

Міністерство освіти та науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

СЕРГЄЄВ ОЛЕКСІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК: 524.7-735+524.7-77
524.355, 52-77, 524.355

ГРАВІТАЦІЙНО ЛІНЗОВАНА СИСТЕМА SBS 1520+530: ОПТИЧНІ
СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ.

01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2018

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Результати спостережень ефекту гравітаційного лінзування стали одним з перших експериментальних підтверджень загальної теорії відносності [27]. Набагато пізніше, в середині 60-х років минулого століття Рефсдал (Refsdal) показав, що дані спостережень лінзованих зображень віддаленого джерела — квазара можуть бути використані для визначення значення сталої Хабла, а також незалежної оцінки маси лінзи — галактики [28]. Ця робота прискорила пошуки нового типу об'єктів — гравітаційно лінзованих квазарів. У 1979 році була виявлена перша гравітаційна лінза (ГЛ) Q0957+561 [29], що зіграло надзвичайно важливу роль в астрофізиці, а також в космології, через те, що вперше з'явилася реальна можливість здійснити тестування існуючих космологічних теорій.

Дослідження гравітаційно лінзованих систем (ГЛС) є потужним інструментом для вирішення широкого кола проблем космології й астрофізики. За результатами спостережень ГЛС визначають значення сталої Хабла, досліджують тонку структуру лінзованого квазара, недосяжну іншими методами, розподіл і повну масу в галактиці-лінзі, в тому числі, і приховану [30] [31].

Бурхливий розвиток електроніки та комп'ютерних технологій і, як наслідок, поява нових типів приймачів випромінювання та методів їх обробки, а також введення в дію великих наземних і космічних телескопів привело до зростання обсягу та якості нових відомостей про Всесвіт. На сьогодні відкрито більше сотні гравітаційно лінзованих квазарів [32], з яких лише мала частина досліджена детально.

Практична реалізація визначення параметрів гравітаційно лінзованої системи натрапила на ряд істотних труднощів. Вони пов'язані в першу чергу з обмеженими можливостями спостережень, які не дозволяють розв'язати зворотну задачу визначення параметрів гравітаційно лінзованої системи у строгій постановці. Єдина можливість, що використовується на практиці — задаючи розподіл мас галактики-лінзи та геометрію системи, визначати параметри гравітаційної лінзи шляхом розв'язання прямої задачі.

Проблему розв'язання зворотної космологічної задачі, стосовно гравітаційно-лінзованих систем, можна умовно розбити на дві складові.

Перша складова пов'язана з необхідністю задання розподілу маси всередині галактик-лінз або їх скупчень. Для цього, як правило, використовують дані фотометрії гравітаційно лінзованих систем, отримані на космічному телескопі або на великих наземних телескопах, оснащених системою адаптивної оптики. Обмеженість цього підходу пов'язана з тим, що згідно з сучасними уявленнями велика частина маси у Всесвіті зосереджена у так званій темної матерії. Більш того, теоретичні дослідження [33] показали, що існує певний клас перетворень, що призводять до виродження деяких

параметрів гравітаційно лінзованих систем.

Друга складова проблеми пов'язана з точним визначенням часу запізнювання сигналу між зображеннями квазара. Для точного визначення часу запізнювання бажано, щоб характерні періоди власних змін блиску квазара були менше або порівнянні з величиною часу затримки. Статистика спостережень власної змінності квазарів дає величину характерних інтервалів зміни блиску квазарів від місяців до декількох років. Тому тільки довготривалий моніторинг гравітаційно лінзованих квазарів може дати прийнятну за точністю величину часу запізнювання сигналу [34]. Але навіть виконання цієї умови може бути недостатньо і пов'язано це з тим, що криві блиску окремих зображень можуть бути сильно збурені ефектом мікролінзування (ЕМЛ).

Першими, хто звернув увагу на те, що навіть окрема зоря всередині лінзуючої галактики може приводити до сильних флуктуацій блиску лінзованого джерела, були Чанг і Рефсдал [35]. І хоча ефект мікролінзування заважає отриманню точного значення часу запізнювання між зображеннями квазара, проте він дає можливість отримати недоступну іншими засобами інформацію про фізичну природу та розподіл матерії, що знаходиться всередині лінзуючої галактики [36].

На даний момент стає очевидним, що основним завданням для наземних спостережень ГЛК стає їх довготривалий моніторинг з метою точного визначення часу запізнювання сигналу між зображеннями компонентів і дослідження ефектів мікролінзування.

Система SBS 1520 + 530 складається з двох зображень гравітаційно лінзованого квазара, розташованих на відстані 1.58 кутових секунд один від одного і мають блиск у середньому 18.5 і 19.4 зоряні величини. Регулярний моніторинг ГЛС SBS 1520 + 530 на 1.5м телескопі Майданацької обсерваторії (Узбекистан) дозволив побудувати якісні криві блиску зображень квазара у декількох діапазонах довжин хвиль. Телескоп, обладнаний сучасною ПЗЗ камерою в поєднанні з пристроєм гідрування, дозволяє отримати спостережний матеріал сучасного рівня якості.

Аналіз отриманих кривих блиску гравітаційно лінзованої системи SBS 1520+530 дозволив отримати оцінки розміру області квазара, що випромінює, інформацію про розподіл речовини, що складає лінзуючу галактику, а також дозволив уточнити значення величини сталої Хабла.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, покладені в основу дисертаційної роботи, виконувалися в рамках держбюджетних НДР у відділі космічної радіофізики радіоастрономічного інституту:

«Миногоа » № держ. реєстрації 0107U000030 (2007 — 2010 рр.);

«Зонд» № держ. реєстрації 0107U000026 (2007 — 2009 рр.);

«Миногоа2» № держ. реєстрації 0111U000062 (2010 — 2015 рр.), а також в науково — дослідному інституті астрономії Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, в тому числі:

№ держ. реєстрації 0199U004410 (1999 — 2000 рр.);

№ держ. реєстрації 0101U002490 (2001 — 2003 рр.);

№ держ. реєстрації 0104U000664 (2004 — 2006 рр.);

№ держ. реєстрації 0107U000673 (2007 — 2009 рр.);

№ держ. реєстрації 0110U001033 (2010 — 2011 рр.);

№ держ. реєстрації 0112U006957 (2012 — 2015 рр.),

Автор приймав участь у цільовій програмі НАН України «Астрофізичні та космологічні проблеми прихованої маси і темної енергії Всесвіту» (шифр «Космомікрофізика»)

№ держ. реєстрації 0107U007813 (2007 — 2009 рр.);

№ держ. реєстрації 0110U004538 (2010 р.);

№ держ. реєстрації 0111U003978 (2011 р.).

Робота проводилася за фінансової підтримки міжнародного фонду «Maidanak» та гранту УНТЦ U-127. Основу експериментального матеріалу, що використовується в роботі, становлять ПЗЗ-зображення ГЛК, отримані на Майданацькій високогірній обсерваторії в рамках тристоронньої міжнародної угоди між НДІ астрономії ХНУ ім. В.Н.Каразіна (Україна), ДАІШ МДУ (Росія) і інститутом астрономії ім. Улугбека (Республіка Узбекистан), а також на підставі договорів про творчу співпрацю з Радіоастрономічним інститутом НАН України.

Автор брав участь у перерахованих вище роботах як виконавець.

Мета і задачі дослідження.

Головною метою дисертації є дослідження гравітаційно лінзованого квазару SBS 1520+530 для визначення фізичних характеристик лінзи-галактики та джерела-квазара з аналізу кривих блиску компонентів в цій системі. Для досягнення цієї мети необхідно було вирішити наступний ряд завдань:

1. Отримати ряд регулярних ПЗЗ-спостережень компонентів гравітаційно - лінзованої системи ГЛС SBS 1520 + 530 на телескопі АЗТ-22 (МАО).
2. Провести дослідження ПЗЗ приймачів, що використовувались для отримання ПЗЗ зображень ГЛС SBS 1520+530 та виконати попередню обробку за допомогою одержаних майстер кадрів.
3. Розробити метод фотометрії компонентів ГЛС, що використовує апріорну інформацію та створити відповідне програмне забезпечення. Ви-

конати фотометрію зображень ГЛС SBS 1520+530, що були отримані з 1999 по 2009 роки в VRI фільтрах.

4. Провести аналіз кривих блиску компонентів SBS 1520+530 на основі отриманих даних спостережень у смугах VRI.
5. Побудувати макро-модель ГЛС SBS 1520+530 на основі зображень, отриманих космічним телескопом ім. Хабла, оцінити макро параметри лінзуючої галактики та обчислити значення сталої Хабла.
6. Розробити метод, що дозволяє проводити моделювання кривих мікролінзування компонентів і провести їх статистичний аналіз для оцінки фізичних параметрів квазара-джерела і лінзи-галактики системи SBS 1520+530.

Об'єкти дослідження. Об'єктами дослідження є гравітаційно лінзовані системи та квазари.

Предмет дослідження. Спостережні характеристики гравітаційно-лінзованих квазарів в оптичному діапазоні, їх зміни в часі і мікролінзування.

Методи дослідження. Багатокольорова VRI фотометрія ПЗЗ-зображень, комп'ютерне моделювання процесів мікролінзування і статистичний аналіз кривих блиску.

