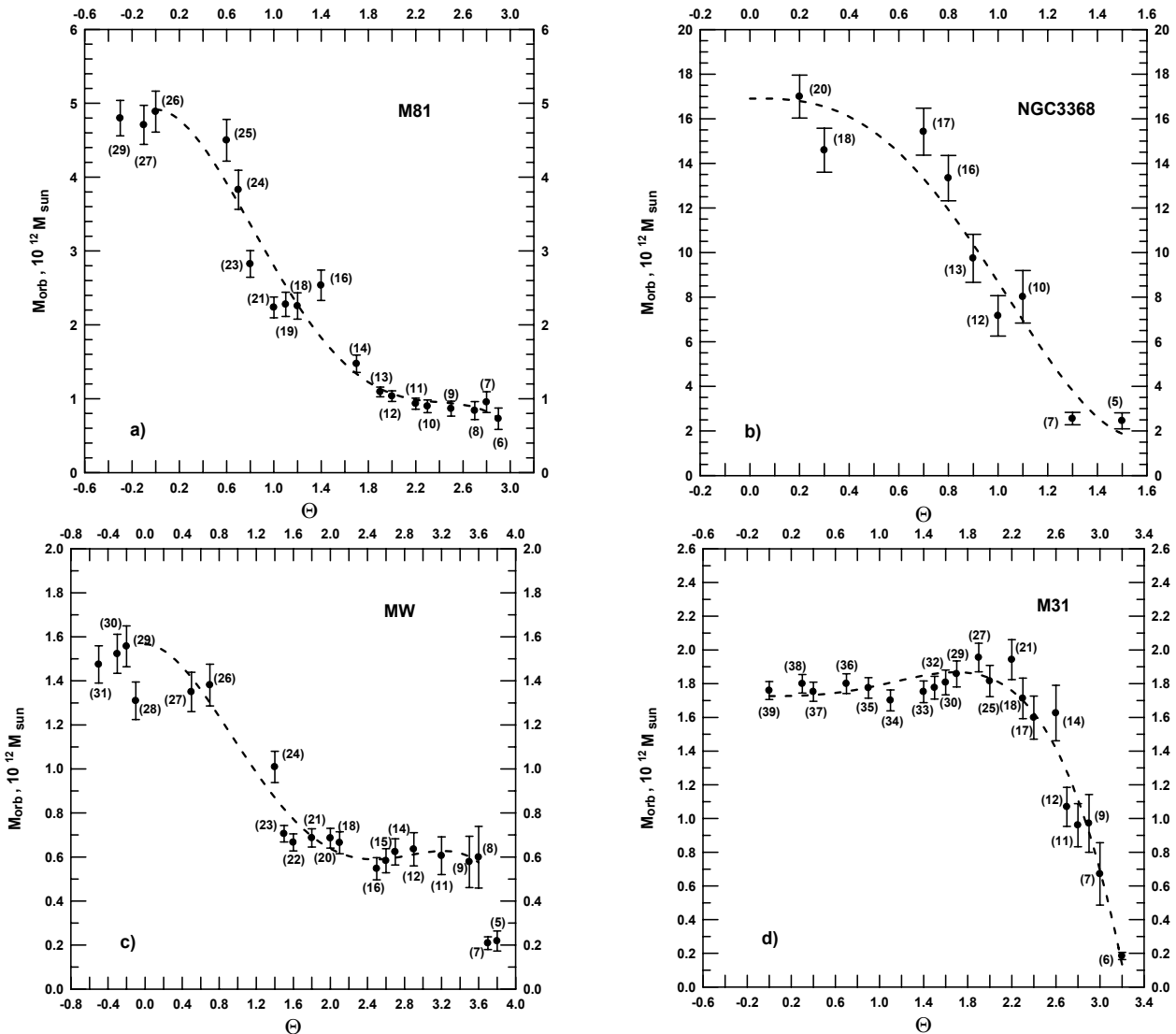


Рис. 1. Залежність орбітальної маси від значення припливного індексу для: а) M81, б) NGC3368, в) MW, г) M31

NGC3368 Значення орбітальної маси в крайній правій точці рис.1b визначено за п'ятьма, а в крайній лівій точці ($\Theta = 0.2$) – за двадцятьма супутниками. Апроксимація, що побудована на інтервалі Θ від 0.2 до 1.5, визначається коефіцієнтами в табл. 1, причому лінійний та квадратичний члени виявилися несуттєвими. Найбільші відхилення: при $\Theta = 0.7$ та $\Theta = 0.3$ при додаванні до вибірки ACG202248 з $\Delta V = 280$ км/с та ACG205156 з $\Delta V = 22$ км/с, відповідно. Профіль густини темної матерії:

$$\rho(d) = \frac{10^{12} M_{Sun}}{d^3} \left\{ (4.9 \pm 1.2) \cdot [\Theta(d)]^2 + (-3.1 \pm 1.1) \cdot [\Theta(d)]^3 \right\}. \quad (8)$$

