

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

СЛЮСАР Віталій Миколайович

УДК 524.7+524.8+530.12+531.5

**МІКРОЛІНЗУВАННЯ ВІДДАЛЕНИХ ДЖЕРЕЛ В
БАГАТОЧАСТИНКОВИХ ГРАВІТАЦІЙНО-ЛІНЗОВИХ
СИСТЕМАХ: СТАТИСТИКА КРИВИХ БЛИСКУ**

01.03.02 — астрофізика, радіоастрономія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Жданов Валерій Іванович,
Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка, завідувач відділу астрофізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Новосядлий Богдан Степанович,
Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка,
провідний науковий співробітник;
кандидат фізико-математичних наук
Железняк Олександр Петрович,
НДІ астрономії Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна,
старший науковий співробітник.

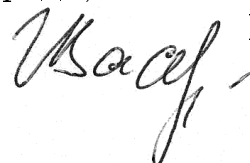
Захист відбудеться «6» листопада 2015 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 Головної астрономічної обсерваторії НАН України за адресою: 03680, м. Київ, ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27.

Початок засідань о 10 годині.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Головної астрономічної обсерваторії НАН України за адресою: 03680, м. Київ, ГАО НАН України, вул. Академіка Заболотного, 27.

Автореферат розісланий «___» вересня 2015 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат фізико-математичних наук



І.Е. Васильєва

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Гравітаційне лінзування є потужним засобом вивчення галактичних та позагалактичних астрономічних об'єктів, що часто дозволяє отримувати унікальну інформацію про структуру джерел випромінювання, розподіли мас, а в певних випадках оцінювати космологічні параметри. В типових позагалактичних гравітаційно-лінзових системах (ГЛС) спостерігають декілька макроскопічних зображень від одного квазара, їх моделюють за допомогою усередненого гравітаційного поля усієї галактики. Разом з тим велику увагу привертають процеси мікролінзування, пов'язані з неоднорідністю гравітаційного поля на промені зору окремих макрозображень завдяки внескам полів окремих зір. Ці неоднорідності спотворюють потік випромінювання від макрозображень; завдяки цьому величина спостережуваного потоку може збільшуватися у декілька разів. Оскільки випромінювання, що відповідає різним зображенням, проходить через різні області лінзуючої галактики, мікролінзування цих зображень відбувається незалежно. При цьому утворюються мікрозображення, що перетинаються і на сучасному рівні спостережної техніки не можуть бути розділені. На фоні власних змін блиску квазара в ГЛС, які проявляються у зкорельованій зміні яскравостей всіх зображень (з деякою відносною затримкою), некорельовані зміни в кожному зображенні пов'язані саме з мікролінзуванням. Таким чином, порівняння кривих блиску різних зображень в ГЛС дає змогу відділити саме інформацію щодо мікролінзування. Типові характерні часи коливань блиску завдяки мікролінзуванню складають від тижнів до місяців. Складність дослідження цих явищ у позагалактичних ГЛС пов'язано, зокрема, з тим, що в цих системах треба враховувати внесок великої кількості мас з невідомими положеннями.

На цей час відомо понад 100 позагалактичних ГЛС [35], і щороку їх число збільшується. Нові огляди неба на сучасних телескопах, як то SkyMapper Telescope або запланованих типу Large Synoptic Survey Telescope (LSST), обіцяють суттєво збільшити кількість виявлених гравітаційно-лінзових систем. Так, оцінки для LSST [36] передбачають, що за 10 років на 20000 квадратних градусах оглянутого неба буде виявлено 8000 нових позагалактичних систем з лінзованими квазарами. Мікролінзування віддалених джерел (зір сусідніх галактик чи балджу Галактики) спостерігають і на об'єктах нашої Галактики. Тут сумарний потік від зображень може збільшуватися – в окремих подіях – у десятки разів. У цих процесах приймає участь порівняно невелика кількість масивних об'єктів, однак тут є чимало цікавих

спостережних та теоретичних задач.

Традиційно при вивченні мікролінзування виділяють два базових напрями: дослідження структури джерела та вивчення розподілу мікролінзуючих мас на основі спостережень кривих блиску зображень.

Перший напрям було ініційовано піонерською роботою [30], де було зазначено, що у позагалактичних ГЛС криву блиску в так званих “подіях з великим підсиленням” можна наближено описати невеликою кількістю параметрів. Це дає змогу отримувати інформацію про розподіл яскравості в центральній області квазара в ГЛС. Вплив структури та розміру джерела обговорюється в багатьох роботах з позагалактичного мікролінзування (зокрема у відомих роботах [32, 33, 39]) і тут немає повного консенсусу щодо можливостей методу. Тому актуальним є порівняння кривих блиску для досить широкого класу моделей джерела [28, 38], що є однією з задач дисертації.

Другий базовий напрям теорії і практики гравітаційного мікролінзування включає оцінки мас компактних об’єктів в нашій та інших галактиках та їх розподіли. У цій дисертації зосереджено увагу на вивченні мікролінзування некомпактних об’єктів (субгало малих мас та згустків темної матерії, ТМ). Ці питання набули особливої актуальності останніми роками. Моделювання структур холодної ТМ передбачають її кластеризацію на різних просторових масштабах, з масовим вмістом від мас карликових галактик до $10^{-5} M_{\odot}$ [47]. Навпаки, в моделях так званої “теплої” матерії подібна картина відсутня [42]. Пошук цих структур або їх заперечення дасть змогу відсіяти або підтвердити певні моделі ТМ. Зрозуміло, що гравітаційне мікролінзування не може дати відповідь про існування або відсутність компактних або протяжних згустків ТМ на абсолютно усіх масштабах. Однак, воно дає можливість для пошуку некомпактних структур з масами порядку мас зір та з розмірами порядку декількох типових радіусів Ейнштейна в системі мікролінз. Питання впливу протяжних мас на процеси мікролінзування в позагалактичних ГЛС систематично раніше не вивчалися.

Зазначені питання розглянуто у дисертації в основному на статистичному рівні, а саме: вплив розподілу яскравості по диску джерела, а також вплив структури гравітатора (розподіл маси у протяжній мікролінзі, оптична глибина тощо) на статистику кривих блиску.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, покладені в основу дисертаційної роботи, виконано згідно з тематичним планом Київського національного університету імені Тараса Шевченка, тема № ДР 0111U006170 “Характеристики розподілу матерії у Всесвіті та властивості об’єктів, розташованих на

космологічних відстанях”. Автор брав участь у вищезазначених дослідженнях як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Головна мета дисертації – дослідження проявів гравітаційного мікролінзування для вивчення структури джерела та розподілу мас в гравітаційно-лінзових системах.

Задачі дослідження. Головними задачами дослідження є:

- визначення впливу структури джерела на гравітаційне мікролінзування в позагалактичній ГЛС у межах найбільш вживаних моделей: гаусівської, степеневі, з потемнінням до краю та моделі акреційного диска, використовуючи послідовний статистичний аналіз кривих блиску зображень.
- порівняння статистичних характеристик кривих блиску для різних моделей розподілу маси в ГЛС (врахування наявності подвійних систем, зовнішнього зсуву, вмісту протяжних мас та оптичної глибини мікролінзування).

Об’єкт дослідження. Об’єктами дослідження є джерело та лінзуюча галактика, зокрема під час подій мікролінзування в позагалактичній гравітаційно-лінзовій системі.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є криві блиску зображень віддаленого протяжного джерела, мікролінзованого зорями лінзуючої галактики.

Методи дослідження. У роботі використано аналітичні та чисельні методи розрахунку кривих блиску зображень мікролінзованого джерела. Для проведення чисельних розрахунків створено оригінальне програмне забезпечення, що здійснює обчислення подій мікролінзування методом “стрільба променями” для десятків тисяч мікролінз. Окрім прямого методу розрахунку кутів відхилення, що використовувався, коли кількість лінзуючих мас є невеликою, для реалізацій з великою кількістю мікролінз використано метод ієрархічних дерев (hierarchical tree code) [50].

Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень. Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень підтверджується використанням добре апробованих методів теорії гравітаційного лінзування, узгодженістю із окремими результатами робіт та досліджень інших авторів.

Наукова новизна одержаних результатів. Основними науковими результатами, що виносяться на захист, є такі:

- Вперше, на основі статистики кривих блиску, послідовно оцінено точність спостережень кривих блиску мікролінзованого

джерела в позагалактичних ГЛС, необхідну для того, щоб розрізнити прояви структури джерела в межах таких моделей розподілу яскравості: гаусівської, степеневі, з потемнінням до краю, а також з акреційним диском Шакури–Сюняєва. Показано, що при сучасному рівні фотометричної точності можна відрізнити криві блиску зображень в моделях компактного джерела і в моделях з повільним спаданням яскравості з відстанню до центра. На такому рівні повноти, як це зроблено у дисертації, це питання досліджено вперше.

- Вперше побудовано автокореляційні функції кривих блиску мікролінзованого джерела за наявності протяжних мікролінзуючих мас для двох моделей: (і) розподіл згустків та точкових мас окремо, (іі) розподіл, що передбачає наявність суперпозицій точкових мас та згустків.
- Для найбільш вживаних моделей джерела вперше розглянуто та оцінено спостережні прояви подвійних систем на криві блиску зображень мікролінзованого віддаленого джерела в позагалактичних ГЛС.

Практичне значення одержаних результатів. Науковий інтерес отримані результати становлять передусім у теорії гравітаційного лінзування. Вони можуть бути використані для планування таких спостережних програм: для вивчення структури центральної області квазарів у різних ГЛС; для порівняння моделей темної матерії в лінзових галактиках.