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

- Вперше, на основі тривалих спостережень 1999-2011 років були побудовані багатокольорові (VRI) криві блиску компонентів SBS 1520+530.
- Вперше були виявлені значні варіації показника кольору зображень квазару ГЛС SBS 1520 + 530, встановлено тісний кореляційний зв'язок варіацій показників кольору та блиску компонентів.
- Показано наявність зміни блиску лінзованих зображень квазара, пов'язаних з явищем мікролінзування в системі SBS 1520+530.
- Отримана нова величина часу запізнення сигналу між зображеннями А і В ГЛК SBS 1520+530 з урахуванням мікролінзування, яка дозволила уточнити оцінку величини сталої Хабла.
- Числове моделювання кривої мікролінзування дозволило оцінити розмір зони випромінювання, а також характерні маси зірок-мікролінз в галактиці SBS 1520+530.

Практичне значення отриманих результатів. Результати, отримані у дисертаційній роботі, можуть бути використані і використовуються при обробці даних спостережень гравітаційно-лінзованих систем.

Числове моделювання ефекту мікролінзування дозволяє проводити дослідження просторової структури випромінюючих областей квазарів з високою роздільною здатністю, знаходити функції розподілу мас компактних об'єктів-мікролінз, які складають лінзу-галактику.

Дані фотометрії ГЛС SBS 1520+530, отримані в VRI фільтрах, представлені у відкритому доступі та можуть бути використані для перевірки теорії гравітаційного лінзування.

Розроблене автором програмне забезпечення, що дозволяє отримувати фотометричну та астрометричну інформацію, може використовуватися для фотометрії аналогічних по конфігурації ГЛК або інших астрономічних об'єктів.

Отримані автором у ході обробки спостережних даних ГЛС SBS 1520 + 530 майстер кадри можуть бути використані для попередньої обробки спостережних даних інших астрономічних об'єктів, отриманих на телескопі АЗТ-22.

Розроблена методика спостережень гравітаційно лінзованих квазарів може використовуватися для проведення наступних програм моніторингу ГЛС.

Розроблене автором програмне забезпечення для моделювання подій мікролінзування й отримання оцінок розподілу і маси речовини, що складає лінзу-галактику, може бути використано для оцінки значень фізичних параметрів інших ГЛС.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в наступних спеціалізованих наукових виданнях [1–13, 15] та в матеріалах та тезах конференцій [14, 16–26]. В усіх зазначених роботах дисертант в рівній мірі зі співавторами брав участь в постановці задачі, обговоренні та аналізі отриманих результатів. Дисертант брав активну участь у спостереженнях ГЛС на Майданацькій обсерваторії. Результати цих спостережень частково лягли в основу робіт: [1–9, 11–13, 15]. В роботах [2, 3, 5, 11, 12] дисертант проводив попередню обробку ПЗЗ зображень гравітаційно лінзованих квазарів за допомогою створеного автором програмного забезпечення. В роботах [2, 3, 5, 11, 12] дисертант отримував та будував криві блиску зображень гравітаційно лінзованих квазарів за допомогою спеціалізованого фотометричного програмного забезпечення, створеного автором. У роботах [2, 3, 10–12] автор розробляв програмне забезпечення та проводив комп'ютерне моделювання фізичних процесів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на семінарах НДІ астрономії Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна та Радіоастрономічного Інституту НАН України, а також на міжнародних наукових конференціях і

робочих групах: Міжнародній конференції JENAM 2000 (Москва, Росія) і JENAM 2003 (Будапешт, Венгрія), міжнародної конференції « Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology » (Київ, 2005, 2009, 2016, 2017), міжнародній робочій групі « 25 Years after the discovery: some current topics on lensed QSOs » (Сантандер, Іспанія, 2004), міжнародній конференції « Актуальні проблеми позагалактичної астрономії - XXII » (Пуцино, Росія 2005), міжнародній конференції « Problems of Gravitational Lensing » (ДАІШ МДУ, Москва, 2007), міжнародній конференції « Gamov Memorial International Conference » (Одеса, 2010, 2012, 2016), Maidanak Users Meeting (Tokyo, Japan 2012).

Публікації.

За матеріалами дисертації опубліковано 26 робіт, у в тому числі 13 статей в фахових наукових журналах [1—13] і 13 тез доповідей на міжнародних конференціях [14—26].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертації складає 178 сторінок, з них 132 сторінок основного тексту. Дисертація містить 51 рисунок та 5 таблиць. Список використаних джерел містить 165 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується вибір та актуальність теми дисертаційної роботи, розглянуто її зв'язок з науковими програмами, формулюються мета та основні завдання дослідження і методи їх вирішення. Вказано наукову новизну отриманих результатів і практичну цінність проведених досліджень. Відмічено особистий внесок автора та апробація одержаних результатів, які виносяться на захист.

В **першому розділі** «Основи теорії гравітаційних лінз» дана коротка історія відкриття ефекту гравітаційного лінзування. Наведені приклади спостережуваного прояву гравітаційного лінзування у Всесвіті, а також приклади існуючих міжнародних проектів спостережень. Представлена класифікація ефектів гравітаційного лінзування, заснована на фізичних і часових масштабах. Розглядаються деякі застосування ефекту гравітаційного лінзування для розв'язку ряду астрофізичних і космологічних задач. Особлива увага приділена основним поняттям і формулам теорії гравітаційного лінзування, які необхідні для аналізу даних спостережень ГЛС SBS 1520+530 (див. Рисунок 1).

Другий розділ «Отримання та редукція зображень ГЛС SBS 1520+530» присвячено опису умов, методики спостережень та дослідженню характе-

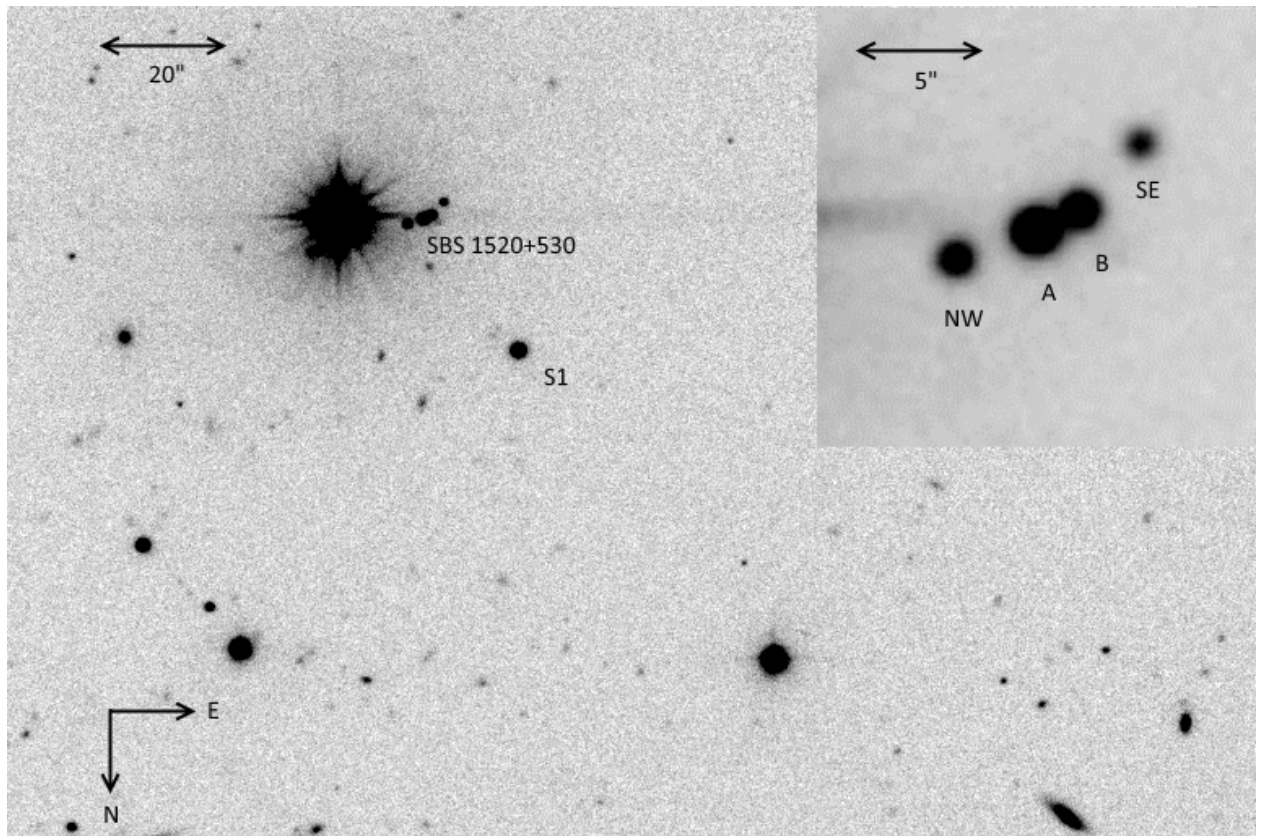


Рис. 1: Комбіноване ПЗЗ зображення ГЛК SBS 1520+530 отримане в R фільтрі на телескопі АЗТ-22. Позначено опорну зірку S1, зірки оточення NW і SE, а також зображення квазара А і В.

