model. The synoptic data of photosphere magnetic field from the Wilcox Solar Observatory was used as low boundary condition. Polar field corrections 0 to 1200 microTesla and the saturation factor of 1.8 were used in calculations. The source surface was situated at the distance of 2.5 solar radii. Observed parameters of coronal rays from (Pishkalo and Baransky, Kinematics and Physics of Celestial Bodies, 2009, 25, 315–318) were compared with the modeled ones. The best agreement of observed and modeled parameters was found when the calculation were made with polar field correction of about 600×cos⁸(θ) mcTesla. It was concluded that during the total solar eclipse of 2008 the strength of magnetic field at the solar poles was averaged to 650–700 microTesla at the photosphere and to 13–14 microTesla at the source surface.

УДК 524.7+524.8+530.12+531.5

В. Слюсар, інж. 1-ї категорії,
В. Жданов, д-р фіз.-мат. наук, проф.
КНУ імені Тараса Шевченка, Київ

СТАТИСТИКА ГРАВІТАЦІЙНОГО МІКРОЛІНЗУВАННЯ ВІДДАЛЕНОГО ДЖЕРЕЛА СИСТЕМОЮ ПРОТЯЖНИХ ТА ТОЧКОВИХ МАС ЗА НАЯВНОСТІ ЗОВНІШНЬОГО ЗСУВУ

Побудовано автокореляційні функції кривих блиску в моделі мікролінзування віддаленого джерела стохастичною системою точкових мас (зорі) та протяжних мас (гіпотетичні згустки темної матерії, ТМ). Окрім ізольованих згустків ТМ розглянуто також суперпозиції точкових мас і згустків ТМ зі спільним центром. Автокореляційні функції згенеровано для декількох наборів параметрів, що характеризують відносну концентрацію точкових і протяжних мас поблизу променя зору та зовнішній зсув.

Ключові слова: позагалактичне гравітаційне мікролінзування, темна матерія.

1. Вступ. У сучасну епоху у середню космологічну густину маси найбільші внески дають темна енергія, що представлена космологічною сталою, та небаріонна темна матерія (ТМ) [4]. Більшість спостережних даних можна описати в рамках стандартної ΛCDM-моделі з холодною ТМ, хоча деякі дані свідчать про можливість існування "теплої" ТМ [6]. Числові симуляції [8, 9] в моделях з холодною ТМ передбачають, що гало, яке з неї складаються, кластеризуються в субгало менших розмірів, а ті в свою чергу мають свою субструктуру. В літературі розглядають досить широкий діапазон мас міні-гало, мінімальні маси яких оцінюють до $10^{-6}M_{\odot}$ і навіть до $10^{-12}M_{\odot}$ із просторовими масштабами порядку і більше розмірів Сонячної системи [2, 3, 9]. Гравітаційне мікролінзування є одним з небагатьох інструментів, який дозволяє досліджувати наявність компактних та протяжних об'єктів усередині галактик (див., напр., [1, 10, 11]).

В даній роботі ми розглядаємо узагальнення моделі [11] гравітаційного мікролінзування стохастичною системою точкових мас та протяжних згустків, які моделюють ТМ, за наявності зовнішнього зсуву γ. В рамках запропонованої нижче простої моделі розмір згустка фіксовано параметром $\kappa \equiv R_c / R_E$, де R_c характеризує "розмір згустка", R_E – типовий радіус Ейнштейна. Частка згустків визначається їх оптичною глибиною σ_{cl}, при цьому загальна оптична глибина в системі σ_{tot} є сталою. Це дає змогу обчислити автокореляційні функції кривих підсилення, що фактично є автокореляційними функціями кривих блиску мікролінзованого джерела). Основні рівняння моделі подано в п. 2, опис алгоритму – в п. 3, результати та обговорення – у п. 4.