Особистий внесок здобувача. Результати дисертації опубліковано у 7 наукових фахових виданнях [1–7] та 15 матеріалах та тезах конференцій [8–22].

У роботі [1] автор брав участь у обговоренні постановки задачі, виконував аналітичні викладки та здійснював чисельні розрахунки, у роботі [2] автор здійснив розробку і покращення програмного забезпечення, провів з його допомогою чисельні розрахунки, описав задачу, методи та зробив висновки, у роботі [3] автор брав участь у обговоренні задачі та результатів, здійснив чисельні розрахунки та провів аналіз отриманих результатів, у роботі [4] автор брав участь у обговоренні постановок задач та результатів, у роботі [5] автор провів чисельні розрахунки, аналіз результатів та підготовку окремих розділів статті, у роботі [6] автор брав участь у обговоренні постановок задач, у роботі [7] автор брав участь у обговоренні постановок задач та результатів, провів чисельні розрахунки, аналіз результатів.

В усіх вищезазначених роботах автор брав участь в розробці тексту статті та написанні висновків.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації анонсовано на наукових конференціях та семінарах:

- Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Еврика-2009”, 2009 р., Львів,
- Міжнародна конференція “Астрономія та Фізика Космосу у Київському Університеті”, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 рр., Київ,
- Конференція молодих вчених: “Сучасні проблеми теоретичної фізики”, 2010, 2012, 2014 рр., Київ,
- 18-та Конференція молодих вчених “Астрономія та фізика космосу”, 2011 р., Київ,
- Міжнародна конференція пам’яті Богдана Бабія “Вибрані питання астрономії та астрофізики”, 2011, 2014 рр., Львів,
- XIV-а міжнародна астрономічна Гамовська школа-конференція “Астрономія на стыке наук – астрофізика, космологія и гравитация, космомікрофізика, радіоастрономія, астробіологія”, 2014 р., Одеса,
- Міжнародна конференція “Hot topics in Modern Cosmology”, 2014 р., Каржез, Франція,
- Міжнародна конференція “49th Rencontres de Moriond”, 2014 р., Ла-Тюіль, Італія.
- семінар у Технічному університеті Мюнхена, “Excellence Cluster Universe”, 14-17 червня, 2011 р., Гархінг, Мюнхен, Німеччина,
- семінар у Державному університеті Гронінгена, 25 липня – 3 серпня, 2012 р., Гронінген, Нідерланди,
- семінар у Інституті Анрі Пуанкаре, Центр Еміля Бореля, 10 листопада – 15 грудня, 2013 р., Париж, Франція,
- семінар в Радіоастрономічному інституті НАН України, 22-24 жовтня, 2014 р., Харків,
- семінар в Головній астрономічній обсерваторії НАН України, 1 грудня, 2014 р., Київ.

Результати роботи неодноразово доповідалися на семінарах відділу астрофізики Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Публікації. Результати дисертації опубліковано в 7 статтях у реферованих журналах [1–7], 1 стаття у працях міжнародної конференції [8] та 14 збірках тез конференцій [9–22].

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів та висновків. Загальний обсяг тексту дисертації стано-

виль 130 сторінок, у тому числі 40 рисунків та 15 таблиць. Список використаних джерел містить 143 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Подано загальну характеристику роботи. Розглянуто мету, задачі, методи, актуальність дисертаційної роботи, окреслено наукову новизну, приведено основні результати, визначено особистий внесок здобувача, зазначено конференції та семінари, де відбувалася апробація результатів роботи, та наведено публікації результатів досліджень.

Розділ 1 “Гравітаційне мікролінзування: теорія та спостереження” є оглядовим. В першому підрозділі наведено основні спостережувані та теоретичні факти, що свідчать про відхилення світла в гравітаційному полі масивних об’єктів. У другому підрозділі описано застосування гравітаційного лінзування для отримання астрофізичної інформації. В третьому підрозділі зроблено огляд застосування гравітаційного мікролінзування у позагалактичних гравітаційно-лінзових системах. У четвертому підрозділі дано математичний опис ефекту гравітаційного мікролінзування, а саме: розрахунок кривих блиску, використовуючи відомий розподіл яскравості по диску джерела та рівняння лінзи. Рівняння лінзи описує зв’язок між положенням точкового джерела та його зображеннями. У стандартному випадку гравітаційного мікролінзування віддаленого джерела багатьма точковими масами за наявності зовнішнього зсуву γ рівняння лінзи можна записати у вигляді відображення площини лінзи в площину джерела як [23]:

$$\mathbf{y} = A\mathbf{x} - \sum_{i=1}^N \frac{R_{E,i}^2 (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|^2}, \quad (1)$$

де \mathbf{x}_i – кутове положення i -ї мікролінзи на небесній сфері, $R_{E,i}$ – кутовий радіус кільця Ейнштейна для i -ї мікролінзи. Двовимірна матриця $A = \text{diag}[1 - \gamma - \sigma_0, 1 + \gamma - \sigma_0]$, де γ – зовнішній зсув, σ_0 описує внесок неперервної матерії на промені зору. У випадку мікролінзування протяжними масами це рівняння слід модифікувати.

Приклад карти коефіцієнтів підсилення, що розраховано у дисертації згідно (1), для однієї реалізації показано на рис. 1. Кожна така реалізація мала свій просторовий розподіл мас у лінзуючій галактиці, маса усіх мікролінз була однаковою $M_i = M$, такий вибір пояснюється тим, що вплив розподілу мікролінз по масах на криві блиску

є менш суттєвим у порівнянні із впливом моделі джерела та його розміру [33].

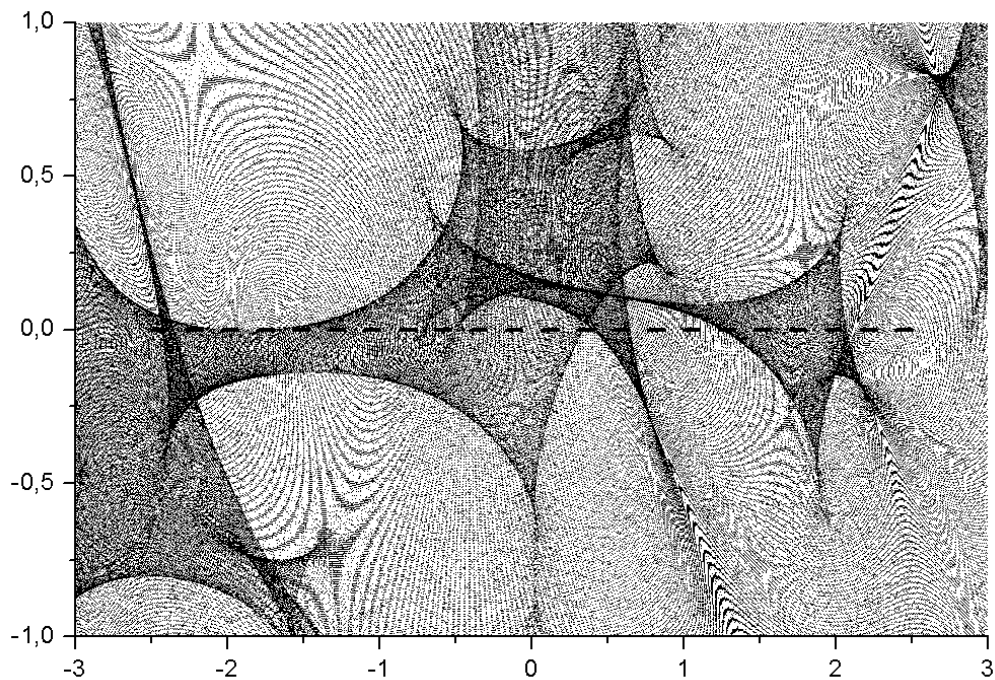


Рис. 1. Карта коефіцієнтів підсилення з траєкторією джерела, що рухається зліва направо з постійною швидкістю. Оптична глибина мікролінзування $\sigma = 0.4$

Макроскопічне зображення позагалактичної ГЛС моделюють за допомогою згладженого потенціалу, що створений неперервним розподілом мас, що змінюється лише на масштабах галактики на лінії зору між спостерігачем та джерелом. Однак, індивідуальні зорі і компактні об'єкти в лінзуючій галактиці вносять “збурення” гравітаційного поля, і це призводить до того, що кожне зображення точкового джерела розділяється на декілька мікрозображень з кутовою відстанню порядку декількох мікрокутових секунд, а також до зміни яскравості через поперечні рухи [26, 27, 37]. Через мікросекундні кутові відхилення та скінченний розмір реальних джерел в позагалактичних ГЛС розділити окремі мікрозображення у будь-якому діапазоні хвиль практично неможливо. Тому на цей час найбільш інформативним джерелом даних щодо процесів мікролінзування є зміни загального потоку випромінювання від окремих зображень завдяки відносному руху джерела та зір лінзової галактики.

Дані мікролінзування можна використовувати для виявлення структури і розміру джерела, адже при перетині каустик в площині джерела, складка каустики “зчитує” структуру джерела при його русі.

Окрім інформації про джерело, криві блиску зображень мікролінзованого джерела несуть інформацію про лінзуючу галактику: оптичну глибину мікролінзування σ , просторовий та масовий розподіл мікролінз, наявність протяжних мас та вплив їх параметрів.