ристик світлоприймальної апаратури, що використовувалась для спостережень ГЛС SBS 1520+530.

Типові ГЛК являють собою порівняно слабкі зображення точкового джерела - квазару, що знаходяться на кутовій відстані близько кутовий секунди дуги один від одного. Дослідження таких складних в спостережному плані об'єктів можливо тільки на порівняно великих телескопах, розташованих в місцях з хорошим астрокліматом.

Одним з таких місць є Майданацька астрофізична обсерваторія (МАО) що знаходиться в Узбекистані. Обсерваторія розташована на висоті 2600 метрів і має один з найкращих астроклімат у СНД. Встановлений на обсерваторії 1.5 м телескоп АЗТ-22 має високоякісту оптику, близьку до дифракційно обмеженої. Регулярні спостереження гравітаційно лінзованого квазару SBS 1520+530 почались у 1999 року колективом спостерігачів з Узбекистану, Росії та України. У дисертаційній роботі представлені дані спостережень, отримані в період 1999-2009 років.

За цей період, найбільшу кількість зображень ГЛС SBS 1520+530 було отримано у смузі R - близько 2500 зображень за 420 ночей, приблизно 650 кадрів за 150 ночей у смузі V та 530 зображень за 115 ночей у смузі I.

У ході моніторингу гравітаційно лінзованого квазару SBS 1520+530 на телескопі АЗТ-22 у якості приймача випромінювання застосовувалися три різні ПЗЗ камери. У період спостережень із 1999 по 2001 рік використовувалася ПЗЗ камера ST-7 фірми Sbig. З середини 2001 року до середини 2006 року на телескопі була встановлена ПЗЗ камера з азотним охолодженням Site005 CCD, а у 2006 році телескоп був оснащений камерою SNUCAM з підсвічуванням зворотного освітлення.

Кожна ПЗЗ камера комплектувалася відповідним набором скляних фільтрів, що забезпечують одержання інструментальної фотометричної системи, близької до стандартної системи UBVRІ Джонсона- Коузіна. Медіанна середня якість зображень FWHM (Full Width at Half of Maximum) для зображень ГЛ SBS 1520+530 у фільтрі R, за час моніторингу склала ≈ 1.1 кутової секунди (див. Рисунок 2).

Застосування декількох приймачів випромінювання під час тривалого моніторингу гравітаційно лінзованих квазарів, що перебувають на межі точності вимірювань системи телескоп-ПЗЗ, змушує ретельно підходити до задачі попередньої обробки зображень.

Використовувані в ході моніторингу ПЗЗ приймачі мали різні фізичні розміри пікселів, різну квантову ефективність, робочу температуру ПЗЗ матриці т.д. У процесі використання ПЗЗ може відбуватися деградація поверхні ПЗЗ чипа, порушення герметичності і т.д.

Моніторинг гравітаційно лінзованого квазара SBS 1520+530 проводився у різних оптичних системах (довгий і короткий фокуси), а також з використанням або без використання оптичного коректора поля. Тому, щоб коректно урахувати систематичні похибки, властиві кожному зображенню, регулярно проводилися дослідження системи телескоп - ПЗЗ приймач. У цьому розділі приводиться методика та способи попередньої обробки зображень для трьох різних ПЗЗ приймачів, що використовувалися у ході моніторингу.

У серпні 2006 р. телескоп АЗТ-22 був оснащений системою автоматичного гідру (автогід), у розробці та установці якої автор брав активну участь. Автогід був розроблений і встановлений на телескопі АЗТ-22 командою Харківських астрономів у рамках робіт із гранту УНТЦ [11]. Автогід компенсує невеликі похибки ведення годинного механізму, гнуття труби та вилки телескопу, а також ефекти атмосферної рефракції за час експозиції. Гідування проводиться із частотою $1 \div 0.1 \text{ Hz}$ по зіркам до 13 зоряної величини, що перебувають у полі зору поблизу досліджуваного об'єкта.

Третій розділ «Фотометрія компонентів гравітаційно лінзованої системи SBS 1520+530 та їх аналіз» присвячений фотометрії зображень ГЛК отриманих в VRІ смугах, побудові кривих блиску та її аналізу.

Гравітаційно лінзована система SBS 1520+530 була відкрита в 1996 р.

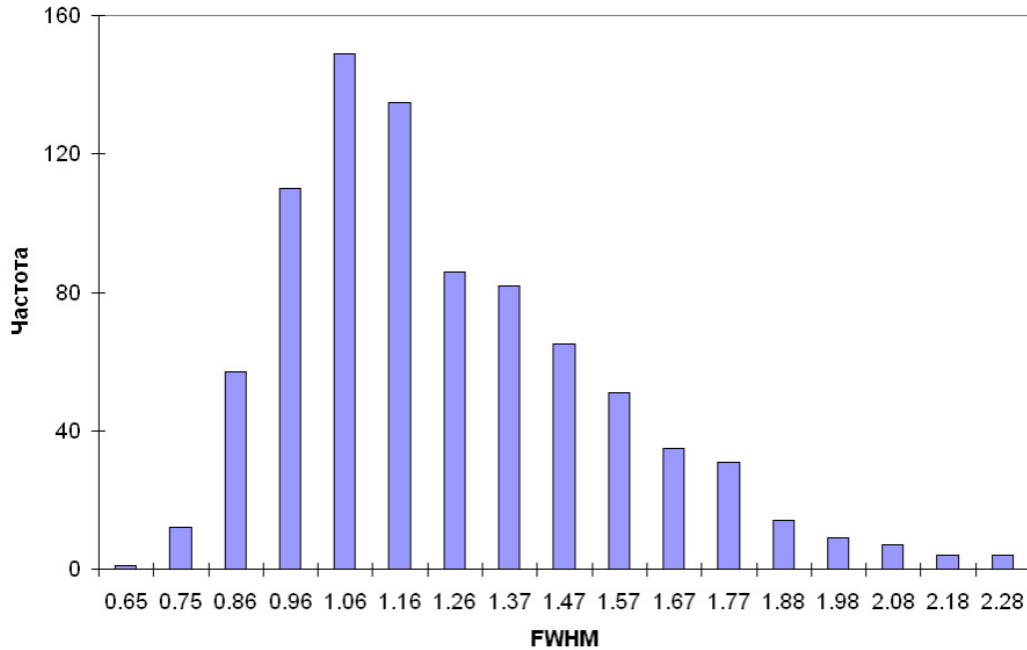


Рис. 2: Гістограма роздільної якості зображення (FWHM) даних моніторингу ГЛК SBS 1520+530 в кутових секундах.

на Спеціальній Астрофізичній Обсерваторії Російської АН (САО РАН) [37]. Система складається із двох зображень квазара A , B , що мають блиск приблизно 18.5^m і 19.5^m у смузі R та розташовані на кутовій відстані 1.59 секунди один від одного (див. Рисунок 1). Зображення мають тотожні спектри із червоним зміщенням $z = 1.855$. Між зображеннями квазара було виявлено лінзуючу галактику, що має червоне зміщення $z = 0.7$ та інтегральний блиск 23^m у смузі R. Поруч із зображеннями квазара знаходяться дві зірки нашої Галактики NW і SE . На відстані близько 10 кутових секунд від системи SBS 1520+530 також розташовується відносно яскрава (12 зоряної величини) зірка нашої Галактики.

Вибір методу коректної фотометрії зображень астрономічних об'єктів багато в чому залежить від природи досліджуваного об'єкта й необхідної точності визначення фотометричних і астрометричних характеристик. Алгоритм фотометрії повинен як можна коректніше враховувати фактори неоднорідності спостережного матеріалу. Як було відзначено вище, зображення гравітаційно лінзованого квазара SBS 1520+530 було отримано на різних ПЗЗ камерах, протягом тривалого часу. Під час моніторингу змінювався масштаб зображень та позиційний кут приймача. Ще одним несприятливим фактором був технічний стан телескопу. Неправильна юстировка й неточність часового супроводження вносили додаткові викривлення в отримані зображення. Тому фотометрія SBS 1520+530 проводилася методом, спеціально розробленим нашою групою для фотометрії слабких, близько

розташованих джерел, якими є більшість гравітаційно лінзованих квазарів. Даний метод дає високу внутрішню збіжність на неоднорідному спостережному матеріалі, що було показано в роботі [8].

Алгоритм фотометрії заснований на методі інверсної фільтрації, при якому зображення фотометруємого об'єкту $s(x, y)$ можна перетворити так, щоб розподіл інтенсивності у ФРТ (Функція Розсіяння Точки) описувався аналітичною функцією.

Процедура фотометрії зображення ГЛС SBS 1520+530, є підгонкою моделі, що включає 4 точкових джерела. Враховуючи апріорну інформацію про координати джерел у полі SBS 1520+530, а також параметри заданої ФРТ, модельний розподіл інтенсивності $f_{mod}(x, y)$ представляється у вигляді:

$$f_{mod}(x, y) = \sum_{x,y} \sum_{q=1}^4 I_q \exp \left\{ - \frac{[(x - (x_A - dx_q))^2 + (y - (y_A - dy_q))^2]}{2\sigma^2} \right\}, \quad (1)$$

де x_A, y_A - координати компонента А; dx_q, dy_q - координати компонента В та зірок SE, NW відносно компонента А; I_q - інтенсивності компонентів; b - значення фону неба. Пошуковими параметрами є чотири значення інтенсивності компонентів - I_q , дві координати компонента А x_A, y_A , а також значення фону неба - b .