2. Основні співвідношення. У системі N точкових та центрально-симетричних протяжних мікролінз різних розмірів, на відміну від [11], ми допускаємо також суперпозиції точкових мас та згустків (з спільним центром). Відповідні рівняння гравітаційного мікролінзування мають вид:

$$y = \mathbf{A}\,x - \sum_{i=1}^{N} \frac{\alpha R_{E,i}^2 (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)}{\left|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\right|^2} - \sum_{i=1}^{N} \frac{(1-\alpha) R_{E,i}^2 (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)}{\left|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\right|^2 + R_{c,i}^2}, \quad 0 < \alpha < 1, \tag{1}$$

де $R_{c,i}$ – характерний розмір i-ї протяжної маси M_i, яка моделює згусток ТМ, $\mathbf{x}_i$ – положення центру (згустка чи точкової маси), $R_{E,i} = \left[4GM_i D_{ds} / (c^2 D_d D_s)\right]^{1/2}$ – відповідний радіус кільця Ейнштейна, D_d, D_s, D_{ds} – відстань до площини лінзи, до джерела, та від лінзи до джерела відповідно; $\mathbf{A} = diag(1-\gamma, 1+\gamma)$ – 2×2 матриця зсуву. Кожен член суми в (1) описує внесок точкової маси αM_i та згустку з масою $(1-\alpha)M_i$ з тим самим положенням. При $\alpha = 1$ маємо звичайний випадок мікролінзування точковими масами. При $\alpha = 0$ мікролінза з $R_{c,i} \neq 0$ є протяжним об'єктом, при $0 < \alpha < 1$ та $R_{c,i} \neq 0$ маємо мінігало навколо відповідної точкової маси.

Далі для кожної реалізації поля мікролінз отримано карту коефіцієнтів підсилення, яку згортаємо з розподілом яскравості по диску джерела. При русі джерела отримуємо криву підсилення – залежність коефіцієнта підсилення від часу $K(t)$. Усі криві блиску було розраховано для джерела з гаусівським розподілом. За результатами робіт [1, 7, 11] слід очікувати, що вплив структури джерела на статистику кривих блиску є незначним, особливо для класу компактних об'єктів. Таким чином, отримано набір кривих підсилення $K(t)$, які розглядаємо як реалізації однорідного випадкового процесу. Маючи набір цих реалізацій було розраховано автокореляційні функції:

$$A(\tau) = \left\langle \left(K(t) - \langle K \rangle\right)\left(K(t+\tau) - \langle K \rangle\right) \right\rangle (\Delta K)^{-2}, \text{ де } \Delta K = \sqrt{\left\langle \left(K(t) - \langle K \rangle\right)^2 \right\rangle}, \tag{2}$$

де дужки $\langle \ldots \rangle$ означають усереднення за усіма реалізаціями.

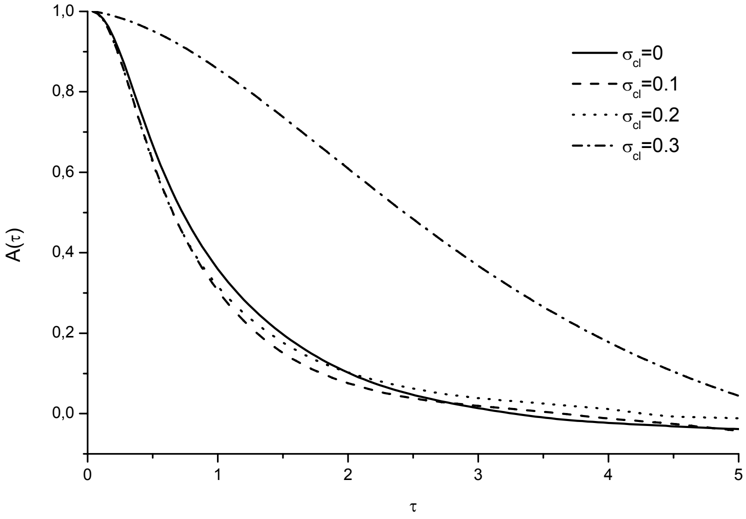

Рис. 1. Автокореляційні функції кривих блиску при $\sigma_{tot} = 0.3$, $\gamma = 0$, $\kappa = 5$, $\alpha = 0$