Таким чином, у дисертації розглянуто фотометричний аспект мікролінзування, тобто зміну яскравості зображення внаслідок впливу об'єктів, що знаходяться поблизу променя зору у лінзуючій галактиці. Не дивлячись на складність аналізу і інтерпретації фотометричних даних реальних ГЛС, ці системи дають цінну астрофізичну інформацію про лінзуючу галактику і щодо тонкої структури джерела, що в них спостерігається [41].

В п'ятому підрозділі наведено опис спостереження гравітаційно-лінзових систем. У шостому підрозділі описуються основні проблеми позагалактичного гравітаційного мікролінзування.

У розділі 2 “Методи розрахунку процесів мікролінзування” подано методу розрахунку кривих блиску при мікролінзуванні, використовуючи оригінальне програмне забезпечення. В першому підрозділі описано алгоритми розрахунку кривих блиску при прямому розрахунку коефіцієнтів підсилення та у випадку використання методу дерев. У другому підрозділі описано технічні аспекти чисельних розрахунків, залежність часу розрахунків від окремих параметрів, показано перевірки усіх важливих аспектів розрахунків: генератор випадкових чисел, збіжність результату у залежності від розмірів поля мікролінз, кроку сітки та часового кроку траєкторії руху джерела. Слід зауважити, що у дисертації використано як прямий метод розрахунку коефіцієнтів підсилення, так і метод ієрархічних дерев [50]. Код оригінальної програми, що реалізує цей метод, адаптовано до запуску на GPGPU, що дозволяє суттєво скоротити час розрахунків.

У третьому підрозділі наведено розглянуті у дисертаційній роботі моделі розподілу яскравості по диску джерела, а саме: гаусівську, степеневу, з потемнінням до краю, моделі акреційного диска Шакури–Сюняєва. Для кожної моделі (у кожній реалізації поля мікролінз) будується крива блиску – залежність від часу відношення інтенсивностей лінзованого та нелінзованого джерела. Коефіцієнт підсилення для загального протяжного джерела можна представити аналітичною формулою:

$$K = \frac{\int d^2\mathbf{x} I(\mathbf{Y}(\mathbf{x}))}{\int d^2\mathbf{y} I(\mathbf{y})}, \quad (2)$$

де $\mathbf{y} = \mathbf{Y}(\mathbf{x})$ – рівняння лінзи (1), $I(\mathbf{x})$ – профіль поверхневого розподілу яскравості по диску джерела. В обчислювальному плані

розрахунок за цією формулою еквівалентний відомому методу “gaussian shooting” [31, 40, 49]. Фактично відбувається чисельне інтегрування згідно (2) з урахуванням мас і положень окремих мікролінз.

Найпростіша модель, що використовується для розрахунку і підгонки кривих блиску, є гаусівська модель (GS):

$$I_G(r) = \frac{1}{\pi R^2} \exp \left[- \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (3)$$

де $R_{1/2} = R\sqrt{\ln(2)}$, R – розмірний параметр.

Модель з потемнінням до краю (LD) зі степеневим індексом q [29] є найбільш прийнятною для опису зоряної поверхні, але і часто використовується для отримання кривих блиску при мікролінзуванні:

$$I_{LD}(r) = \frac{q+1}{\pi R^2} \Xi(r/R; q), \quad (4)$$

де

$$\Xi(\xi; q) = \Theta(1 - \xi^2)(1 - \xi^2)^q, \quad q \geq 0.$$

Для LD-моделі $R_{1/2} = R\sqrt{1 - (1/2)^{1/(q+1)}}$. Для фіксованого середньоквадратичного радіуса і $q \rightarrow \infty$, розподіл яскравості (4) прямує до гаусівського розподілу.

Моделі (3) і (4) описують клас компактних джерел з швидким спаданням яскравості зі збільшенням відстані від центра.

До класу моделей з повільним спаданням яскравості відносять степеневу модель (PL) [45, 46], яка описує повільно спадаюче джерело на великих r :

$$I_{PL}(r) = \frac{p-1}{\pi R^2} \left[1 + r^2/R^2 \right]^{-p}, \quad (5)$$

з невеликим значенням степеневого показника $p > 1$. Модель (5) може розглядатися як альтернатива до (4). Радіус половинної яскравості джерела для цієї моделі є $R_{1/2} = R\sqrt{2^{1/(p-1)} - 1}$. Аналогічно до (4), для фіксованого середньоквадратичного радіуса і $p \rightarrow \infty$, розподіл яскравості (5) прямує до гаусівського розподілу. Для малих p ми маємо повільно спадаючий розподіл.

Лінійна комбінація розподілів (3), (4), (5) з різними параметрами утворює досить широкий клас симетричних моделей для фітування будь-яких реальних фотометричних даних. З іншої сторони, (3) можна розглядати як основну модель для виявлення деяких параметрів джерела (наприклад розміру джерела), а (4) та (5) корисні у випадку розгляду поведінки яскравості джерела на великих r .

Модель акреційного диска Шакури–Сюняєва (AD) [44] визначена співвідношенням:

$$I_{AD}(r) = \frac{3R\theta(r-R)}{2\pi r^3} \left[1 - \sqrt{\frac{R}{r}} \right], \quad (6)$$

тут R — радіус внутрішнього краю акреційного диска. Для AD-моделі радіус половинної яскравості визначається як $R_{1/2} = 4R$. Ця формула описує загальну яскравість, проінтегровану по усіх частотах.

Модель акреційного диска з розподілом по довжинах хвиль (по частотах) розглядалася у застосуванні до ГЛС в роботі [33] (AD1):

$$I_{AD1}(r) = \frac{C_{AD1}}{R^2} \left[\exp\left(\frac{\kappa_1 \rho^{3/4}}{(1 - \rho^{-1/2})^{1/4}}\right) - 1 \right]^{-1} \theta(r - R), \quad (7)$$

де C_{AD1} — параметр нормування, κ_1 обчислюється чисельними методами з умови нормування, $\rho = r/R$.

Ми також розглядаємо спрощену версію (AD2) моделі AD [32]:

$$I_{AD2}(r) = \frac{C_{AD2}}{R^2} \left[\exp(\kappa_2 \rho^{3/4}) - 1 \right]^{-1}, \quad \rho = r/R, \quad (8)$$

тут $C_{AD2} = (\alpha \pi \kappa_2^\alpha \Gamma(\alpha) \zeta(\alpha))^{-1}$, $\alpha = 8/3$, де $\Gamma(x)$ — гамма-функція, $\zeta(x)$ — зета-функція Рімана, $\kappa_2 = 1.768$. AD2-модель нехтує ефектами останньої стабільної орбіти навколо чорної діри. Відповідно до [32] $R_{1/2}/R = 2.021$ є такими ж, як у випадку з (7).

Для порівняння кривих блиску було введено значення відносної різниці, що задається співвідношенням:

$$\eta = 2 \max_t \left(\frac{|K_i(t) - K_j(t)|}{K_i(t) + K_j(t)} \right), \quad (9)$$

де $K_i(t)$ і $K_j(t)$ — відповідні криві блиску для i -ї та j -ї моделей вздовж траєкторії джерела, що рухається рівномірно і прямолінійно відносно лінзуючої галактики.

Незважаючи на те, що інтенсивності у моделях (6), (7) та (8) є досить різними, криві, розраховані відповідно до цих моделей, є досить схожими (рис. 2), тому для встановлення різниці між ними було прораховано 100 незалежних реалізацій поля мікролінз, відносна різниця між кривими блиску була розрахована відповідно до (9).

У розділі 3 “**Прояви структури джерела у процесах гравітаційного мікролінзування**” розглянуто статистичні відмінності між кривими блиску для різних моделей джерела, зображення якого

мікролінзовані точковими масами лінзуючої галактики. Можливість виявлення структури та розміру джерела в подіях мікролінзування обговорюється в уже класичних роботах [33, 38] та багатьох інших, та чіткої відповіді на це питання і досі немає, оскільки криві блиску для різних моделей джерела є досить схожими (рис. 2). В першому підрозділі деталізовано мету та проблематику впливу структури та розміру джерела на криві блиску зображень мікролінзованого джерела, подано опис результатів інших авторів.

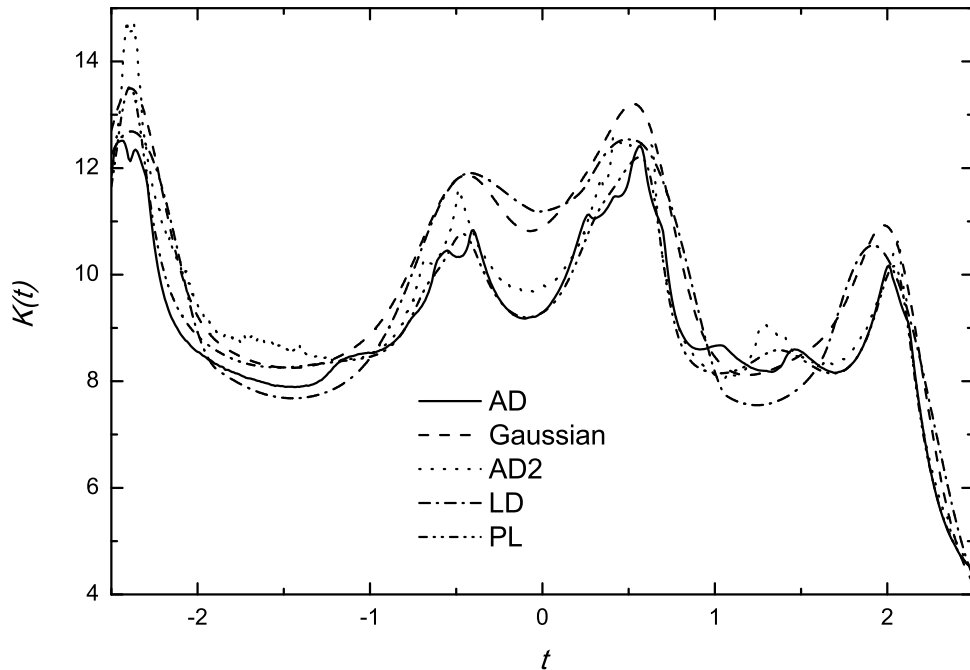


Рис. 2. Криві блиску для різних моделей джерела, що відповідають карті коефіцієнтів підсилення (рис. 1)