Підгонка моделі до зображення виконувалася методом найменших квадратів.

Інтенсивності компонентів I_q прив'язані до інтенсивності зірки S1 (Рис. 1), для якої в попередніх роботах були отримані абсолютні значення блиску [2] і встановлена відсутність власної змінності [38].

До виконання процедури фотометрії компонентів, в кожному із зображень усувалися дифракційний промінь і ореол від яскравої зірки (приблизно 12 зоряної величини), яка знаходиться поблизу області зображення ГЛС SBS 1520+530 [3]. Алгоритм віднімання заснований на відомому факті центральної симетрії дифракційної картини. Оцінка розподілу яскравості, що віднімається, була отримана у відповідних центрально-симетричних точках зображення зірки.

Криві блиску зображень квазара А і В показують змінність обох компонентів з амплітудами порядку 0.2^m і характерними часами від 0.5 до двох років. Крива блиску у фільтрі R за період спостережень 1999-2009 років показана на рисунку 3.

Криві блиску зображень А і В для системи SBS 1520+530, отримані у період спостережень 1999-2009 років, є найбільш тривалими та детальними з опублікованих на сьогодні.

Криві блиску зображень квазара показують синхронні за часом зміни

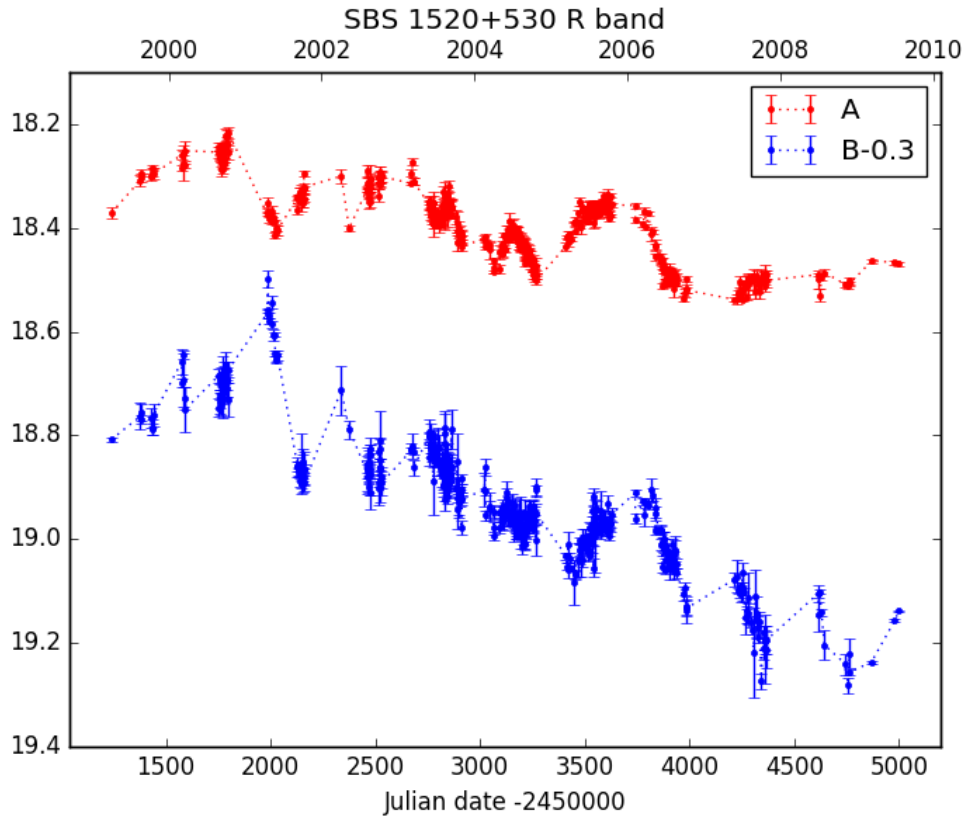


Рис. 3: Криві блиску компонентів А і В SBS 1520+530 у фільтрі R, за даними спостережень на телескопі АЗТ-22 у період 1999-2009 років.

блиску, але з різними амплітудами у різних спектральних смугах. Криві блиску в V фільтрі флуктуюють значно сильніше ніж у фільтрі I див. рисунок 4. Така поведінка може бути пов'язана як безпосередньо із структурою квазара, так і з ефектом мікролінзування. Згідно із загальноприйнятою моделлю акреційного диску Шакури-Сюняєва, характерний розмір квазара менше у синій області спектра і більше у червоній [39], тому флуктуації блиску квазарів більше у синій частині спектра, що підтверджується спостереженнями [40].

Зміна кольору квазара може бути викликана також ефектом мікролінзування. Окремі зірки лінзованої галактики створюють так звану мережу каустик. Коефіцієнт підсилення блиску в процесі мікролінзування визначається згортокою каустики з розподілом блиску по джерелом-квазару. Як було вказано вище, розмір квазара залежить від довжини хвилі, тому компактне джерело може підсилюватися сильніше проходячи через каустик, ніж велика. Така поведінка підтверджується спостереженнями мікролінзування у ГЛ системі Q2237+0305 [41].

У будь-якому разі, за даними спостережень ГЛК SBS 1520+530 можна стверджувати, що розмір квазара в смузі пропускання фільтру I більше розміру квазара, що спостерігається в смугах R і V.

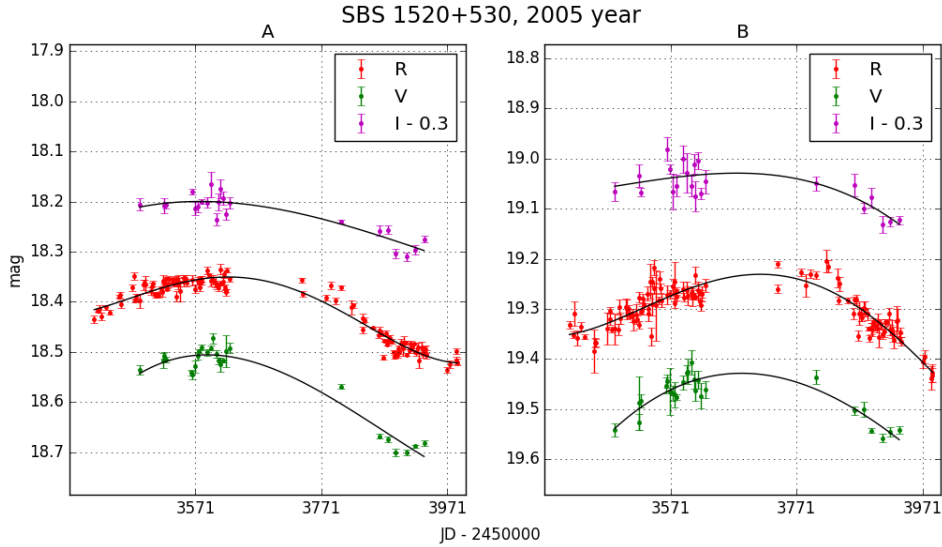


Рис. 4: Криві блиску компонентів А і В SBS 1520+530 в VRI фільтрах, за даними спостережень на телескопі АЗТ-22 у 2005 - 2006 роках.

Триколірна VRI фотометрія зображень квазара була отримана для 114 епох спостереження, що дозволило побудувати діаграми залежності колір-блиск і колір-колір.

Уперше для SBS 1520+530 була отримана залежність зміни показника кольору лінзованого квазара від його блиску. Середнє значення показника кольору ($V-I$) для компонентів А і В становлять $0.63 \pm 0.01m$ і $0.70 \pm 0.01m$, відповідно. Нахили лінії регресії показника кольору кривих А і В мають значення $k_A = 0.31 \pm 0.04$ для зображення компонента А і $k_B = 0.32 \pm 0.03$ для компонента В. Відмітимо, що компонент В, розташований ближче до центру лінзуючої галактики, є більш червоним, що можна пояснити відомим фактом залежності поглинання світла в галактиках від довжини хвилі [42].

Також уперше були отримані значення залежностей показників кольору ($V-I$) від ($V-R$), що продемонстроване на рисунку 5. Значення нахилу лінії регресії було розраховано як геометричне середнє відносно значень нахилу показника кольору ($V-R$)-($V-I$) і значень нахилу показника кольору ($V-I$)-($V-R$). Величини нахилу дорівнюють $k_A = 1.53 \pm 0.10$ і $k_B = 1.68 \pm 0.14$ для компонентів А і В, відповідно. Дана залежність характеризує закон поглинання світла в лінзуючій галактиці SBS 1520+530.