Milky Way. Для MW ми дещо відходимо від прийнятих правил побудови апроксимуючого поліному. Це обумовлено двома обставинами. По перше, дві крайні праві точки на рис. 1с при $\Theta = 3.7, 3.8$ неможливо зв'язати гладкою кривою з рештою точок. Різкий підйом залежності при $\Theta = 3.6$ до рівня $\sim 0.6 \cdot 10^{12} M_{Sun}$ зі збільшенням об'єму (зменшенням Θ) обумовлений входженням у вибірку Bootes III з великим значенням $\Delta V = 241$ км/с. Наступне входження

при $\Theta = 3.5$ Великої Магеланової Хмари (разом з Малою, для якої Велика є MD) не приводить до стрибків, а підтверджує значення маси на рівні $\sim 0.6 \cdot 10^{12} M_{Sun}$. Після цього маємо майже плавне зростання маси до значення $\Theta = 0.5$. Тому ми при апроксимації не приймаємо до уваги точки $\Theta = 3.7, 3.8$. По-друге, відсутність супутників в діапазоні $\Theta \in (0, 0.5)$ поблизу поверхні нульової швидкості погіршує точність визначень та, можливо, дало занижене значення маси MW, що знайдене в [9], оскільки фактично орбітальна маса обчислена за даними про 27 супутників лише з $\Theta \geq 0.5$ (або $d/d_0 < 0.6813$). Тому ми приймаємо інтервал апроксимації подовженим до значення $\Theta = -0.5$, приймаючи можливість належності чотирьох додаткових супутників до області всередині поверхні нульової швидкості. Профіль густини темної матерії:

$$\rho(d) = \frac{10^{11} M_{Sun}}{d^3} \left\{ (1.62 \pm 0.25) \cdot \Theta(d) + (-1.16 \pm 0.23) \cdot [\Theta(d)]^2 + (0.204 \pm 0.049) [\Theta(d)]^3 \right\}. \quad (9)$$

Зауважимо, що апроксимація для MW має недолік – позитивну похідну на вузькій ділянці правого краю залежності. Цей недолік, однак, не є суттєвим, оскільки далі для оцінки маси "темної периферії" ця ділянка не використовується.

M31 На рис. 1d проведена апроксимація залежності $M_{orb}(\Theta)$ для M31 поліномом четвертого порядку з коефіцієнтами в табл.1. Лінійні та квадратичні доданки були виключені через їх малу значущість. Потенціальних супутників в діапазоні $\Theta \in (-0.5, 0.0)$ немає. Апроксимація має суттєвий недолік, оскільки на інтервалі $\Theta \in (0.8, 1.8)$, необхідно для обчислення периферійної маси, приріст маси ТМ зі збільшенням відстані є від'ємним ($M_{orb}(\Theta)$ має додатну похідну). Можливо, що на інтервалі $\Theta \in (0, 2)$ реально маємо слабко спадаючий з Θ відрізок кривої, а приблизно при $\Theta > 2$ – різке спадання. Можливо, що таку картину створює галактика M33 з $\Theta = 1.7$ ($d/d_0 = 0.2712$), зоряна маса якої лише у 15 разів менша за зоряну масу M31. Внаслідок такої нефізичної ситуації ми не наводимо відповідний вираз для профілю густини ТМ.

ТМ на периферії гало. У останньому стовпчику табл.1 подані значення (у процентах) величини $\chi = 1 - M_{orb}(1.63)/M_{orb}(0)$, тобто частини маси ТМ, що знаходиться між радіусами d_{vir} та d_0 . При цьому відношення цих радіусів приймається орієнтовно 3.5 (див. [13]), чому відповідає $\Theta = 1.63$.

Як видно з рис. 1d, величина χ для M31 близька до нуля внаслідок горизонтальної ділянки залежності $M_{orb}(\Theta)$ поблизу $\Theta = 0$. Тобто прирощення ТМ на даному інтервалі Θ є несуттєвим. Для решти галактик ми порівняли отримані значення χ з тим значенням, що відповідає NFW-профілю [14]. Приймаючи параметр концентрації $C=12$ [15] та перевищення в 3.5 рази радіуса поверхні нульової швидкості над віріальним радіусом [13], ми отримали оцінку в 41%. Це значення менше наших визначень для M81, NGC3368 та MW. Видна різноманітність оцінок χ від галактики до галактики.