У другому підрозділі проведено статистичне порівняння кривих блиску зображень мікролінзованого джерела при різних моделях розподілу яскравості по диску джерела (усі моделі джерела, що використано у дисертації, описано у третьому підрозділі Розділу 2) при однакових радіусах половинної яскравості $R_{1/2}$. Розрахунки кривих блиску, які проведені в наближенні лінійної каустики, так і прямі обчислення показують, що підсилення акреційного диска (6) досить сильно (приблизно на $8 \div 12\%$) відрізняється від інших розглянутих типів джерела, тоді як різниця між моделями з гаусівським та степеним ($p = 3/2$) розподілом яскравості в $2 \div 3$ рази менша. Якщо виходити з точності фотометричних вимірювань $0.02 \div 0.03^m$, то відмінності моделі (3) від моделей (4), (5), (7), в принципі, можуть бути помічені у спостереженнях кривих блиску в ГЛС. Відмінності між

моделями дещо зменшуються зі зменшенням розміру джерела. Коли протягне джерело знаходиться далеко від каустик, його підсилення практично збігається з підсиленням точкового джерела. Тому зрозуміло, що оцінки стосуються, в першу чергу, подій з великим підсиленням, що відповідають або перетинам каустик, або проходженням джерела поблизу каустик гравітаційно-лінзової системи, зокрема біля каспових точок.

У третьому підрозділі наведено результати порівняння кривих блиску у випадку наявності зовнішнього зсуву γ . Відносні різниці між кривими блиску η , що відповідають різним моделям розподілу яскравості по диску джерела, зменшуються для усіх моделей зі збільшенням зовнішнього зсуву γ .

Таблиця 1

Відносна різниця η між кривими блиску K_i та K_j , що розраховано для джерела з різними моделями розподілу яскравості по диску, у випадку ненульового зовнішнього зсуву ($\gamma \in [0.3; 0.5]$). Джерело рухається горизонтально (вздовж напрямку зовнішнього зсуву γ).

i -та	j -та модель	$\gamma = 0.3$	$\gamma = 0.4$	$\gamma = 0.5$
GS	PL	0.089 ± 0.0012	0.071 ± 0.0013	0.052 ± 0.0015
GS	LD	0.069 ± 0.0016	0.049 ± 0.0013	0.028 ± 0.001
GS	AD2	0.082 ± 0.0012	0.063 ± 0.0013	0.04 ± 0.001
PL	LD	0.098 ± 0.0015	0.075 ± 0.0015	0.05 ± 0.0012
PL	AD2	0.042 ± 0.001	0.042 ± 0.001	0.038 ± 0.0012
LD	AD2	0.099 ± 0.0018	0.073 ± 0.0015	0.044 ± 0.0011

Із таблиці 1 видно, що різниця між моделями η зменшується зі збільшенням γ з діапазону $0 - 0.5$. Слід також зауважити, що тенденція до зменшення відносної різниці η не залежить від напрямку руху джерела. Але, як показало моделювання, коли джерело рухається поперек зсуву, результат такий самий. Це пов'язано із тим, що при зростанні γ густина каустик зростає в обох напрямках і джерело з однаковою ймовірністю зазнає подій з сильним підсиленням незалежно від напрямку траєкторії. Це спостерігається для усіх моделей джерела.

У спостереженнях задалегідь невідомо, якою моделлю джерела слід апроксимувати криві блиску (криві підсилення). Тому більш правильно порівнювати криву блиску певної моделі (наприклад степеневі), що має заданий радіус, із гаусівською моделлю, з нефіксованим радіусом, що є вільним параметром підгонки. Тому, у четвертому підрозділі описано фітування кривої блиску іншою кривою (у випадку перетину траєкторії джерела простої каустики) для джерела з гаусів-

ською моделлю розподілу яскравості, але із іншим розміром половинної яскравості $R_{1/2}$. Як показало моделювання, при цьому різниця η зменшується (як і слід було очікувати), але не дуже сильно. Тому для грубої оцінки η можна користуватися результатами порівняння моделей з однаковим $R_{1/2}$. Моделювання проводилося при $\gamma = 0$. Отримані результати показують, що гаусівська модель успішно може відтворити криву блиску для джерела з потемнінням до краю, що пояснюється тим, що моделі належать до одного класу – моделі з швидким спаданням яскравості. При початковій різниці між цими моделями у 4%, при варіації розміру $R_{1/2}$ вдалося її зменшити до 3%. У випадку ж підгонки кривих блиску для моделі акреційного диска різницю не вдається зменшити менше 7%, тому відтворити таку криву блиску гаусівським джерелом з іншим розміром неможливо (рис. 3).

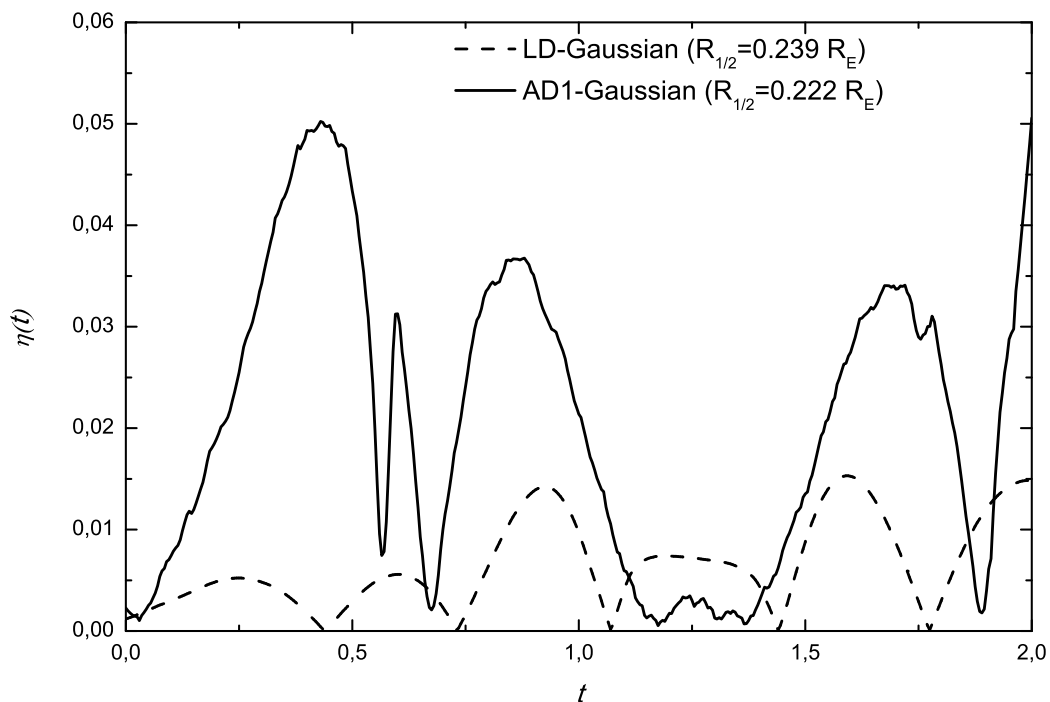


Рис. 3. Відносна різниця (η) між коефіцієнтами підсилення K_i та K_j як функція часу для випадку найменших η при фітуванні довільної кривої кривою для гаусівського джерела з вільним параметром $R_{1/2}$.

У п'ятому підрозділі розглянуто статистичну різницю між кривими блиску для джерел з різними моделями джерела у випадку перетину “простих” каустик – траєкторія джерела перетинає лише одну каустику, що має дугоподібну форму. У цьому випадку з-поміж усіх випадкових реалізацій “на око” вибиралися реалізації, де дже-

рело перетинає лише одну каустику. Наявність випадку із простими каустиками пов'язано із тим, що часто події мікролінзування в позагалактичних ГЛС підганяють аналітичними моделями в наближенні лінійної каустики [25]. Відносна різниця між кривими блиску η для випадку “простих” каустик, з-поміж розглянутих моделей, є найбільшою при порівнянні моделей з потемнінням до краю (4) та степеневій моделі (5) із моделлю акреційного диска (6), $\eta = 12\%$, найменша різниця ж для моделей з одного класу (компактні джерела, джерела з повільним спаданням яскравості від центра). Цей результат майже не відрізняється від більш загального випадку, розглянутого у другому підрозділі цього ж розділу. Виходячи з сучасної точності фотометричних вимірювань на рівні $0.02 \div 0.03^m$, відмінності моделей (3) та (4) від моделей (5), (6), (7), в принципі, можуть бути помічені у спостереженнях кривих блиску в ГЛС.

