

## ВІДГУК

на дисертацію Сергеєва Олексія Володимировича

**«Гравітаційно лінзована система SBS 1520+530:**

**оптичні спостереження та моделювання»,**

представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія.

**Актуальність теми.** З часу відкриття першої гравітаційної лінзи у 1979 році і, фактично, явища гравітаційного лінзування, ці космічні об'єкти стали потужним інструментом дослідження великомасштабної структури Всесвіту та одним із тестів для встановлення космологічних параметрів. Гравітаційне поле небесних тіл діє як гігантський природний телескоп, що дає можливість досліджувати будову віддалених джерел випромінювання та отримати інформацію про властивості гравітаційного поля, що деформує зображення такого джерела внаслідок ефектів загальної теорії відносності. Зокрема для скупчень галактик стало можливим оцінити безпосередньо його масу, не вдаючись до аналізу вмісту галактик або рентгенівського гарячого газу у ньому, як і аналізувати вміст темної матерії як одного зі складників процесу гравітаційного лінзування. Це, в свою чергу, надало можливість калібрувати маси скупчень галактик, виконуючи перевірки теорій формування та еволюції галактик. У випадку квазарів роль «телескопів» відіграють ближче до нас розташовані галактики або групи галактик. Окрім згаданого вище гравітаційного макролінзування, розрізняють мікролінзування та слабке лінзування, які різняться за величинами характерних мас лінзуючих тіл та часовими масштабами. На відміну від макролінзування, яке породжує майже статичні мультизображення одного і того ж об'єкту, мікролінзування призводить до змін яскравості зображень із часовими інтервалами від тижнів до місяців, а лінзами тут виступають небесні тіла зоряних мас. При цьому ефекти мікролінзування від власних коливань блиску зокрема квазара можна виявити при порівнянні змін яскравості різних зображень у позагалактичних гравітаційно-лінзових системах (ГЛС).

Далеко не кожна відкрита на сьогодні гравітаційна лінза є предметом детального дослідження, яке обов'язково містить у собі програму довгострокового моніторингу, що обумовлено складністю та вартістю проведення таких спостережень. Основною метою довготривалих спостережень гравітаційно-лінзових квазарів (ГЛК) є отримання кривих блиску компонентів квазара, які несуть інформацію як про лінзуючу галактику, так і про властивості самого квазара. Варіації кривих блиску компонентів зазвичай містять корельовану компоненту, пов'язану зі змінністю квазара-джерела, та некорельовану, що

обумовлена подіями мікролінзування у галактиці-лінзі. Саме такий актуальний вектор досліджень обрано в дисертації Сергєєва О.В., яка гармонійно поєднує в собі великий комплекс роботи експериментальної (спостереження та обробка даних) та теоретичної (моделювання, розрахунки, аналіз). Важливо також підкреслити, що в цьому напрямі розвитку методів гравітаційного лінзування представники харківської радіофізичної і астрономічної наукових шкіл були одними із перших у світі, серед них доктори фіз.-мат. наук П.В. Бліох, А.О. Мінаков, В.М. Дудінов. Розвинуті підходи дозволили дослідити структури критичних та каустичних кривих ГЛС, виконати аналіз варіацій блиску лінзованих зображень при критичних значеннях розподілу поверхневої густини маси макролінза-галактики. Поставлена в дисертаційній роботі мета є логічним продовженням робіт цих видатних попередників, а отримані Сергєєвим О.В. результати вагомими й актуальними для сучасної астрофізики, тим більше враховуючи вкрай обмежений перелік відкритих на сьогодні гравітаційно-лінзованих квазарів, що були досліджені у світі за спів-ставним рівнем.

**Структура дисертації та повнота викладеного матеріалу.** Всі отримані автором результати належним чином відображено в роботі, яка містить вступ, чотири розділи, додатки та список використаної літератури із 165 джерел. У **вступі** дано опис необхідних характеристик дисертаційної роботи: мета і методи досліджень, актуальність завдань, новизна і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора та ін. У **першому розділі** описано коротко сучасний стан досліджень з гравітаційного лінзування; наведено приклади проявів гравітаційного лінзування різних масштабів, які спостерігаються у Всесвіті; розглянуто застосування ефекту гравітаційного лінзування для вирішення різних астрофізичних та космологічних задач; приведено основні поняття та формули теорії гравітаційних лінз. У **другому розділі** описуються дані десятирічного моніторингу ГЛС SBS 1520+530 (1999-2009 рр.), що містять більше 3500 зображень за 420 епох спостережень у трьох смугах оптичного діапазону спектру; розглядається методика отримання спостережного матеріалу, де особливу увагу приділено дослідженню характеристик світло-приймальної апаратури, що використовувалась для отримання зображень ГЛК SBS1520+530; описано процес калібрування даних спостережень, у тому числі, після встановлення у 2006 р. автогіда для телескопу АЗТ-22 для усунення помилок технічного характеру або систематичних, викликаних зокрема атмосферної рефракцією. **Третій розділ** дисертаційної роботи присвячено аналізу кривих блиску зображень ГЛК SBS 1520+530 у фільтрах VRI: приведено опис методу прецизійної фотометрії компонентів ГЛК, який був розроблений спеціально для фотометрії компактних слабких джерел, та отримані результати. У **четвертому розділі** розглянуто модель гравітаційної

лінзи для ГЛС SBS 1520+530, описано методику моделювання параметрів лінзи та також наведено отримані автором результати.