Аналіз кривих блиску зображень квазара А і В показує повільну розсинхронізацію кривих протягом усього періоду спостережень. Таку поведінку можна пояснити ефектом мікролінзування. У роботі була побудована різниця кривих блиску А-В у фільтрі R представлена на рисунку 6. Зміни різниці блиску становить $\approx 0.036 \pm 0.001^m$ у рік. На фоні лінійного тренда кривої мікролінзування, помітні й більш слабкі, порядку 5 відсотків,

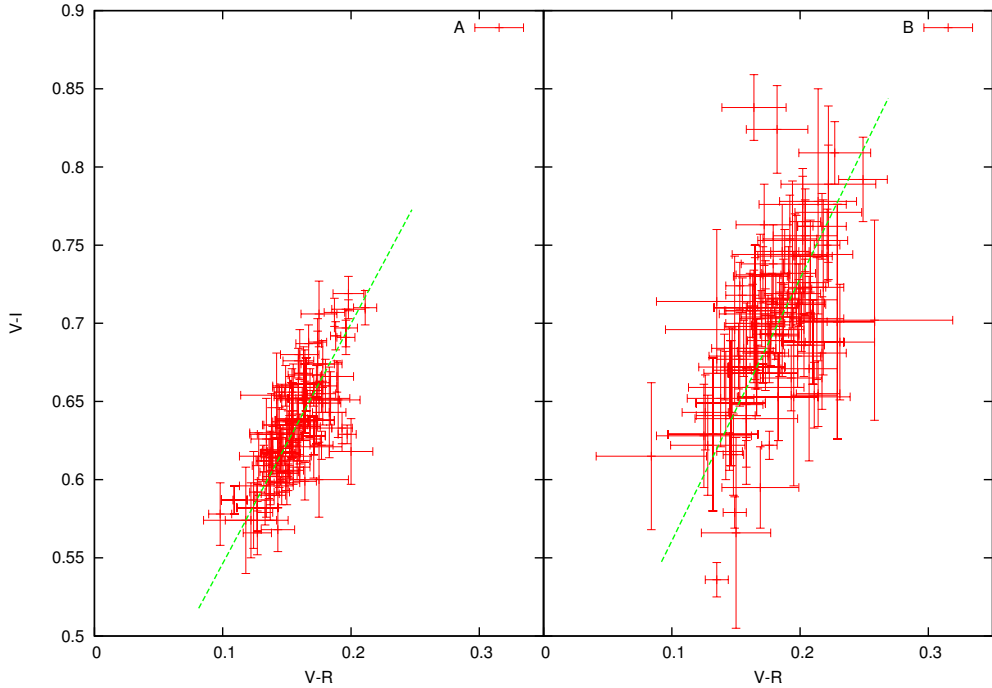


Рис. 5: Графіки залежності показника кольору (V-I) від показника кольору (R-I) компонентів А і В ГЛ системи SBS 1520+530.

швидкі флуктуації блиску.

У дисертації було визначено нові значення часу запізнювання сигналу між компонентами А і В ГЛС SBS 1520+530 з урахуванням ефекту мікролінзування. Для цього були використані криві блиску у фільтрі R, що є найбільш повними. У роботі був використаний метод *мінімуму дисперсії* [43] для визначення часу запізнювання. Помилка визначення часу запізнювання визначалася методом Монте-Карло. Величина часу запізнювання сигналу між зображеннями квазара становить $\delta t_{A,B} = 96.4 \pm 3.5$ днів.

Четвертий розділ «Моделювання гравітаційно лінзованої системи SBS 1520 + 530» присвячено моделюванню системи SBS 1520 + 530 і порівнянню моделі з даними спостережень.

У розділі наводиться рішення рівняння лінзи (або абераційного рівняння) для системи SBS 1520 + 530. Розподіл речовини в лінзі-галактиці задається моделлю сингулярної ізотермічної сфери з асиметрією (SIS + γ) [44]. Дана модель характерна для раннього типу галактик [45], до класу яких належить галактика системи SBS 1520 + 530 [46].

При побудові моделі ГЛ системи SBS 1520 + 530 були використані координати зображень квазара і параметри лінзуючої галактики, визначені за вимірюваннями кадрів, отриманих на космічному телескопі ім. Хабла.

У результаті вирішення рівняння лінзи було отримано значення кутового розміру радіуса кільця Ейнштейна лінзи-галактики що дорівнює $0.816''$ яке відповідає масі лінзуючої галактики $4.647^{41} \text{кг} = 2.34^{11} M_{\odot}$.

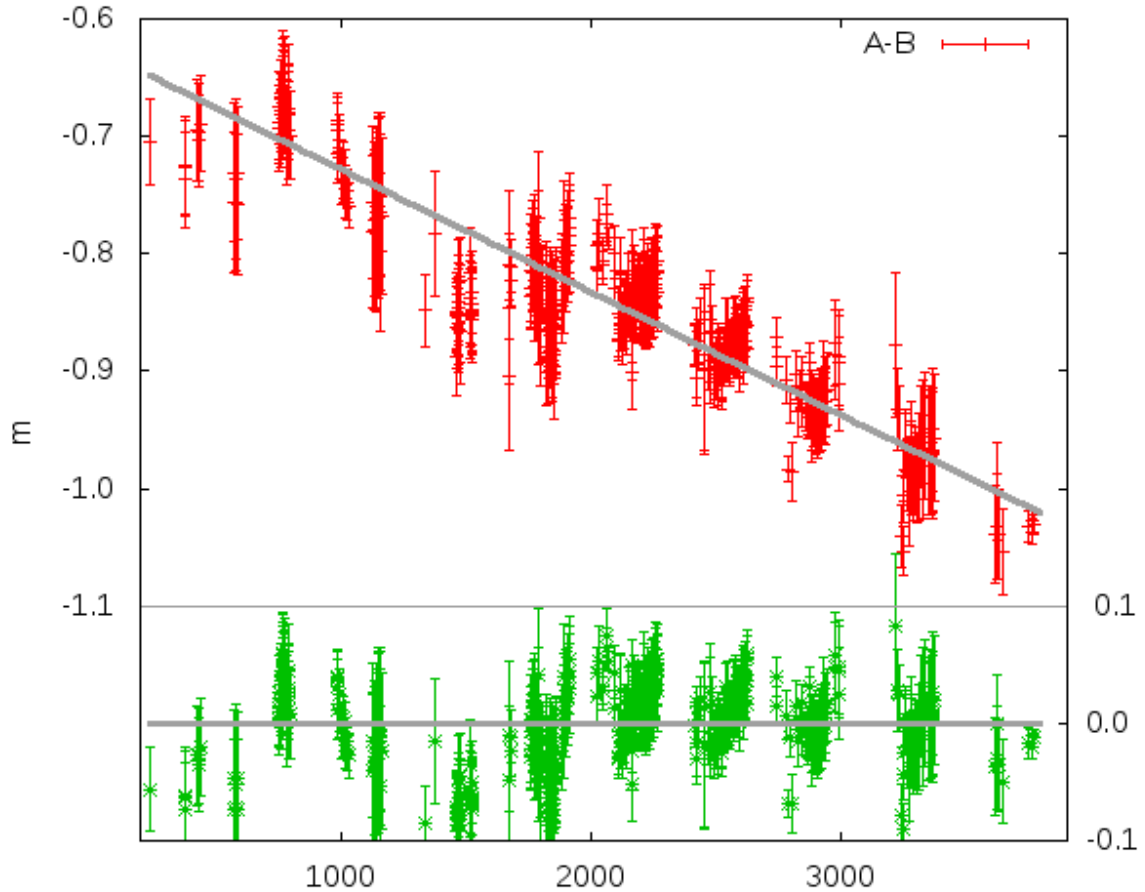


Рис. 6: Крива міколінзування ГЛС SBS 1520+530. Нижній графік показує різницю між кривою міколінзування та лінією регресії.

Різниця часу проходження світла для зображень квазара А і В дозволяє визначити значення сталої Хабла. Для цього необхідно знайти рішення абераційного рівняння гравітаційно лінзованої системи. Порівнюючи модельне значення часу запізнювання та отримане протягом моніторингу можливо таким чином визначити значення сталої Хабла. Враховуючи данні спостережень ГЛК SBS 1520+530 та параметри отримані при моделюванні оцінка значення сталої Хабла дорівнює $H = 66.5_{-6.0}^{+8.4}(\text{км} \cdot \text{с}^{-1}) \cdot \text{Мпк}^{-1}$.

Крива блиску події мікролінзування містить інформацію щодо трьох незалежних параметрів системи: трансверсальної швидкості квазару і лінзи відносно спостерігача, розміру квазару і маси мікролінз.

У розділі отримана оцінка значення трансверсальної швидкості квазару, в рамках кінематичної моделі, яке дорівнює $\approx 331 \text{ км/сек}$.