У розділі 4 “Гравітаційне мікролінзування як інструмент дослідження розподілу маси у площині лінзи” йдеться, насамперед, про принципову можливість виявлення протяжних згустків – при появі в майбутньому більш довготривалих і точних рядів спостережуваних даних, особливо для об'єктів, де внесок оптичної глибини ГМ $\sigma_{ГМ}$ має достатню величину. Розглянуто вплив зовнішнього зсуву, оптичної глибини мікролінзування та частки подвійних зір в лінзуючій галактиці на статистику кривих блиску мікролінзованого джерела. Обчислено автокореляційні функції кривих блиску (рис. 5 та рис. 6) за різної частки та розмірів протяжних мас (що можна інтерпретувати як згустки холодної темної матерії) для виявлення їх впливу на події мікролінзування.

В першому підрозділі, що є оглядовим, обговорюються загальні проблеми, пов'язані з можливостями досліджувати розподіл матерії, включаючи згустки холодної темної матерії, у лінзуючій галактиці за допомогою мікролінзування. В другому підрозділі розглянуто методи чисельних розрахунків кривих блиску за наявності згустків матерії. В третьому підрозділі побудовано розподіли коефіцієнтів підсилення зображень мікролінзованого джерела при різних оптичних глибинах мікролінзування. Оптична глибина мікролінзування вибиралася у досить широкому діапазоні значень $\sigma \in [0.1; 0.55]$, що покриває діапазон оцінок оптичної глибини мікролінзування для QSO 2237+0305 та низки інших гравітаційно-лінзових систем [43]. При малих оптичних глибинах мікролінзування $\sigma < 0.45$ ці розподіли мають чіткий максимум, що зміщується в область більших значень K при збільшенні σ , але в околі $\sigma = 0.5$ (рис. 4) спостерігається утворення бімодальної кривої.

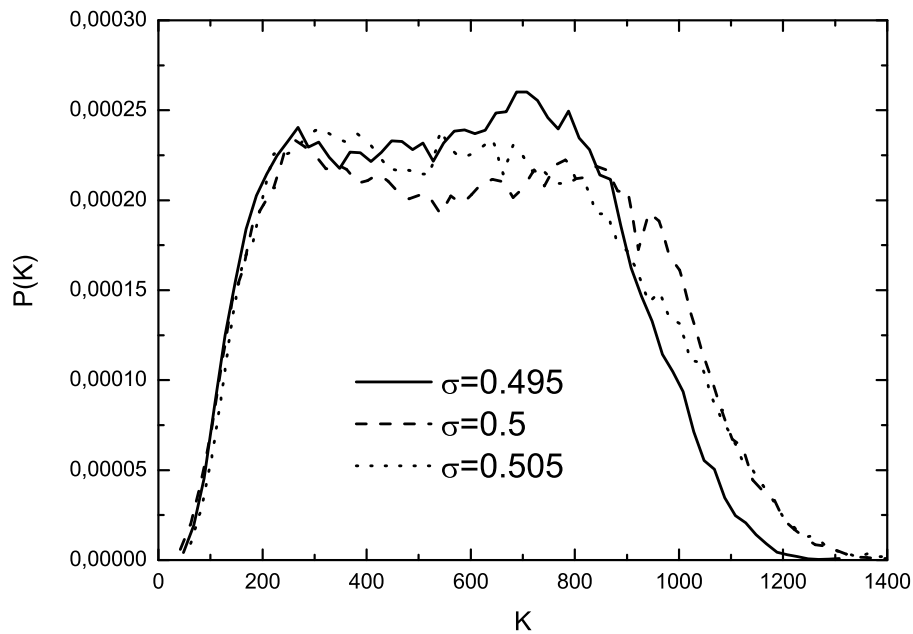


Рис. 4. Розподіл коефіцієнтів підсилення для джерела з розміром $R_{1/2} = 0.1$ при різних оптичних глибинах $\sigma = 0.495; 0.5; 0.505$ і $\Delta K = 20$

При значеннях $\sigma > 0.55$ розподіли коефіцієнтів підсилення знову мають один чіткий максимум, який продовжує зсуватися в область більших K при збільшенні σ . Така поведінка говорить про наявність виділених значень оптичної глибини, що при достатньо тривалих фотометричних спостереженнях можуть бути виявлені в розподілах коефіцієнтів підсилення мікролінзованого джерела позагалактичних ГЛС. Подібні криві отримано і іншими авторами, так, у роботі [24], аналізуючи спостережувані дані, автори також знаходять двогорбі криві розподілу коефіцієнтів підсилення. У випадку ненульового зовнішнього зсуву γ , що змінюється від 0.1 до 0.7 спостерігається зворотний ефект: для більших значень зовнішнього зсуву розподіл коефіцієнтів підсилення при сталій оптичній глибині $\sigma = 0.5$ зсувається в область менших K . При цьому бімодальний вигляд кривої розподілу зникає – з'являється чіткий пік. Така поведінка кривих блиску пов'язана з тим, що при невеликих значеннях $\gamma < 0.2$ каустична картина не є дуже густою, при збільшенні γ каустики починають розриватися, що зменшує ймовірність подій з сильним підсиленням.

Більшість авторів, розглядаючи позагалактичне мікролінзування (наприклад [32]), припускають, що точкові мікролінзи є одиночними

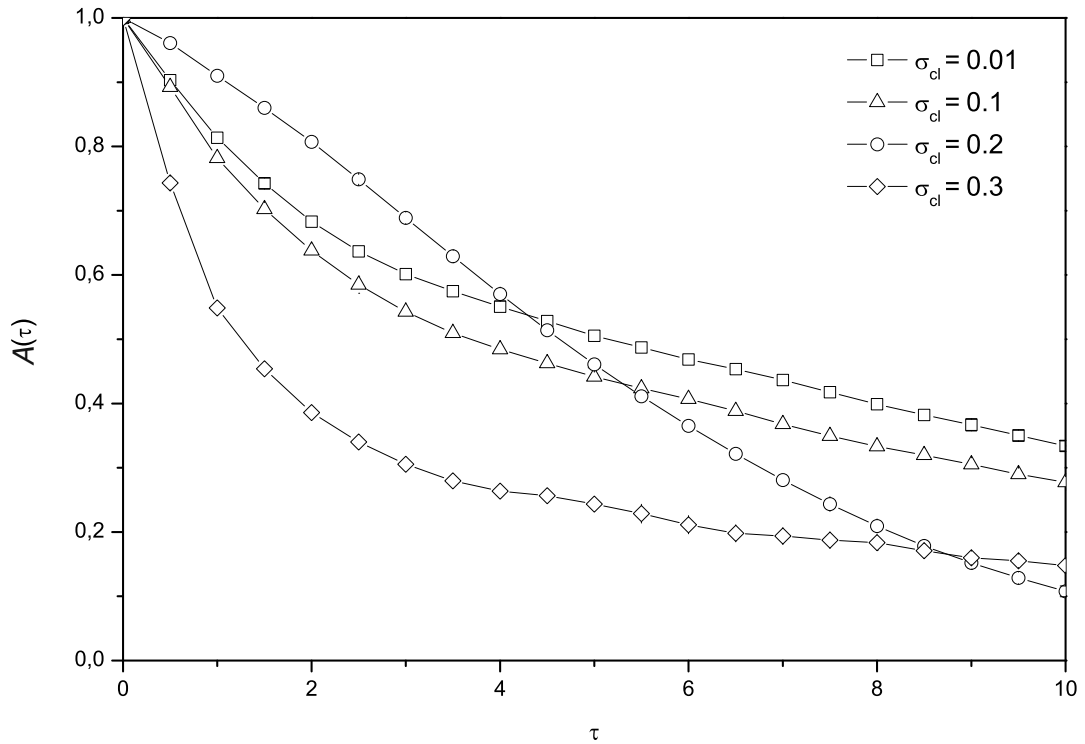


Рис. 5. Автокореляційна функція кривих підсилення мікролінзованого гаусівського джерела при $\sigma_{cl} \in [0.01; 0.3]$ та при $\kappa = 5$ для моделі згустків (10) $\alpha = 1$.

зорями, але як відомо у галактиках частка подвійних зір є досить великою, тому у дисертації також розглянуто саме мікролінзування у випадку наявності подвійних мікролінз. У четвертому підрозділі розглянуто мікролінзування на подвійних точкових мікролінзах. Ми порівнюємо криві блиску для обох випадків при різних значеннях оптичної глибини подвійних систем, моделі розподілу яскравості по диску джерела та розміру джерела. Моделювання проведено наступним чином: одиничні мікролінзи ділилися на дві маси, відстань між якими вибиралася випадково в діапазоні $d \in [0.01; 0.05]R_E$, напрямок між новоутвореними лінзами також був довільним. Загальна оптична глибина мікролінзування в системі змінювалася $\sigma \in [0.3; 0.5]$, розмір джерела був $R_{1/2} = 0.1; 0.15; 0.2$, такий розмір джерела обрано аби він був менший, ніж характерний радіус Ейнштейна для мікролінз $M_i = M = 1R_E$, проте більший за просторове розділення між мікролінзами-компаньйонами d . У дисертації показано, що найбільша відносна різниця η між кривими блиску для випадку одиничних та подвійних мікролінз спостерігається для моделі акреційного диска Шакури–Сюняєва (6) і досягає 3% при $\sigma = 0.3$. Слід зауважити, що η зменшується при збільшенні радіуса джерела $R_{1/2}$ від 3% до май-