**Новизна та наукова значимість отриманих результатів.** У роботі проаналізовано великий за обсягом та якісний спостережний матеріал щодо гравітаційно-лінзової системи SBS 1520+530, отриманий упродовж моніторингу цього об'єкту у 1999-2009 рр. на 1.5-м телескопі обсерваторії на г. Майданак Інституту астрономії УзбАН, у тому числі, за участі автора дисертації. Обробка даних ПЗЗ-спостережень у декількох діапазонах хвиль, їх аналіз та інтерпретація виконані дисертантом на високому науковому рівні, що дозволило йому отримати нові та вагомі результати, серед яких виділимо ті, що мають найбільшу значимість і новизну:

1. Розроблено метод фотометрії слабких і близько розташованих компонентів гравітаційно-лінзованого квазара та відповідне програмне забезпечення для побудови якісних кривих блиску досліджуваного квазара SBS 1520+530. При цьому враховано, що під час 10-річного моніторингу ГЛС на АЗТ-22 використовувалися різні типи приймачів, а це, у свою чергу потребувало ретельного аналізу та попередньої обробки отриманих ПЗЗ-зображень ГЛК. Найбільша кількість якісних ПЗЗ-кадрів була отримана у фільтрі R, про що свідчить і медіанна середня якість зображень у 1,1 кут. сек.

2. Отримані вперше автором багатокольорові VRI криві блиску зображень компонентів A і B для ГЛС SBS 1520+530 є найбільш детальними з опублікованих на сьогодні. Це дозволило знайти вперше значну квазі-синхронну змінність зображень лінзованого квазару з амплітудою порядку  $0.2^m$  зоряної величини. Наявність багатоколірних спостережень компонентів SBS 1520+530 уперше дозволила отримати залежність зміни показника кольору квазару від зміни його блиску.

3. Виявлена квазі-змінність блиску лінзованих зображень дозволило вперше встановити існування процесу мікролінзування у системі SBS 1520+530, промоделювати його за допомогою розподілу каустик мікролінз у площині квазару, отримати розподіл мас мікролінз та ймовірнісні характеристики. Оскільки видимий розмір квазару має різні значення в залежності від довжини хвилі, на якій він спостерігається (криві блиску у V-фільтрі на відміну від I-фільтру флуктуюють сильніше), отриманий розмір квазару в I-фільтрі більше, ніж отриманий у інших смугах пропускання. Ефект мікролінзування було враховано при оцінці часу запізнювання сигналу між компонентами A і B для цієї ГЛС у смузі поглинання R-фільтру, а саме кореляційний аналіз кривих блиску компонентів A і B ГЛС SBS 1520+530 дозволив уточнити оцінку часу запізнювання сигналу між двома зображеннями у  $96.4 \pm 3.5$  діб.

4. Розроблено модель ізотермічної сфери з асиметрією для лінзи-галактики та оцінено повну масу лінзи-галактики у  $7 \cdot 10^{11}$  мас Сонця. Модель побудовано на основі зображень, знятих Космічним телескопом ім. Габбла. Отримана величина часу запізнювання між двома зображеннями дозволило оцінити значення космологічної сталої Габбла  $H_0 = 66.5_{-6.0}^{+8.4} \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ , що узгоджуються з сучасними оцінками. Проведене чисельне моделювання події мікролінзування, що спостерігається у SBS 1520+530, дозволило оцінити фізичні параметри лінзованої системи. На основі цього аналізу зроблені оцінки маси мікролінз (0.3 маси Сонця), що беруть участь у цьому процесі, а також обчислено ймовірний розмір області ( $3 \cdot 10^{14}$  м) випромінювання квазару.

Важливо підкреслити, що отримання цих наукових результатів стало можливим після кропіткої технічної роботи, яку провів Сергєєв О.В. з вивчення і налагодження ПЗЗ-приймачів 1.5 м телескопу Майданакської обсерваторії та роботою з попередньої обробки зображень компонентів ГЛК SBS 1520+530 на ПЗЗ-кадрах.

Достовірність отриманих результатів дисертаційної роботи забезпечені використанням сучасних статистичних методів. Отримані автором результати щодо ГЛС SBS 1520+530 є вагомим внеском у формування знань про фізичну природу далеких галактик, а також космологічних параметрів Всесвіту; добре апробовані на різноманітних конференціях та опубліковані у фахових рецензованих виданнях. Розроблена автором методика спостережень та обробки зображень гравітаційно-лінзованих квазарів застосовуються в астрономічних установах України та світу.