Оцінка розміру випромінючої області квазару була отримана у рамках моделі стандартного акреційного диска, яка задає зв'язок між світимістю, радіусом та масою чорної діри [39]. Для оцінки світимості лінзованого квазару були використані дані Слоанівського каталогу квазарів [47], в якому представлені дані фотометрії більш ніж 10000 квазарів з широкими емісій-

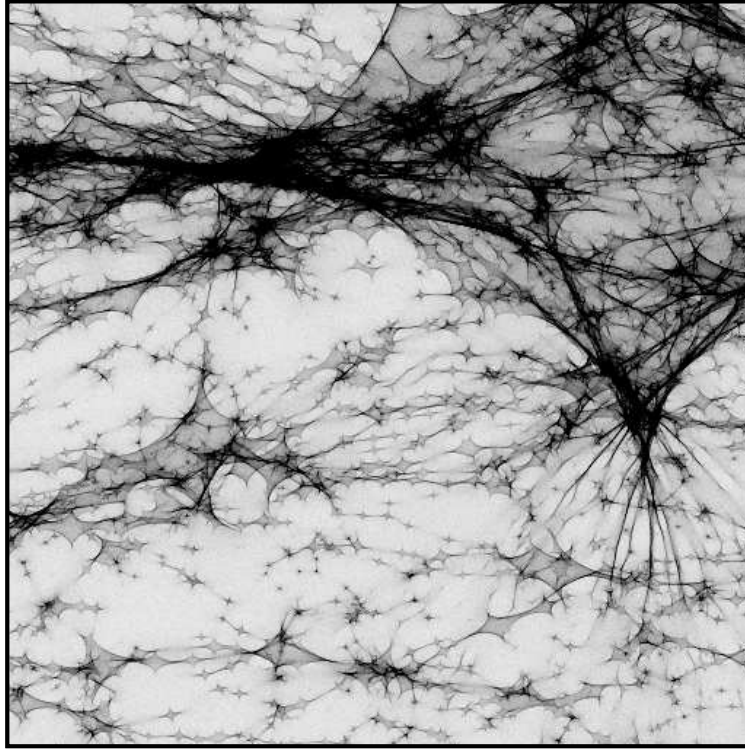


Рис. 7: Фрагмент карти посилення зі степеневим розподілом мас мікролінз.

ними лініями (BAL), до класу яких і належить квазар-джерело в системі SBS 1520 + 530 [37].

Скориставшись параметрами реакції Бесселевих фільтрів, у яких проводилися спостереження компонентів гравітаційно лінзованої системи SBS 1520+530, були отримані середні по вибірці оцінки значень ефективного радіуса квазару у фільтрах: $r_V = 2.4 \cdot r_0 = 3.9 \cdot 10^{15}$ см, $r_R = 2.5 \cdot r_0 = 4.2 \cdot 10^{15}$ см, $r_I = 2.9 \cdot r_0 = 4.8 \cdot 10^{15}$ см.

Для моделювання ефекту мікролінзування був застосований статистичний метод оцінки параметрів гравітаційно лінзованої системи. Для цього генерувалися карти каустик, що утворюють мікролінзи у площині джерела (див. Рисунок 7). Побудова карти каустик заснована на рішенні двовимірного рівняння лінзи, яке ставить у відповідність координати в площині джерела з координатами в площині лінзи. Модель баріонної складової, пов'язаної з компактними об'єктами лінзи-галактики по типу зірок та планет, задається сумою точкових мас, так званих лінз Шварцшильда. Модель розподіленої складової маси, до якої може входити газова, пилова, нейтринна або невідома поки темна матерія, задається параметром поверхневої густини. При цьому кут відхилення променя світла визначається як:

$$\vec{a} = \vec{a}(\vec{x})_s + \vec{a}(\vec{x})_* = \sigma_s \vec{x} + \sum_{i=0}^{N_*} m_i \frac{(\vec{x} - \vec{x}_i)}{|\vec{x} - \vec{x}_i|^2}, \quad (2)$$

Великий обсяг обчислень, необхідний для отримання карти підсилення,

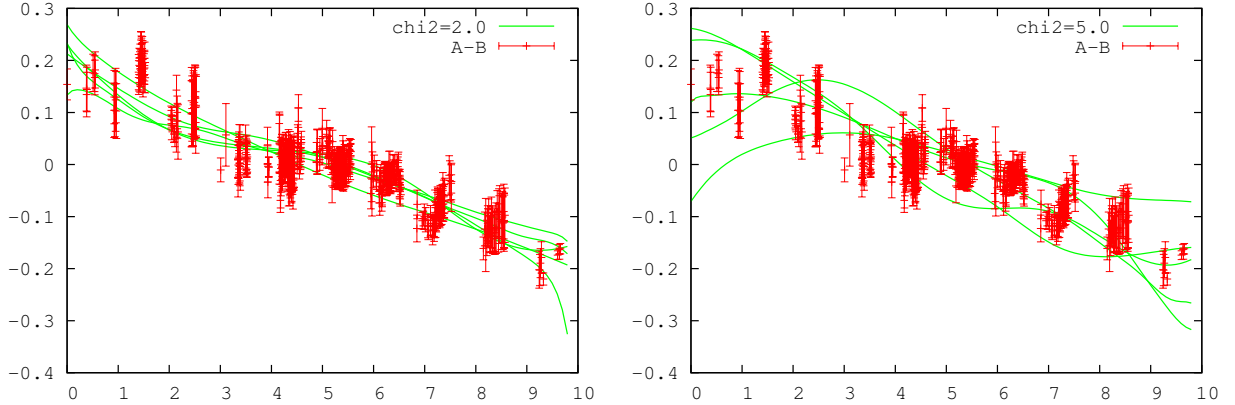


Рис. 8: Набір модельних кривих блиску при $\chi^2 = 2.0$ та $\chi^2 = 5.0$ у порівнянні з даними спостережень.

накладає обмеження на можливості моделювання процесу мікролінзування. У даній роботі був реалізований алгоритм генерації каустичної картини з використанням технології CUDA (Compute Unified Device Architecture), для паралельних обчислень з використанням графічного процесора. Ефективність даного методу побудови карти посилення дає приріст продуктивності обчислень більш ніж два порядки.

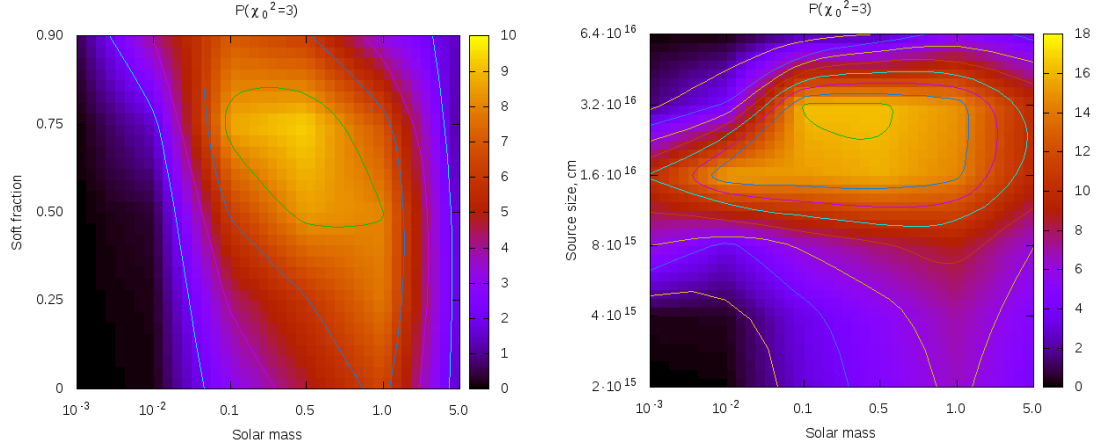
Для аналізу подій мікролінзування у системі SBS 1520 + 530 будувалися карти підсилення розміром $N_x = 4096$, $N_y = 4096$ пікселів для набору розмірів радіуса кільця Ейнштейна мікролінз рівних $l_E = 300, 200, 100, 50, 30$ пікселів, щоб перекрити діапазон мас від 0.001 до 5 мас Сонця. Середня кількість променів, що приходять на один піксель карти підсилення дорівнювала $A_{av} = 100$. Для кожного компонента та набору параметрів формувалися по 3 каустичні картини.

Перевірка впливу розподіленої у просторі матерії, що входить до складу лінзи-галактики, здійснювалася за допомогою серії карт підсилення з розподіленою фракцією, що становила 25, 50, 75 відсотків від повної маси. Розміри кільця Ейнштейна мікролінз були обрані рівними $l_E = 200, 100, 50$ пікселів.

Крива блиску мікролінзування, що формується під час руху джерела по каустичній картині, обчислювалася як згортка карти каустик гравітаційної лінзи з розподілом поверхневої яскравості по джерелу.

Отримані із спостережень криві блиску двох зображень квазара ГЛ системи SBS 1520 + 530 можуть дати інформацію лише щодо різностній кривій мікролінзування. На даний момент не існує способу розділення події мікролінзування для кожного зображення квазара, тому у роботі порівнювалися різностні спостережні криві мікролінзування з модельними різностними кривими.

У якості параметра подібності модельних та реальних кривих мікролін-



(a) Залежність величини χ^2 від кількості розподіленої матерії та маси мікролінзування. (b) Залежність величини ймовірності розподілу параметрів від розміру джерела та маси мікролінз.

Рис. 9: Оцінка фізичних параметрів ГЛС SBS 1520 + 530 отриманих з аналізу кривої мікролінзування.

зування було вибрано значення величини χ^2 , представлене у наступному вигляді:

$$\chi^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n \frac{(R_m(t_i) - \mu(t_i, \vec{p}))^2}{\sigma_{err(t_i)}^2}, \quad (3)$$

де $R_m(t_i)$ - крива мікролінзування, отримана по даним спостережень, $\mu(t_i, \vec{p})$ - реалізація модельної кривої мікролінзування, розрахована по набору параметрів \vec{p} , n - кількість точок спостережної кривої блиску що аналізується, а $\sigma_{err(t_i)}^2$ - характеризує похибки вимірювань кривих блиску.