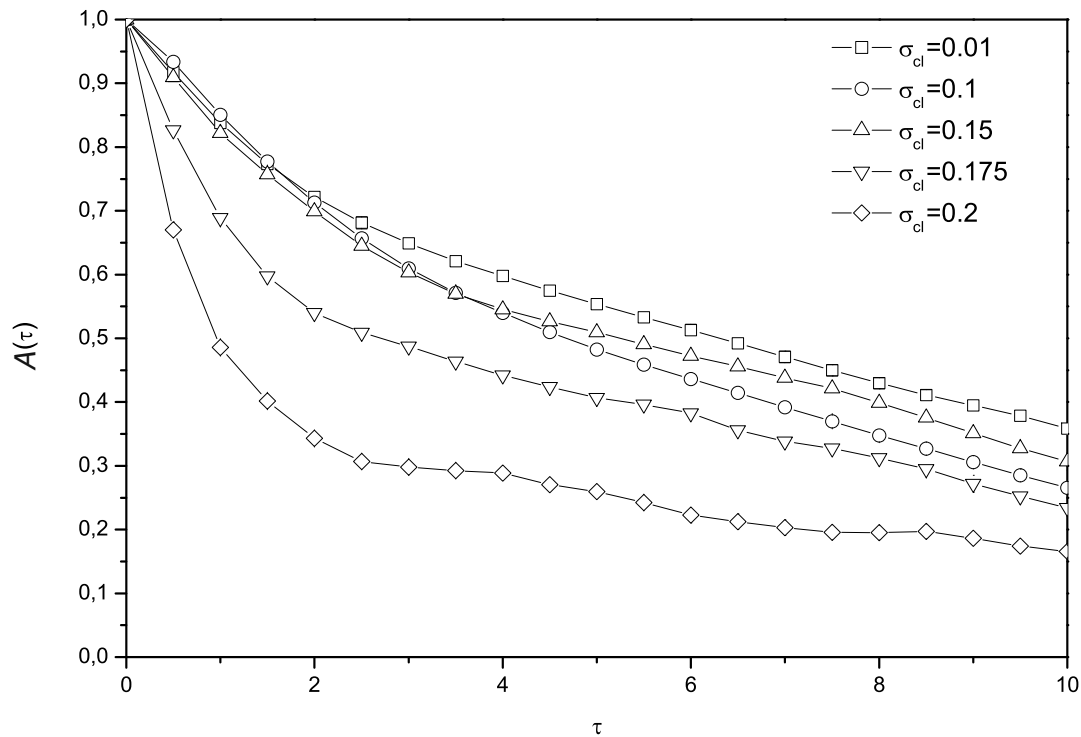


Рис. 6. Автокореляційні функції кривих підсилення мікролінзованого гаусівського джерела при $\sigma_{cl} \in [0.01; 0.2]$ та при $\kappa = 10$ для моделі згустків (10) $\alpha = 1$.

же 1% та зменшується при збільшенні оптичної глибини від 3% при $\sigma = 0.3$ до менше 1% при $\sigma = 0.5$. Таку поведінку значення η спостерігаємо також для інших розглянутих моделей; це пов'язано з тим, що при збільшенні радіуса $R_{1/2}$ джерело “згортає” більшу площу – дрібні структури, пов'язані з подвійними системами, менше впливають на сумарний коефіцієнт підсилення. Це ж і стосується збільшення σ : при більших σ густина каустик збільшується, а тому дрібні структури, що породжені наявністю подвійних систем, нівелюються сильнішим впливом звичайних каустик. У п'ятому підрозділі розглянуто вплив окремих згустків ТМ на події мікролінзування, обґрунтовано необхідність використання автокореляційних функцій для встановлення впливу численних згустків на криві блиску при мікролінзуванні в ГЛС. У шостому підрозділі розглянуто дві моделі мікролінзування з протяжними масами. Перша модель – це проста модель згустків ТМ [4], яка описує систему N центрально-симетричних протяжних мас, що є незалежними від точкових мікролінз. Друга модель передбачає, що точкові мікролінзи знаходяться у центрі мас протяжних мас. Для обох моделей розглядаються згустки з різними розмірами та за різних зовнішніх зсувів. Рівняння гравітаційного мікролінзува-

ння отримується стандартним чином в [23, 24] та в цьому випадку [4] має вигляд:

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} - \sum_{i=1}^N \left[\frac{\alpha R_{E,i}^2 (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i)}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|^2} + \frac{(1 - \alpha) R_{E,i}^2}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i|^2 + R_{c,i}^2} \right], \quad (10)$$

де α – параметр “переносу”, що визначає співвідношення між масами точкових та протяжних мікролінз, $R_{E,i}$ – відповідний розмір кільця Ейнштейна: $R_{E,i}^2 = 4GM_i D_{ds} / (c^2 D_d D_s)$, D_s , D_d , D_{ds} – відстань між спостерігачем та джерелом, між спостерігачем та лінзою, між джерелом і лінзою відповідно, \mathbf{x}_i – кутове положення центра, $R_{c,i}$ – характерний розмір i -ї протяжної маси M_i . Слід зазначити, що загальна оптична глибина $\sigma_{total} = const$. Крім того, розглянуто різні значення зовнішнього зсуву γ , так було перевірено вплив згустків у випадку відсутності зовнішнього зсуву $\gamma = 0$ та коли $\gamma = 0.1; 0.2; 0.3$. Останній варіант найкраще відповідає параметрам спостережуваних позагалактичних ГЛС (наприклад для Q2237+0305 “Хрест Ейнштейна” [43]).

Більш реалістичним варіантом у порівнянні із моделлю із $\alpha = 1$, що підтверджено сучасними дослідженнями та чисельними симуляціями [34, 42, 48], є варіант утворення таких згустків темної матерії навколо масивних об’єктів, наприклад зір. Для опису такого випадку у дисертації для другої моделі прийнято $\alpha = 1/2$, відповідно положення центра мас згустків співпадає з положенням точкових мікролінз. Загальна оптична глибина, як і для випадку з першою моделлю, $\sigma_{total} = const$. У дисертації досліджено вплив зовнішнього зсуву γ на статистику кривих підсилення: обчислюємо автокореляційні функції кривих блиску при $\gamma = 0.1; 0.2; 0.3$. Автокореляційні функції $A(\tau)$ кривих блиску для двох варіантів розмірів згустку $\kappa = R_{c,i} / R_{E,i}$ при різних відносних частках точкових і протяжних мас наведено на рис. 5 та рис. 6.

Для другої моделі, де положення мікролінз співпадає з положенням центра мас згустків, $\alpha = 1/2$, різниця між автокореляційними функціями кривих блиску також залежить від частки згустків в загальній оптичній глибині, але така залежність має монотонний характер: при збільшенні частки згустків та при збільшенні їх розміру від $k = 1$ до $k = 5$ різниця між автокореляційними функціями незначно зменшується при $\tau > 1$. Але при $k = 10$ спостерігається практично повна незалежність автокореляційних функцій від оптичної глибини. Така поведінка кривих блиску пов’язана з тим, що при великих значеннях розміру згустків фактично з’являється ненульова ефективна оптична глибина неперервної матерії σ_c .

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі досліджено вплив структури джерела та розподілу мас в лінзуючій галактиці на статистику кривих блиску мікролінзованого джерела. Зокрема:

1. На основі статистичного моделювання кривих підсилення зображень мікролінзованого джерела у позагалактичних ГЛС отримано оцінки точності спостережень, що необхідні для того, щоб розрізнити за кривими блиску такі моделі джерела: гаусівську, степеневу, модель з потемнінням до краю, моделі акреційного диска. Показано, що відносна різниця η між кривими блиску для різних моделей джерела з реалістичними розмірами може досягати $8 \div 12\%$, що свідчить про принципову можливість відрізнити ці моделі зі спостережень.
2. Побудовано розподіли коефіцієнтів підсилення для гаусівського джерела у випадку точкових мікролінз в залежності від оптичної глибини мікролінзування σ та зовнішнього зсуву γ , підтверджено існування виділених значень σ , за яких розподіл набуває бімодальної форми.
3. Побудовано автокореляційні функції кривих блиску у випадку системи точкових та протяжних мікролінз. Запропоновано та досліджено дві моделі однорідного розподілу мас у площині лінзи: (i) розподіл згустків та точкових мас окремо, (ii) розподіл, що передбачає наявність суперпозицій точкових мас та згустків. Показано, що автокореляційні функції можуть суттєво відрізнятися для різних значень внеску протяжних та точкових мікролінз з діапазону оптичних глибин $\sigma \in [0; 0.3]$. Автокореляційні функції кривих блиску для моделі (i), на відміну від (ii), мають немонотонну поведінку при $\sigma_c \sim 0.2$ та $\sigma_{total} = 0.3$. Встановлено, що зміна γ в інтервалі $[0.1; 0.3]$ слабо впливає на автокореляційні функції.

Проведені дослідження є цікавими з точки зору теорії і практики гравітаційно-лінзових досліджень. Отримані результати можуть бути використані для з'ясування ключових характеристик усіх складових позагалактичної ГЛС.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.