**Найбільшим внеском у сучасні знання про гравітаційно-лінзові системи становлять, на думку опонента, результати, отримані Сергєєвим О.В. із триколірної фотометрії ГЛС, у тому числі, вибір саме ГЛС SBS 1520+530 ( $z=1.855$ ), викладені у третьому розділі. Для цієї системи відстань у розташуванні двох зображень компонентів квазару відносно невелика (1.59 кут. сек.) і межує з величиною розмиття точкового зображення земною атмосферою. Досить добрий астроклімат Майданакської астрофізичної обсерваторії плюс кваліфікована робота з удосконалення приймачів випромінювання для АЗТ-22 та їхнього метрологічного забезпечення дозволили отримати ці результати. Для побудови якісних кривих блиску автором дисертації було задіяне комплекс методів, серед яких спеціально розроблений метод обробки первинних ПЗЗ-зображень, який враховує у тому числі технічні параметри АЗТ-22 і неоднорідності спостережного матеріалу; метод інверсної фільтрації для побудови моделі розподілу інтенсивності; метод мінімуму дисперсії для встановлення часу запізнювання сигналу між компонентами; метод Монте-Карло; різноманітні статистичні методи. Лише один цей розділ вартий кандидатській дисертації за вимогами та отриманими результатами.**

### Зауваження та питання для дискусії.

1. Автором вперше отримано значення залежностей показників кольору (V-I) і (V-R) компонентів А і В ГЛС SBS 1520+530. Яким чином враховано, що для отримання кривих блиску використовувалися різні приймачі впродовж моніторингу? Чому для розрахунку нахилу лінії регресії не розраховувалося медіанне середнє, а було використано геометричне середнє, чи не більш точним тоді буде закон поглинання світла в лінзуючій галактиці? Як впливає на цей результат відносно невелика відстань у розташуванні зображень компонентів квазару?

2. Автором отримано значення сталої Габбла у  $H_0 = 66.5_{-6.0}^{+8.4} \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ , яке має великий статистичний розкид (~20 % від значення величини) і яке менше за прийняті на сьогодні, зокрема тільки на верхній границі відповідає значенню сталої Габбла, отриманому за спостереженнями цефеїд на Космічному телескопі імені Габбла і космічній обсерваторії GAIA у 2017-2018 роках у  $H_0 = 73.52 \pm 1.62 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ , але гарно співвідноситься з даними космічної обсерваторії «Planck» у 2015 році як  $H_0 = 67.74 \pm 0.46 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$ . Яка причина великого статистичного розкиду? Чи означає це, що вже не існує необхідність отримувати значення сталої Габбла за методом гравітаційного лінзування?

3. Чому були обрані дані про координати зображень квазару і лінзуючої галактики за спостереженнями на Космічному телескопі імені Габбла для моделі лінзуючої галактики і як вони співвідносяться з даними, отримані автором за моніторинговими спостереженнями на АЗТ-22? Які тут переваги адаптивної оптики?

4. Дисертація присвячена фотометрії оптичних зображень ГЛС SBS 1520+530, але в тексті дисертації можна було надати інформацію про спектральні властивості цього об'єкту як в оптиці, так і в інших спектральних діапазонах, що розширило б дискусію про механізми акреції і модель активного ядра квазару.

Серед дрібних зауважень зазначу декілька: в авторефераті і дисертації не вказано, що мова йде про *видимі* зоряні величини в параметрах блиску або світності ГЛС; не вказано *морфологічний тип* галактики, для якої розраховано модель сингулярної ізотермічної сфери з асиметрією; в описі особистого внеску автора до статей пропущена фраза, що автор брав участь у написанні статей, а автор, очевидно, брав; зустрічаються помилки стилістичного характеру та астрономічний сленг.

Ці зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи та не применшують її наукової і практичної цінності. Представлені результати є новими, доповідалися на наукових конференціях та семінарах та опубліковані у фахових журналах, що входять до переліку наукових видань для захистів дисертаційних робіт. Автореферат повністю відповідає змісту дисертації.

Дисертаційне дослідження О.В. Сергєєва «Гравітаційно лінзована система SBS 1520+530: оптичні спостереження та моделювання» є завершеною за поставленою метою і виконаними завданнями роботою та задовольняє всім вимогам Міністерства освіти і науки України до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02- астрофізика, радіоастрономія. Сергєєв О.В. заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за цією спеціальністю.

Вавилова І.Б., канд. фіз.-мат. наук,  
ст. наук. співроб., доцент,  
завідувач відділом позагалактичної  
астрономії та астроінформатики  
Головної астрономічної обсерваторії  
НАН України

18.05.2018 р.

*Лідник к.р.-м.ч. Вавилової І.Б.  
за свідчення:*

*Зав. кафедр. Т.О.*



*Корсун  
Корсун*