Ймовірність того, що для даного набору параметрів \vec{p} , випадковим чином обрана модельна крива мікролінзування буде досить близька до даних що спостерігаються, визначалася виразом:

$$P(\chi^2 < \chi_0^2) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N(\chi^2 < \chi_0^2)}{N}, \quad (4)$$

де $N(\chi^2 < \chi_0^2)$ - кількість вдалив реалізацій, а N - їх загальне число.

На рисунку 8 продемонстровані ряди модельних кривих в порівнянні з спостережуваною кривою блиску, при значеннях параметра подібності $\chi^2 = 2.0$ та $\chi^2 = 5.0$. Значення параметра подібності кривих мікролінзування було прийнято $\chi_0^2 = 3$, виходячи з умови, щоб модельні криві мікролінзування та спостережні дані відрізнялися один від одного не більше ніж на $3\sigma_{err(t_i)}^2$.

Результати числового моделювання що представлені на рисунках 9 показують ймовірність розподілу фізичних параметрів гравітаційно-лінзованої системи SBS 1 520 + 530.

Як видно з малюнка 9b, де показана залежність величини ймовірності мікролінзування від розміру джерела та маси мікролінз, найбільш імовірний розмір джерела становить $3 \cdot 10^{16}$ см., а маса мікролінз системи SBS 1520+ 530 дорівнює приблизно 0.3 маси Сонця.

Вплив кількості розподіленої матерії в лінзі-галактиці на імовірність спостережуваного в системі SBS 1520 + 530 процесу мікролінзування представлена на малюнку 9a, з якого видно, що максимальне значення ймовірності відповідає масам мікролінз в діапазоні $m_{\odot} = 0.1 - 0.5$ мас Сонця, а найбільш ймовірна кількість гладкою складової матерії яка може включати і темну матерію, становить близько $\sigma_s = 75$ %.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі виконано спостереження та отримана фотометрична інформація щодо поведінки зображень ГЛК SBS 1520+530 у трьох оптичних смугах VRI. Проведено статистичне моделювання процесів мікролінзування у системі SBS 1520+530 і отримано оцінки ряду фізичних та космологічних параметрів. Найбільш важливі результати роботи такі:

1. Проведено спостереження та проведено фотометрію компонентів гравітаційно лінзованої системи SBS 1520+530 у трьох оптичних смугах VRI, що були отримані упродовж десяти років.
2. Проведено дослідження ПЗЗ приймачів та розроблено програмне забезпечення методу фотометрії компонентів, що використовує апріорну інформацію про ГЛС.
3. Отримана фотометрія компонентів квазару SBS 1520+530 дозволила вперше показати кореляцію показника кольору з блиском,
4. Визначено нові оцінки часу запізнення між зображеннями А і В ГЛС SBS 150+530 з урахуванням явища мікролінзування.
5. Побудована модель гравітаційної лінзи, що дозволило оцінити повну масу лінзуючої галактиці SBS 1520+530 та отримати значення сталої Хаббла.
6. Статистичний аналіз процесу мікролінзування у системі SBS 1520+530, дозволив отримати оцінки маси мікролінз, що знаходяться у лінзі-галактиці та розміру квазару-джерела у спектральних смугах VRI.

**СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ
ДИСЕРТАЦІЇ.**

В наукових фахових виданнях.

- [1] V. Dudinov, P. Bliokh, B. Paczynski, H. N. Omma, R. Schild, W. Colley, V. Vakulik, A. Zheleznyak, A. **Sergeyev**, B. Artamonov, S. Nuritdinov, and S. Ehgamberdiev, “A program of international cooperative investigation of gravitational lens systems”, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel Supplement*, vol. 3, pp. 170–173, 2000.
- [2] A. Zheleznyak, A. **Sergeev** и V. Konichek, “Optical monitoring of gravitationally lensed quasar sbs 1520+530”, *Вісник Київського національного університету*, т. 39-40, с. 81–85, 2003.
- [3] А. Железняк, А. **Сергеев** и О. Бурхонов, “Результаты оптических наблюдений гравитационной линзы sbs 1520+530 на майданакской обсерватории”, *Астрономический Журнал*, т. 80, с. 756–766, 9 2003.
- [4] E. A. Koptelova, B. P. Artamonov, V. V. Bruevich, O. A. Burkhonov, and A. V. **Sergeev**, “Variability of the gravitational lens um 673 in 2003 2005”, *Astronomy Reports*, vol. 52, pp. 270–277, 2008.
- [5] V. N. Shalyapin, L. J. Goicoechea, E. Koptelova, B. P. Artamonov, A. V. **Sergeyev**, A. P. Zheleznyak, T. A. Akhunov, O. A. Burkhonov, S. N. Nuritdinov, and A. Ullán, “Microlensing variability in fbq 0951+2635: short-time-scale events or a long-time-scale fluctuation?”, *MNRAS*, vol. 397, pp. 1982–1989, 2009.
- [6] V. G. Vakulik, V. M. Shulga, R. E. Schild, V. S. Tsvetkova, V. N. Dudinov, A. A. Minakov, S. N. Nuritdinov, B. P. Artamonov, A. Y. Kochetov, G. V. Smirnov, A. V. **Sergeyev**, V. V. Konichek, I. Y. Sinelnikov, V. V. Bruevich, T. Akhunov, and O. Burkhonov, “Time delays in pg 1115+080: new estimates”, *MNRAS*, vol. 400, pp. L90–L93, 2009.
- [7] V. S. Tsvetkova, V. G. Vakulik, V. M. Shulga, R. E. Schild, V. N. Dudinov, A. A. Minakov, S. N. Nuritdinov, B. P. Artamonov, A. Y. Kochetov, G. V. Smirnov, A. V. **Sergeyev**, V. V. Konichek, I. Y. Sinelnikov, A. P. Zheleznyak, V. V. Bruevich, R. Gaisin, T. Akhunov, and O. Burkhonov, “Pg1115+080: variations of the a2/a1 flux ratio and new values of the time delays”, *MNRAS*, vol. 406, pp. 2764–2776, 2010.
- [8] V. N. Dudinov, G. V. Smirnov, V. G. Vakulik, A. V. **Sergeev**, and A. E. Kochetov, “Gravitational lens system q2237+0305 in 2001-2008: observations on mt. maidanak”, *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. 2, pp. 115–124, 2011.

- [9] E. Koptelova, W. P. Chen, T. Chiueh, B. P. Artamonov, V. L. Oknyanskij, S. N. Nuritdinov, O. Burkhonov, T. Akhunov, V. V. Bruevich, O. V. Ezhkova, A. S. Gusev, A. V. **Sergeyev**, S. A. Ehgamberdiev, and M. A. Ibragimov, “Time delay between images of the lensed quasar um673”, *A&A*, vol. 544, A51, A51, 2012.
- [10] E. Y. Bannikova, V. G. Vakulik, and A. V. **Sergeev**, “N-body simulation of a clumpy torus: application to active galactic nuclei”, *MNRAS*, vol. 424, pp. 820–829, 2012.
- [11] A. **Sergeev**, O. Burkhonov, V. Dudinov, A. Zheleznyak, Y. Krugly, I. Molotov, V. Shulga, V. Ehgamberdiev S. A. Konichek, and A. Kochetov, “The modernization of azt-22 telescope of maidanak high-altitude observatory: testing results”, *Radio Physics and Radio Astronomy*, vol. 1, pp. 20–25, 2014.
- [12] A. V. **Sergeyev**, A. P. Zheleznyak, V. N. Shalyapin, and L. J. Goicoechea, “Discovery of the optically bright, wide separation double quasar sdss j1442+4055”, *MNRAS*, vol. 456, pp. 1948–1954, 2016.
- [13] T. A. Akhunov, O. Wertz, A. Elyiv, R. Gaisin, B. P. Artamonov, V. N. Dudinov, S. N. Nuritdinov, C. Delvaux, A. V. **Sergeyev**, A. S. Gusev, V. V. Bruevich, O. Burkhonov, A. P. Zheleznyak, O. Ezhkova, and J. Surdej, “Adaptive psf fitting - a highly performing photometric method and light curves of the gls h1413+117: time delays and micro-lensing effects”, *MNRAS*, vol. 465, pp. 3607–3621, 2017.

У матеріалах та тезах конференцій.

- [14] A. V. **Sergeyev**, A. P. Zheleznyak, V. V. Konichek, O. Burkhonov, and I. E. Sinelnikov, “Optical monitoring of gravitationally-lensed quasar sbs1520+530”, *Radio Astronomy at 70: From Karl Jansky to micro-jansky. JENAM-2003 Symposium*, 2003.
- [15] V. G. Vakulik, V. N. Dudinov, A. A. Minakov, S. N. Nuritdinov, O. A. Burkhonov, V. S. Tsvetkova, A. V. **Sergeev**, A. P. Zheleznyak, V. V. Konichek, I. Sinelnikov и G. V. Smirnov, “Photometric activity in the q2237+ 0305 gravitational lens”, *Вісник Київського національного університету*, т. 39-40, с. 19–25, 2003.
- [16] A. P. Zheleznyak, A. V. **Sergeyev**, V. V. Konichek, and I. E. Sinelnikov, “Long-time scale variability and microlensing sign of sbs 1520 + 530”, *Proceedings of VII International Conference Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology*, 2005, pp. 7–8.