В наукових фахових виданнях:

1. Слюсар В. Моделювання кривих блиску мікролінзованого протяжного джерела / Слюсар В., Александров О., Жданов В. // Вісник Київського національного університету. Серія “Астрономія”. – 2009. – В. 45. – С. 29–33.
2. Слюсар В. Статистика коефіцієнтів підсилення при мікролінзуванні гаусівського джерела точковими масами / Слюсар В. // Вісник Київського національного університету. Серія “Астрономія”. – 2011. – В. 47. – С. 12–14.
3. Alexandrov A.N. Caustic crossing events and source models in gravitational lens systems / A.N. Alexandrov, V.M. Sliusar, V.I. Zhdanov // Ukrainian Journal of Physics. – 2011. – Vol. 56, No. 4. – P. 389–400.
4. Zhdanov V.I. Analytical methods in gravitational microlensing / Zhdanov V.I., Alexandrov A.N., Fedorova E.V., Sliusar V.M. // ISRN Astronomy & Astrophysics. – ID 906951. – doi:10.5402/2012/906951.
5. 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. – Vol. 16, No. 3. – P. 3904(1-8).
6. Жданов В.І. Космологічні та астрофізичні виклики загальної теорії відносності / В.І. Жданов, О.В. Федорова, О.М. Александров, В.М. Слюсар // Вісник Астрономічної Школи. – 2013. – Т. 9, №. 1. – С. 20–27.
7. Слюсар В.Н. Статистика кривых блеска удаленного источника, микролинзированного системой точечных и протяженных масс / В.Н. Слюсар, В.И. Жданов, А.Н. Александров, Е.В. Федорова // Кинематика и физика небесных тел. – 2015. – Т. 31, №. 2. – С. 47-58.

У матеріалах та тезах конференцій:

8. Fedorova E. Observational appearances of dark matter clumps via gravitational microlensing / E. Fedorova, A. Del Popolo,

- V.I. Zhdanov, A.N. Alexandrov, V. Sliusar // 49th Rencontres de Moriond (15-22 Mar 2014. La Thuile, Italy), Proceedings. – 2014. – P. 407–409.
9. Sliusar V.M. Simulation of amplification curves of an extended microlensed source / V.M. Sliusar, A.N. Alexandrov, V.I. Zhdanov // VIII International Conference “Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology” (Kyiv, May 21-23, 2008). Book of abstracts. – P. 9.
 10. Слюсар В.М. Статистика кривих блиску віддаленого мікролінзованого джерела при різних моделях його структури / В.М. Слюсар, В.І. Жданов // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Еврика-2009” (Львів, 20-22 травня 2009). Тези. – В23.
 11. Sliusar V.M. Distribution of brightness amplifications of extended source microlensed by point masses / Sliusar V.M., Zhdanov V.I. // International Conference “Astronomy and Space Physics in Taras Shevchenko National University of Kyiv” (Kyiv, May 2-7, 2010). Book of abstracts. – P. 91.
 12. Sliusar V.M. Source models in high amplification events of gravitational lens systems / V.M. Sliusar, V.I. Zhdanov // Young scientists conference: “Modern Problems of Theoretical Physics” (Kyiv, December 22-24, 2010). Book of abstracts. – P. 11.
 13. Sliusar V.M. Microlensing of an extended source by binary microlenses / Sliusar V.M., Zhdanov V.I. // 18th Young Scientists’ Conference on Astronomy and Space Physics (Kyiv, May 2-7, 2011). – Book of Abstracts. – P. 47.
 14. Sliusar V.M. Strong microlensing effects in gravitational lens system: simulations and analytic results / Sliusar V.M., Alexandrov A.N., Zhdanov V.I. // International Conference “Astroparticle Physics, Gravitation and Cosmology”. (Kyiv, June, 2011). Book of Abstracts. – P. 40.
 15. Sliusar V.M. Gravitational microlensing, source models and impact of binary stars / V.M. Sliusar, V.I. Zhdanov // The Sixth Scientific Conference “Selected issues of astronomy and astrophysics” in Honor of Bohdan Babiy. (Lviv, October 7, 2011). Book of Abstracts. – P. 160.
 16. Zhdanov V.I. Gravitational lensing in a simple model of dark matter clumps / Zhdanov V.I., Fedorova E., Sliusar V.M., Del Popolo A., Alexandrov A.N. // Astronomy and space physics in Kyiv University. (Kyiv, May 22-25, 2012). Book of Abstracts. – P. 33–34.
 17. Sliusar V.M. Impact of subhalo structures in extragalactic lens

- systems on the light curves of microlensed source / Sliusar V.M., Zhdanov V.I. // International Conference “Astronomy and Space Physics in Kyiv University”. (Kyiv, May 21-24, 2013). Book of Abstracts. – P. 27.
18. Sliusar V.M. Statistics of light curves of a distant source microlensed by a system of point and extended masses / V.M. Sliusar, V.I. Zhdanov, A.N. Alexandrov, E.V. Fedorova // *Астрономія та фізика космосу в Київському університеті*. (Київ, 27-30 травня 2014). Тези. – С. 39.
 19. Fedorova E. Gravitational microlensing as a tool for dark matter hunt / E. Fedorova, V.M. Sliusar, V.I. Zhdanov, A. Del Popolo, A.N. Alexandrov, J. Surdej // *Hot topics in Modern Cosmology*. (Cargese, France, May 12-17, 2014). [Електронний ресурс]. – http://www.cpt.univ-mrs.fr/cosmo/SW_2014/PPT/Fedorova.pdf
 20. Zhdanov V.I. Microlensing of a distant source by point and extended masses / V.I. Zhdanov, V.M. Sliusar, A.N. Alexandrov, E.V. Fedorova // XIV-а Міжнародна астрономічна Гамовська школа-конференція “Астрономія на стыке наук – астрофізика, космологія и гравитация, космомікрофізика, радіоастрономія, астробіологія”. (Одеса. 17-24 серпня, 2014). Тези. – С. 28.
 21. Слюсар В.М. Мікролінзування віддалених джерел в багаточастинкових гравітаційно-лінзових системах: статистика кривих блиску / В.М. Слюсар, В.І. Жданов // *Сьома міжнародна наукова конференція пам’яті Б.Т.Бабія “Вибрані питання астрономії та астрофізики”*. (Львів, 8-10 жовтня 2014). Тези. – С. 35.
 22. Sliusar V.M. Microlensing of distant sources in multibody gravitational lensing system : light curves statistics / V.M. Sliusar, V.I. Zhdanov // VI Young Scientists Conference “Problems of theoretical physics” dedicated to the 105 anniversary of M.M. Bogolyubov. (Kyiv, November 25-27, 2014). Book of abstracts. – P. 22.

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

23. Захаров А.Ф. Гравитационные линзы и микролинзы / Захаров А.Ф. – М.: Янус-К, 1997. – 328 с.
24. Минаков А.А. Статистический анализ гравитационного микролинзирования / Минаков А.А., Вакулик В.Г. – К.: Наукова думка, 2010. – 262 с.

25. Alexandrov A.N. Asymptotic Expansions and Amplification of a Gravitational Lens Near a Fold Caustic / A.N. Alexandrov, V.I. Zhdanov // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2011. – Vol. 417, Iss. 1. – P. 541–554.
26. Chang K. Flux variations of QSO 0957+561 A, B and image splitting by stars near the light path / Chang K., Refsdal S. // *Nature.* – 1979. – Vol. 282. – P. 561–564.
27. Chang K. Erratum – Star Disturbances in Gravitational Lens Galaxies / Chang K., Refsdal S. // *Astron. and Astrophys.* – 1984. – Vol. 139, N. 2. – P. 558.
28. Dai X. The Sizes of the X-ray and Optical Emission Regions of RXJ 1131-1231 / X. Dai, C.S. Kochanek, G. Chartas, et al. // *Astrophys. J.* – 2010. – Vol. 709. – P. 278.
29. Dominik M. Theory and practice of microlensing light curves around fold singularities / Dominik M. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2004. – Vol. 353. – P. 69–86.
30. Grieger B. A parallax effect due to gravitational micro-lensing / Grieger B., Kayser R., Refsdal S. // *Nature.* – 1986. – Vol. 324. – P. 126–127.
31. Kayser R. Astrophysical applications of gravitational micro-lensing / Kayser R., Refsdal S., Stabell R. // *Astron. and Astrophys.* – 1986. – Vol. 166. – P. 36–48.
32. Kochanek C.S. Quantitative Interpretation of Quasar Microlensing Light Curves / Kochanek C.S. // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 605, Iss. 1. – P. 58–77.
33. Mortonson M.J. Size Is Everything: Universal Features of Quasar Microlensing with Extended Sources / M. J. Mortonson, P. L. Schechter, J. Wambsganss // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 628, no. 2. — P. 594–603.
34. Navarro J.F. The Structure of Cold Dark Matter Halos / J.F. Navarro, C.S. Frenk, S.D. White // *Astrophys. J.* – 1996. – Vol. 463. – P. 563.
35. Oguri M. Gravitational Lens Time Delays: A Statistical Assessment of Lens Model Dependences and Implications for the Global Hubble Constant / M. Oguri // *Astrophys. J.* – 2007. – Vol. 606, No. 1. – P. 1-15.
36. Oguri M. Gravitationally lensed quasars and supernovae in future wide-field optical imaging surveys / M. Oguri, P.J. Marshall // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2010. – Vol. 405, Iss. 4. – P. 2579-2593.
37. Paczynski B. Gravitational microlensing by the galactic halo / Paczynski B. // *Astrophys. J.* – 1986. – Vol. 304. – P. 1-5.