Висновки. У даній роботі була здійснена спроба відтворити профілі густини ТМ в гало 15-и галактик МО з найбільшою кількістю супутників. Раніше для цих галактик в роботі [9] були обчислені орбітальні маси M_{orb} в межах поверхні нульової швидкості. Можливість обчислення профілю густини для певної гігантської галактики дає ранжування її супутників за припливним індексом Θ , що виконане в [11]. З визначення припливного індексу випливає можливість обчислення M_{orb} як функції граничного (мінімального) значення Θ . Було розглянуто апроксимації радіального профілю маси ТМ на галактичних масштабах у вигляді (5) поліномом четвертого порядку. Відповідний профіль густини ТМ має вигляд (6).

Для чотирьох галактик (M81, NGC3368, Milky Way, M31) було побудовано профілі маси ТМ на інтервалі відстаней поблизу поверхні нульової швидкості. Цікаво, що для всіх чотирьох галактик лінійний член в апроксимації відсутній. Можливо це підказує, що темне гало на поверхні нульової швидкості закінчується.

Була проведена оцінка маси ТМ на периферії гало, в об'ємі між віріальним радіусом та радіусом поверхні нульової швидкості. Для M31 частина цієї маси від повної маси близька до нуля, тобто ТМ кінчається приблизно на віріальному радіусі $d_{vir} \approx d_0 / 3.5$. Ця маса складає приблизно від повної маси 52%, 71% та 89% для MW, M81 та NGC3368, відповідно. Для профілю NFW відповідне значення є 41% (при параметрі концентрації $C=12$). Отже, наші оцінки, що отримані без прийняття певного теоретичного профілю густини ТМ гало гігантських галактик, в трьох випадках з чотирьох є більшими за очікувані на основі NFW профілю.

Публікація містить результати досліджень, проведених при грантовій підтримці Державного фонду фундаментальних досліджень за договором Ф64/45-2016 від 28.04.2016.

Список використаних джерел

1. Bahcall N.A., Kucler A. Tracing mass and light in the Universe: Where is Dark Matter? // MNRAS. – 2014. – V. 439. – P. 2505–2514 (arXiv:1310.0022).
2. Makarov D.I., Karachentsev I.D. Galaxy groups and clouds in the local ($z \sim 0.01$) universe // MNRAS. – 2011. – V. 412. – P. 2498–2520.
3. Tully R.B. Nearby groups of galaxies. II. An all sky survey within 3000 kilometer per second // Astroph. J. – 1987. – V. 321. – P. 280–304.
4. Karachentsev I.D. Missing Dark Matter in the Local Universe // Astroph. Bulletin. – 2012. – V. 67. – P. 123–134.
5. Karachentsev I.D., Tully R.B., Wu Po-Feng et al. Infall of nearby galaxies into the Virgo cluster as traced with HST // Astroph. J. – 2014. – V. 782. – article id. 4, 9 p.
6. Karachentsev I.D., Kashibadze O.G., Makarov D.I., Tully R.B. The Hubble flow around the Local group // MNRAS. – 2009. – V.393. – P. 1265–1274.
7. Lee M.G., Freedman W.L., B.F.Madore B.F. Stellar populations in the dwarf elliptical galaxy NGC185 // Astron. J. – 1993. – V. 106. – P. 964–985.
8. Karachentsev I.D., Makarov D.I., Kaisina E.I. Updated Nearby Galaxy Catalog // Astron. J. – 2013. – V. 145. – article id. 101, 22 p.
9. Karachentsev I.D., Kudrya Yu.N. Orbital masses of nearby giant galaxies // Astron. J. – 2014. – V. 148. – article. id. 50, 15p.
10. Bahcall J.N., Tremaine S. Method for determining the masses of spherical systems. I. Test particles around a point mass // Astroph. J. – 1981. – V. 244. – P. 805–819
11. Karachentsev I.D., Kaisina E.I., Makarov D.I. Suites of dwarfs around nearby giant galaxies // Astron. J. – 2014. – Vol.147. – article id. 13, 9p.

12. Bell E.F., McIntosh D.H., Katz N., Weinberg M.D. The optical and near-infrared properties of galaxies. I. Luminosity and stellar mass function // *Astroph. J. Suppl. Ser.* – 2003. – V. 149. – P. 289–312.
13. Karachentsev I.D., Makarov D.I. Galaxy interactions in the Local volume // *IAUS.* – 1999. – V. 186. – P. 109–116.
14. Navarro J.F., Frenk C.S., White S.D.M. An universal density profile from hierarchical clustering // *Astroph. J.* – 1997. – V. 490. – P. 493–508.
15. Klypin A., Zhao Hong Shen, Sommerville R.S. Λ CDM-based models for the Milky Way and M31. I. Dynamical Models // *Astroph. J.* – 2002. – Vol. 573, Iss.2. – P. 597–613.