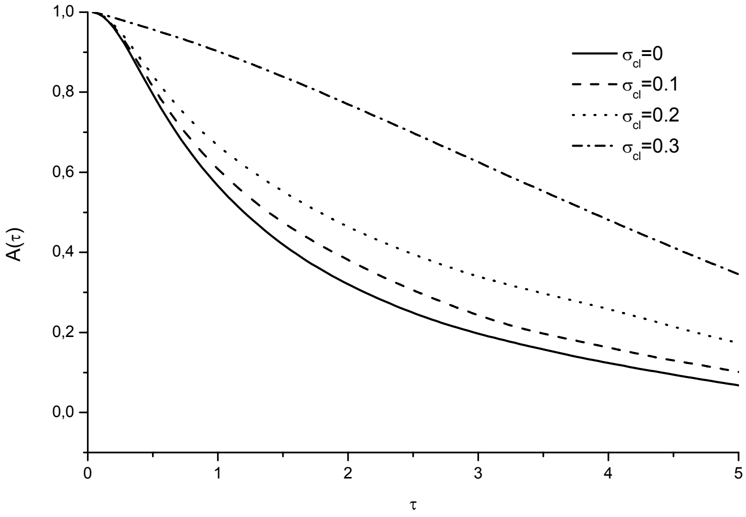

Рис. 2. Автокореляційні функції кривих блиску при $\sigma_{tot} = 0.3$, $\gamma = 0.5$, $\kappa = 5$, $\alpha = 0$

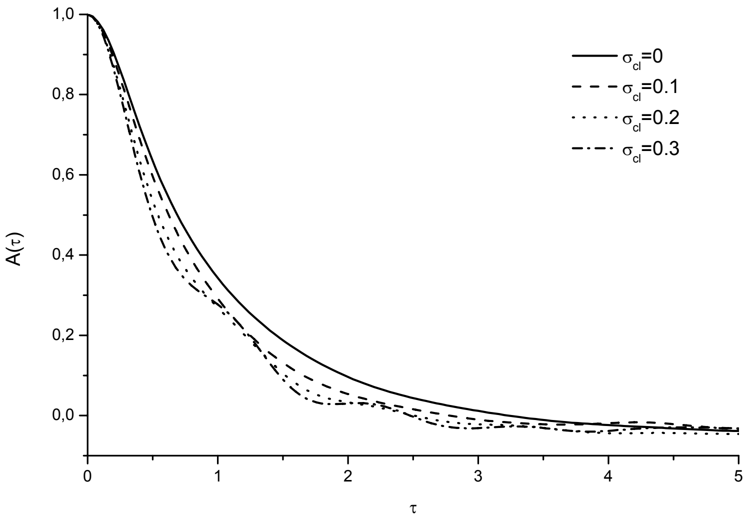

Рис. 3. Автокореляційні функції кривих блиску при $\sigma_{tot} = 0.3$, $\gamma = 0$, $\kappa = 5$, $\alpha = 1/2$

3. Чисельні розрахунки кривих блиску. Для розрахунку поля коефіцієнтів підсилення було спочатку згенеровано набір реалізацій поля точкових мікролінз з положеннями $\mathbf{x}_i$, які вибиралися випадково з однорідним розподілом в межах кола радіусу R_{field}. Цей радіус було вибрано достатньо великим, аби мінімізувати вплив крайових ефектів на криву підсилення при русі джерела відносно мікролінз. В свою чергу довжина траєкторії джерела, спроектованої на площину лінзи, є значно більшою за характерний радіус Ейнштейна поля мікролінз та характерний розмір згустку ТМ. В кожній реалізації маси мікролінз вибиралися випадковим чином згідно солпітерівського розподілу з степеневим індексом –2.35 при $M_i \in [0.2;10] M_{\odot}$.