38. Poindexter S. The spatial structure of an accretion disk / Poindexter S., Morgan N., Kochanek C. S. // *Astrophys. J.* – 2008. – Vol. 673, Iss. 1. – P. 34.
39. Schild R. Microlensing of a Ring Model for Quasar Structure / R. Schild, V. Vakulik // *Astron. J.* – 2003. – Vol. 126. – P. 689–695.
40. Schneider P. Apparent Number Density Enhancement of Quasars Near Foreground Galaxies due to Gravitational Lensing-Part Two – the Amplification Probability Distribution and Results / Schneider P., Weiss A. // *MPA Repors* – 1987. – Vol. 311. – P. 46–62.
41. Schneider P. Gravitational Lenses / Schneider P., Ehlers J., Falco E.E. // *Grav. Lens.* – 1992. – Vol. XIV. – P. 560.
42. Schneider A. Nonlinear evolution of cosmological structures in Warm Dark Matter models. / Schneider A., Smith R.E., Macci A.V., Moore B. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2012.– Vol. 424, N 1. – P. 684–698.
43. Schmidt R. Weighing a galaxy bar in the lens Q2237 + 0305 / R. Schmidt, R.L. Webster, F.G. Lewis // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 1998. – Vol. 295, Iss. 2. – P. 488–496.
44. Shakura N.I. Disk Model of Gas Accretion / Shakura N.I., Sunyaev R.A. // *Astron. and Astrophys.* – 1973. – Vol. 24. – P. 337.
45. Shalyapin V.N. Caustic crossing in the gravitational lens Q2237+0305 / Shalyapin V.N. // *Astronomy Lett.* – 2001. – Vol. 27, Iss. 3. – P. 150–155.
46. Shalyapin V.N. The Nature and Size of the Optical Continuum Source in QSO 2237+0305 / V.N. Shalyapin, L.J. Goicoechea, D. Alcalde, et al. // *Astrophys. J.* – 2002. – Vol. 579, No. 1. – P. 127–135.
47. Shull J.M. Where do galaxies end? / Shull J.M. // *Astrophys. J.* – 2014. – Vol. 784, No. 2. – id. 142(10pp).
48. Stadel J. Quantifying the heart of darkness with GALO-a multi-billion particle simulation of a galactic halo / Stadel J., Potter D., Moore B., et al. // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* – 2009. – Vol. 398. – P. L21–L25.
49. Wambsganss J. Interpretation of the microlensing event in QSO 2237+0305 / Wambsganss J., Paczynski B., Schneider P. // *Astrophys. J.* – 1990. – Vol. 358. – P. L33–L36.
50. Wambsganss J. Gravitational lensing: numerical simulations with a hierarchical tree code / J. Wambsganss // *Journal of Computational and Applied Mathematics.* – 1999. – Vol. 109, Iss. 1-2. – P. 353–372.

АНОТАЦІЯ

***Слюсар В. М.* Мікролінзування віддалених джерел в багаточастинкових гравітаційно-лінзових системах: статистика кривих блиску. — Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 — астрофізика, радіоастрономія. — Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2015.

Розглянуто гравітаційне мікролінзування віддалених джерел стохастичною системою точкових та протяжних мас, що моделюють згустки темної матерії. Встановлено, що в подіях з великим підсиленням можна виділити дві групи моделей джерела, які можна розрізнити на сучасному рівні фотометричної точності за спостережуваними кривими блиску: а) компактні моделі (гаусівська, з потемнінням до краю); б) моделі з повільним спаданням яскравості від центра до країв (степенева модель з невеликими показниками степеня, модель Шакури–Сюняєва). За результатами статистичного аналізу встановлено, що різниця між кривими блиску, що відповідають різним групам, сягає 12%. Також показано, що врахування подвійних систем у лінзуючій галактиці несуттєво впливає на цю оцінку. Варіюючи оптичну глибину мікролінзування в лінзуючій галактиці, підтверджено наявність виділених значень оптичної глибини для низки моделей розподілу яскравості по диску джерела, що проявляється у двогорбому вигляді розподілу коефіцієнтів підсилення. В межах запропонованої моделі протяжних згустків темної матерії отримано автокореляційні функції кривих блиску в залежності від частки згустків в загальній оптичній глибині мікролінзування. Перевірено також вплив розміру згустку та різного зовнішнього зсуву в багаточастинковій гравітаційно-лінзовій системі. Показано, що поведінка автокореляційних функцій в залежності від оптичної глибини згустків має немонотонний характер.

Ключові слова: гравітаційне мікролінзування, темна матерія, позагалактичні гравітаційно-лінзові системи, структура мікролінзованого джерела, розподіл маси в лінзуючій галактиці.

АННОТАЦИЯ

***Слюсар В. Н.* Микролинзирование удаленных источников в многочастичных гравитационно-линзовых системах: статистика кривых блеска. — Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика, радиоастрономия. — Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2015.

Рассмотрено гравитационное микролинзирование удаленных источников стохастической системой точечных и протяженных масс, моделирующих сгустки темной материи. Установлено, что в событиях с большим усилением можно выделить две группы моделей источников, которые можно различить на современном уровне фотометрической точности по наблюдаемым кривым блеска: а) компактные модели (гауссовская, с потемнением к краю); б) модели с медленным убыванием яркости от центра к краям (степенная модель с небольшими показателями степени, модель Шакуры–Сюняева). По результатам статистического анализа установлено, что разница между кривыми блеска, что соответствуют различным группам, достигает 12%. Также показано, что учет двойных систем в линзирующей галактике несущественно влияет на эту оценку. Варьируя оптическую глубину микролинзирования в линзирующей галактике, подтверждено наличие выделенных значений оптической глубины для ряда моделей распределения яркости по диску источника, что проявляется в двугорбом виде распределения коэффициентов усиления. В рамках предложенной модели протяженных сгустков темной материи получены автокорреляционные функции кривых блеска в зависимости от доли сгустков в общей оптической глубине микролинзирования. Проверено также влияние размера сгустка и различного внешнего смещения в многочастичной гравитационно-линзовой системе. Показано, что поведение автокорреляционных функций в зависимости от оптической глубины сгустков имеет немонотонный характер.

Ключевые слова: гравитационное микролинзирование, темная материя, внегалактические гравитационно-линзовые системы, структура микролинзированного источника, распределение масс в линзирующей галактике.

ANNOTATION

Sliusar V. M. Microlensing of distant source in multibody gravitational lensing systems: statistics of light curves. — Manuscript.

Candidate's thesis on Physics and Mathematics, speciality 01.03.02 — astrophysics, radioastronomy. — Main Astronomical Observatory of NAS of Ukraine, Kyiv, 2015.

Gravitational microlensing is a powerful astrophysical tool which is massively used to study extragalactic objects and objects in the Milky Way, particularly, it is used to search for exoplanets. In this thesis main attention is paid to extragalactic gravitational lens system (GLS) which typically consists of quasar with multiple images and a foreground galaxy as a deflector. The gravitational field of the lensing galaxy, which is formed by gravitational fields of distinct stars, is highly inhomogeneous, it creates a huge caustics network in the source plane. Because of this inhomogeneity every macroimage of the distant source is a collection of numerous microimages that cannot be resolved from the observations. The relative motion of the source and galaxy leads to considerable changes of brightness so we obtain, so called, lightcurves of lensed source. The light from quasar which is deflected by multiple gravitating stars in the lensing galaxy becomes the probe which helps to study the brightness profile of the source and the properties of the deflecting galaxy.

It is well known that nonbaryonic dark matter (DM) is the dominant component of a galaxy, and numerous studies were devoted to the discovery of its structures. Recent N-body simulations propose the clumpy nature of DM. We consider models with random distribution of point mass microlenses and continuous DM clumps of different size and mass. We derived lightcurves for each realization of clumps and point masses. The size of each clump in the study is assumed to be from 1 to 10 Einstein radii according to its mass. For each set of initial parameters (optical depth of microlensing, size of the clump and external shear) we generated about 100 realizations of magnification patterns considering spatially homogeneous distribution of microlensed with Salpeter mass function with power index -2.35 and the mass of each microlens in the range from 0.1 to 10 solar masses. On this basis the autocorrelation functions of light curves are calculated for different relative contributions of clumps with total optical depth 0.3. We found that the dependence of the autocorrelation functions upon the optical depth of the clumps is non-monotonous and differs for each of two considered models of DM clumps.

We perform a statistical simulation of the light curves of the microlensed images during high amplification events to estimate a feasibility to distinguish the GLS source models with different central symmetric brightness profiles. We consider two classes of the models: long range (accretion disk and power law model) and short range (Gaussian, limb-darkening model). We calculate the relative difference in case without and with external shear. In the first case it is shown that the difference between lightcurves for sources with profiles from different classes can reach up to 12%. We also check the difference between lightcurves with differ-

ent source profiles during simple and complex caustics crossing events and the differences in both cases are pretty much the same. In the second case the value of external shear for each set of realizations varied in range from 0.1 to 0.5. Source moved in different directions relatively to external shear. We found that the differences between light curves for different source models slightly decrease while external shear increases in case where source moves along the external shear axis. The biggest difference appears to be for light curves with models of different classes, e.g. the difference for limb-darkening and power-law models is about 10%. The impact of different optical depths of point stars-microlenses in the lensing galaxy is also studied. We calculated the light curves for realizations with total optical depth from 0.1 to 0.6 and found that there are selected optical depths when the distribution of amplification coefficients has a bimodal form.

Key words: gravitational microlensing, dark matter, extragalactic gravitational lens systems, structure of microlensed source, mass distribution in the lensing galaxy.

Підписано до друку 03.09.2015. Формат 60 × 84/16. Папір друк.
Офсет. друк. Фіз. друк. арк. 1,5. Умовн. друк. арк. 1,4. Гарнітура
Times.

Тираж 100 пр. Зам. 89.

Видавничо-поліграфічний центр “Київський Університет”
01601, м. Київ, бул. Т. Шевченка, 14, кімн. 43. тел. (38044)
239-32-22, 239-31-72; тел./факс. (38044) 239-31-28