Надійшла до редколегії 30.08.15

Kudrya Ju., Ph.D.
Astronomical Observatory of National
Taras Shevchenko University of Kyiv

DARK MATTER DISTRIBUTION IN HALOES OF NEARBY GIANT GALAXIES

The profiles of orbital mass growth depending on the tidal index and the profiles of dark matter halos density were built based on kinematics of the satellites of four nearby giant galaxy (M81, NGC 3368, Milky Way, M31). Parts of the dark matter halo between virial radii and radii of the zero velocity surface are estimated.

Кудря Ю., канд. физ.- мат. наук
Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ В ГАЛО БЛИЗКИХ ГИГАНТСКИХ ГАЛАКТИК

Для четырех близких гигантских галактик (M81, NGC3368, Млечный Путь, M31) по кинематике их спутников построены профили роста орбитальных масс в зависимости от приливного индекса, а также профили плотности темной материи в гало. Оценены частоты массы гало между виртуальными радиусами и радиусами поверхности нулевой скорости.

УДК 524.7

С. Парновський, д-р. фіз.-мат. наук,
І. Ізотова, канд. фіз.-мат. наук
Астрономічна обсерваторія Київського національного університету
імені Тараса Шевченка

ПОЧАТКОВІ ФУНКЦІЇ СВІТНОСТІ ГАЛАКТИК З АКТИВНИМ ЗОРЕУТВОРЕННЯМ

Розглянуто початкові функції світності, які описують розподіл світності галактик у рекомбінаційній лінії H α у зонах іонізованого водню та ультрафіолетовому континуумі при нульовому віці спалаху, для вибірки 800 галактик з активним зореутворенням. Показано, що початкові функції світності галактик з активним зореутворенням у лінії H α та ультрафіолетовому континуумі можуть бути задовільно описані log-нормальною функцією, яка описує і поточні функції світності.

Функція світності (ФС), яка описує розподіл світності галактик, є важливою статистичною характеристикою населення галактик. Зазвичай у якості ФС обирають функцію Шехтера (ФС) [22], яка відома у математичній статистиці як гамма функція.

У низці робіт проведено дослідження ФС галактик у різних діапазонах випромінювання: на 60 мкм у далекому інфрачервоному діапазоні [13, 21, 23]; для вибірки близько 50 тис галактик з червоним зміщенням $z \leq 0.1$ [20] в ультрафіолетовому (УФ) діапазоні на основі розподілу відношення швидкості зореутворення, яка пропорційна світності, до маси; у радіоконтинуумі [7, 15, 24]. При цьому встановлено, що досліджувані ФС не можуть бути апроксимовані функцією Шехтера. Такий же результат отримано для області високих світностей вибірки 34 світних галактик на великих червоних зміщеннях [5]. У роботі [10] на основі дослідження функцій світності галактик з використанням даних місії GALEX та WiggleZ Dark Energy Survey при $z > 0.55$ виявлено надлишок світних галактик, якщо порівнювати з розподілом Шехтера.

У той же час функція Шехтера гарно відтворює ФС у оптичному та близькому інфрачервоному діапазоні, у рекомбінаційній лінії H α у областях іонізованого водню [8, 14], та УФ діапазоні [25].

Автори робіт [1, 16, 17, 18] детально досліджували функції світності вибірки 800 галактик зі спалахом зореутворення. Було показано, що ФС, які отримано зі спостережень випромінювання галактик з активним зореутворенням у рекомбінаційній лінії H α , далекому та близькому ультрафіолетовому континуумі, суттєво відрізняються від функції Шехтера. Було запропоновано ряд функцій, які задовільно описують спостережну ФС досліджуваних галактик, у числі яких є log-нормальна функція.

Функцію світності типу функції Шехтера, остання базується на розподілі Пуассона, можна очікувати у випадку незалежності ймовірності зореутворення у двох сусідніх близьких областях галактик. Отриманий у роботах [1, 16, 17, 18] результат – відмінність спостережної ФС від функції Шехтера – свідчить на користь зкорельованості процесів зореутворення у близьких сусідніх областях галактики. Надлишок числа галактик з високою світністю ($L(H\alpha) > 5 \times 10^{42}$ ерг·с $^{-1}$), який виявлено у роботах [1, 16, 17, 18], ймовірно, можна віднести за рахунок поширення зореутворення на сусідні області галактики, простимульованого спалахом зореутворення у певному осередку.

Дослідження у роботах [1, 16, 17, 18] проведено для випадку, коли початкова ФС представлена функцією Шехтера. У цій роботі розглянуто випадок апроксимації початкової функції світності вибірки 800 галактик з активним зореутворенням log-нормальним розподілом у трьох діапазонах: рекомбінаційній лінії H α та ультрафіолетовому континуумі (FUV далекому та NUV близькому).

Для дослідження ми використовували ту ж вибірку галактик з активним зореутворенням [9], що і у роботах [1, 16, 17, 18]. Це – вибірка компактних галактик великої світності (LCGs), $z \sim 0.02 - 0.6$, утворена на основі даних Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [2].