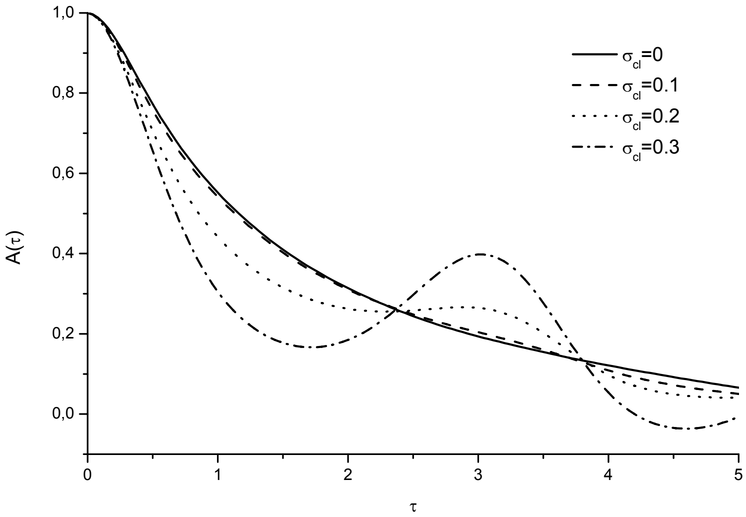

Рис. 4. Автокореляційні функції кривих блиску при $\sigma_{tot} = 0.3$, $\gamma = 0.5$, $\kappa = 5$, $\alpha = 1/2$

Для введення протяжних мас частку випадково вибраних точкових мас (пропорційну оптичній густині σ_{cl}) заміняємо на або на ізольовані протяжні згустки (модель 1), або на суперпозиції згустків і точкових мас з деяким фіксованим α (модель 2).

В ході роботи розраховано по 100 реалізацій поля коефіцієнтів підсилення для кожного набору вхідних параметрів. Загальна оптична глибина $\sigma_{tot} = \sigma_{cl} + \sigma_p = \text{const}$, де σ_p – оптична глибина точкових мікролінз, σ_{cl} – оптична глибина згустків. Шляхом заміни мікролінз на згустки з такою ж масою, але з ненульовим розміром, враховано відношення σ_p до σ_{cl}; при цій заміні маси згустків відповідали масам мікролінз M_i, а розмір встановлювався рівним $R_{c,i} = \kappa R_{E,i}$, де коефіцієнт κ залишався сталим для усього набору реалізацій. В даній роботі ми розглядаємо γ = 0 та 0.5, а розмір згустків $\kappa = 5$ при $\alpha = 0$ (модель 1) та $\alpha = 1/2$ (модель 2). Вибір одиниці довжини на рисунках відповідає $R_{E,\odot} = \left[4GM_{\odot}D_{ds}/(c^2 D_d D_s)\right]^{1/2} = 1$. Далі t, τ записано в одиницях $R_{E,\odot}$, тобто швидкість джерела відносно поля мікролінз приймаємо за одиницю.

4. Результати. Вигляд карт коефіцієнтів підсилення для різних σ_{cl} суттєво відрізняється, зі збільшенням кількості згустків спостерігається "розмивання" каустик, що призводить і до зміни автокореляційних функцій кривих блиску. Розглядаючи випадок незалежних згустків матерії (модель 1), спостерігається досить сильна залежність автокореляційних функцій від частки згустків (Рис. 1), при цьому автокореляція зростає при наявності зовнішнього зсуву – це пояснюється розтягуванням карти коефіцієнтів підсилення і як наслідок збільшення лінійних розмірів зв'язаних областей (Рис. 2). У випадку, коли центр мас згустків співпадає з відповідними точковими масами (модель 2) залежність від оптичної глибини є слабшою (Рис. 3), але при наявності зовнішнього зсуву автокореляційна функція кривих блиску також суттєво змінюється (Рис. 4). Таким чином, маємо принципову можливість перевірки ефектів кластеризації ТМ і внутрішньої структури лінзуючої галактики – за наявності достатньо тривалих рядів спостережень.

Список використаних джерел

1. *Alexandrov A.N.* Caustic Crossing Events and Source Models in Gravitational Lens Systems / A.N. Alexandrov, V.M. Sliusar, V.I. Zhdanov // Ukr. J. of Phys., 2011. – Vol. 56, N 4. – P. 389–400.
2. *Berezinsky V.* Remnants of dark matter clumps / V. Berezinsky, V. Dokuchaev, Yu. Eroshenko // Phys. Rev. D, 2008. – Vol. 77, N 8. – id. 083519(13).
3. *Diemand J.* Earth-mass dark-matter haloes as the first structures in the early Universe / J. Diemand, B. Moore, J. Stadel // Nature, 2005. – Vol. 433, N 7024. – P. 389–391.
4. *Planck* Collaboration. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters / Planck Collaboration // Astron. Astrophys., 2014. – 571. – A. 16.
5. *Del Popolo A.* Non-Baryonic Dark Matter in Cosmology / A. Del Popolo // International Journal of Modern Physics D, 2014. – 23, N 3. – id. 1430005(109).
6. *Nonlinear* evolution of cosmological structures in Warm Dark Matter models / A. Schneider, R.E. Smith, A.V. Macci, B. Moore // Mon. Not. R. Astron. Soc., 2012. – 424, N 1. – P. 684–698.
7. *Sliusar V.M.* Simulations of the gravitational microlensing: extended source models and impact of binary stars / V.M. Sliusar, V.I. Zhdanov, A.N. Alexandrov // J. Phys. Stud.,2012. – 16. – P. 8–22.
8. *The Aquarius* Project: the subhaloes of galactic haloes / V. Springel, J. Wang, M. Vogelsberger et al. // Mon. Not. R. Astron. Soc., 2008. – 391. – P. 1685–1711.
9. *Quantifying* the heart of darkness with GHALO-a multibillion particle simulation of a galactic halo / J. Stadel, D. Potter, B. Moore et al. // Mon. Not. R. Astron. Soc., 2009. – 398. – P. L21–L25.
10. *Zackrisson E.* Gravitational lensing as a probe of cold dark matter subhalo / E.Zackrisson, T. Riehm // Advances in Astronomy, 2010. – 2010. – id. 478910(14).
11. *Analytical* Methods in Gravitational Microlensing / V.I. Zhdanov, A.N. Alexandrov, E.V. Fedorova, V.M. Sliusar // ISRN Astronomy and Astrophysics, 2012. – 2012. – id. 906951(21).

Надійшла до редколегії 09.09.14

В. Слюсар, инж.-исслед.,
В. Жданов, д-р физ.-мат. наук, проф.
КНУ им. Тараса Шевченко, Киев

СТАТИСТИКА ГРАВИТАЦИОННОГО ЛИНЗИРОВАНИЯ УДАЛЕННОГО ИСТОЧНИКА НА СИСТЕМЕ ПРОТЯЖЕННЫХ И ТОЧЕЧНЫХ МАСС В ПРИСУТСТВИИ ВНЕШНЕГО СДВИГА

Построены автокорреляционные функции легких кривых микролинзирования модели удаленного источника с помощью стохастической системы точечных масс (звезд) и расширенных конфигураций – предполагаемые темной материи (DM) сгустки. Изолированные DM сгустки считаются суперпозициями точечных масс и глыб с тем же центром. Создан функции автокорреляции для нескольких наборов параметров, которые характеризуют относительную концентрацию точки и протяженных масс внешнего сдвига.

Ключевые слова: внегалактическая гравитационное линзирование, темная материя.

V. Sliusar, Research Engineer,
V. Zhdanov, Dr. Phys. and Math. Sci., prof.
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

STATISTICS OF GRAVITATIONAL LENSING OF A REMOTE SOURCE ON A SYSTEM OF EXTENDED AND POINT MASSES IN PRESENCE OF AN EXTERNAL SHEAR

We built autocorrelation functions of the light curves in the microlensing model of a remote source by a stochastic system of point masses (stars) and extended configurations – putative dark matter (DM) clumps. Besides isolated DM clumps we consider superpositions of point masses and clumps with the same center. The autocorrelation functions are generated for several sets of parameters that characterize the relative concentration of point and extended masses and an external shear.

Key words: extragalactic gravitational lensing, dark matter.

УДК 524.8

С. Парновський, д-р фіз.-мат. наук, проф.
КНУ імені Тараса Шевченка, Київ

ОЦІНКА КОМБІНАЦІЇ КОСМОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ВЕЛИКОМАСШТАБНИМИ РУХАМИ RFGC-ГАЛАКТИК

***Розглянуто обмеження на комбінацію космологічних параметрів Ω_m та σ_8 за спостереженням пекулярних швидкостей плоских галактик каталогу RFGC. Отримано оцінку** $(\Omega_m/0.3)^{0.35}\sigma_8 = 0.87 \pm 0.05$.*

Ключові слова: великомасштабні рухи галактик, космологічні параметри.

Вступ. У космології вважається, що Всесвіт однорідний та ізотропний. Але на масштабах менших за 200–300 h^{-1} Мпк він достатньо неоднорідний. Існують місця зі збільшеною густиною матерії, наприклад, надскупчення галактик, існують пустоти або войди, де густина матерії значно менша за середню фонову. Ці відхилення є результатом зростання із часом невеликих початкових флуктуацій густини у ранньому Всесвіті.

Галактики поводяться як пробні частинки в неоднорідному Всесвіті. Вони мають додаткове прискорення до областей з надлишком густини та менше притягуються до пустот. Тому вони рухаються на фоні загального хабблівського розширення Всесвіту. Цей рух, так званий нехабблівський великомасштабний колективний рух галактик описується полем швидкостей, яке ми визначаємо та досліджуємо. За астрономічними спостереженнями ми можемо визначити тільки його радіальну складову, але застосувавши певну модель поля швидкостей можна визначити розподіл тривимірної швидкості.

В АО КНУ багато років ведуться дослідження великомасштабних рухів галактик, зокрема плоских галактик, орієнтованих з ребра [10]. Створено разом з САО РАН два каталоги таких галактик – FGC [3] та його переглянуту версію RFGC [4], котра містить дані про 4236 галактик. Саме колективні рухи RFGC-галактик є основою цієї роботи.

За роки, впродовж яких ведуться ці роботи, створено декілька вибірок даних про червоні зміщення та ширини ліній HI радіовипромінювання галактик на довжині хвилі 21 см або оптичні ширини галактик. Остання з них містить дані про 1661 галактику [5]. Оскільки це тільки 39 % від об'єму каталогу, в наступні роки передбачається подальше збільшення обсягу та уточнення вибірки за рахунок даних нових спостережень, переважно радіоспостережень.

На основі вибірки та мультипольної моделі поля швидкостей [10] створено декілька списків пекулярних швидкостей галактик, тобто радіальних компонент нехабблівських рухів, останній з них це [6]. Ці списки, в свою чергу, є основою для подальших досліджень.

Пекулярні швидкості залежать від значень космологічних параметрів, перед усім $\Omega_m = \rho/\rho_{cr}$, де ρ_{cr} це критична густина, та σ_8, тому їх можна оцінити за списками пекулярних швидкостей RFGC-галактик. Оцінки добре співпадають з більш точними оцінками за даними супутників, що досліджують реліктове випромінювання [10].

Обмеження за пекулярним рухом RFGC-галактик дають вузькі та досить витягнуті області. Для кількісних обмежень краще використовувати комбінацію космологічних параметрів виду $(\Omega_m/0.3)^{\alpha}\sigma_8$ при оптимальному значенні параметру α. Це значення можна отримати при $\alpha = 0.35$, воно забезпечує мінімальну похибку комбінації, що дорівнює $(\Omega_m/0.3)^{0.35}\sigma_8 = 0.91 \pm 0.05$ [7].

Обмеження на комбінацію космологічних параметрів. В роботі [5] не наведена оцінка космологічних параметрів на основі пекулярних швидкостей галактик вибірки. Наведемо її, застосувавши метод, запропонований в роботі [1], точніше обидва запропоновані методи – більш та менш складний. Ми визначаємо спільні обмеження на величини космологічних параметрів Ω_m та σ_8, застосувавши метод максимальної правдоподібності (ММП) [8]. Вони наведені на Рис. 1 для більш та менш складного методу. Правдоподібність збільшується на правій границі графіка,