- [17] A. **Sergeyev**, “Photometric monitoring of sbs 1520+530: long-term variability and microlensing”, *25 Years After the Discovery: Some Current Topics on Lensed QSOs*, L. J. Goicoechea, Ed., 2005, p. 6.
- [18] А. В. **Сергеев**, “Наблюдения гравитационно линзированных квазаров на майданакской обсерватории”, *Актуальные проблемы внегалактической астрономии XXI*, 2005.
- [19] A. **Sergeyev**, “The results of monitoring of glq sbs 1520+530”, *Problems of Gravitational Lensing*, 2007. url: <http://www.sai.msu.ru/news/2007/04/06/linze.html>.
- [20] А. В. **Сергеев**, А. П. Железняк, Т. Акхунов, О. Бурхонов и Б. В., “Определение и анализ параметров глс sbs 1520+530 по результатам наблюдений 2000-2006 годах”, *Proceedings of International Conference Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology*, 2009.
- [21] V. M. Shulga, V. S. Tsvetkova, A. A. Minakov, V. N. Dudinov, V. G. Vakulik, A. Y. Kochetov, G. V. Smirnov, and A. V. **Sergeyev**, “Strong gravitational lensing as a key to detect dark matter: the results of monitoring pg1115+080 and q2237+0305”, *Proceedings of the 10th G. Gamow’s Odessa Astronomical Conference-Summer School Astronomy and Beyond: Cosmomicrophysics, Cosmology and Gravitation, Astrophysics, Radio Astronomy and Astrobiology*, 2010, pp. 57–64.
- [22] A. **Sergeyev**, “Glq observations at maidanak observatory”, *3th Maidanak Users Meeting*, 2012.
- [23] E. Koptelova, W. P. Chen, T. Chiueh, B. P. Artamonov, V. L. Oknyanskij, S. N. Nuritdinov, O. Burkhonov, T. Akhunov, V. V. Bruevich, O. V. Ezhkova, A. S. Gusev, A. V. **Sergeyev**, S. A. Ehgamberdiev, and M. A. Ibragimov, “Time delay between images of the lensed quasar um673”, vol. 25, 2012, pp. 169–171.
- [24] A. V. **Sergeyev**, A. P. Zheleznyak, V. N. Shalyapin, and L. J. Goicechea, “Discovery of the optically bright, wide separation double quasar sdss j1442+4055”, *Astronomy and Space Physics in Kyiv University*, 2016, p. 21.
- [25] A. V. **Sergeyev**, A. P. Zheleznyak, V. N. Shalyapin, L. J. Goicechea, and O. Burkhonov, “The search gravitationally lensed quasars: the technique and first results.”, *Proceedings of the 16th G. Gamow’s Odessa Astronomical Conference-Summer School Astronomy and Beyond: Cosmomicrophysics, Cosmology and Gravitation, Astrophysics, Radio Astronomy and Astrobiology*, 2016, pp. 11–12.

- [26] A. V. **Sergeyev**, A. P. Zheleznyak, V. N. Shalyapin, and L. J. Goicechea, “Gravitationally lensed quasars search program: new double imaged quasar sdss j1617+3827”, *Astronomy and Space Physics in Kyiv University*, 2017, p. 39.

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [27] F. W. Dyson, A. S. Eddington, and C. Davidson, “A determination of the deflection of light by the sun’s gravitational field, from observations made at the total eclipse of may 29, 1919”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, vol. 220, pp. 291–333, 1920.
- [28] S. Refsdal, “On the possibility of determining hubble’s parameter and the masses of galaxies from the gravitational lens effect”, *MNRAS*, vol. 128, p. 307, 1964.
- [29] D. Walsh, R. F. Carswell, and R. J. Weymann, “0957 + 561 a, b - twin quasistellar objects or gravitational lens”, *NATURE*, vol. 279, pp. 381–384, 1979.
- [30] C. S. Kochanek, “The implications of lenses for galaxy structure”, *APJ*, vol. 373, pp. 354–368, 1991.
- [31] C. S. Kochanek, C. R. Keeton, and B. A. McLeod, “The importance of einstein rings”, *APJ*, vol. 547, pp. 50–59, 2001.
- [32] J. A. Muñoz, E. E. Falco, C. S. Kochanek, J. Lehár, B. A. McLeod, C. D. Impey, H.-W. Rix, and C. Y. Peng, “The castles project”, *AP&SS*, vol. 263, pp. 51–54, 1998.
- [33] J. Wambsganss and B. Paczynski, “Parameter degeneracy in models of the quadruple lens system q2237+0305”, *AJ*, vol. 108, pp. 1156–1162, 1994.
- [34] A. Eigenbrod, F. Courbin, C. Vuissoz, G. Meylan, P. Saha, and S. Dye, “Cosmograil: the cosmological monitoring of gravitational lenses. i. how to sample the light curves of gravitationally lensed quasars to measure accurate time delays”, *A&A*, vol. 436, pp. 25–35, 2005.
- [35] K. Chang and S. Refsdal, “Flux variations of qso 0957+561 a, b and image splitting by stars near the light path”, *NATURE*, vol. 282, pp. 561–564, 1979.
- [36] C. S. Kochanek, “Quantitative interpretation of quasar microlensing light curves”, *APJ*, vol. 605, pp. 58–77, 2004.
- [37] V. H. Chavushyan, V. V. Vlasyuk, J. A. Stepanian, and L. K. Erastova, “Sbs 1520+530: a new gravitationally lensed system at $z=1.855$.”, *A&A*, vol. 318, pp. L67–L70, 1997.

- [38] I. Burud, J. Hjorth, F. Courbin, J. G. Cohen, P. Magain, A. O. Jaunsen, A. A. Kaas, C. Faure, and G. Letawe, “Time delay and lens redshift for the doubly imaged bal quasar sbs 1520+530”, *A&A*, vol. 391, pp. 481–486, 2002.
- [39] N. I. Shakura и R. A. Sunyaev, “Black holes in binary systems. observational appearance.”, *A&A*, т. 24, с. 337–355, 1973.
- [40] D. P. Schneider, G. T. Richards, P. B. Hall и др., “The sloan digital sky survey quasar catalog. v. seventh data release”, *AJ*, т. 139, 2360, с. 2360, 2010. DOI: 10.1088/0004-6256/139/6/2360.
- [41] V. G. Vakulik, R. E. Schild, V. N. Dudinov, A. A. Minakov, S. N. Nuritdinov, V. S. Tsvetkova, A. P. Zheleznyak, V. V. Konichek, I. Y. Sinelnikov, O. A. Burkhonov, B. P. Artamonov и V. V. Bruevich, “Color effects associated with the 1999 microlensing brightness peaks in gravitationally lensed quasar q2237+0305”, *A&A*, т. 420, с. 447–457, 2004.
- [42] G. H. Rieke и M. J. Lebofsky, “The interstellar extinction law from 1 to 13 microns”, *APJ*, т. 288, с. 618–621, 1985.
- [43] J. Pelt, W. Hoff, R. Kayser, S. Refsdal и T. Schramm, “Time delay controversy on qso 0957+561 not yet decided”, *A&A*, т. 286, 1994.
- [44] P. Schneider, J. Ehlers и E. E. Falco, *Gravitational Lenses*. 1992, с. 112.
- [45] L. V. E. Koopmans, T. Treu, A. S. Bolton, S. Burles и L. A. Moustakas, “The sloan lens acs survey. iii. the structure and formation of early-type galaxies and their evolution since $z \tilde{1}$ ”, *APJ*, т. 649, с. 599–615, 2006.
- [46] M. W. Auger, C. D. Fassnacht, K. C. Wong, D. Thompson, K. Matthews, and B. T. Soifer, “Lens galaxy properties of sbs 1520+530: insights from keck spectroscopy and ao imaging”, *APJ*, vol. 673, 778-786, pp. 778–786, 2008.
- [47] R. R. Gibson, L. Jiang, W. N. Brandt, P. B. Hall, Y. Shen, J. Wu, S. F. Anderson, D. P. Schneider, D. Vanden Berk, S. C. Gallagher, X. Fan и D. G. York, “A catalog of broad absorption line quasars in sloan digital sky survey data release 5”, *APJ*, т. 692, с. 758–777, 2009.

АНОТАЦІЯ

Сергеев О.В. Гравітаційно лінзована система SBS 1520+530: оптичні спостереження та моделювання. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико - математичних наук за фахом 01.03.02 — астрофізика, радіоастрономія. — Міністерство освіти і науки України, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків 2018.

Дисертація присвячена дослідженню ефекту гравітаційного лінзування на основі оптичних спостережень гравітаційно лінзованої системи SBS 1520 + 530. Викладені основи теорії гравітаційного лінзування, наведені приклади прояву гравітаційного лінзування у Всесвіті, а також приведені астрофізичні та космологічні застосування гравітаційного лінзування.

Наведено алгоритми й методи фотометрії гравітаційно лінзованих квазарів та аналізу отриманих кривих блиску з метою визначення часу запізнювання.

Проведена фотометрія ПЗЗ зображень ГЛС SBS 1520+530 у фільтрах VRI, що були отримані на 1.5м телескопі АЗТ-22 г. Майданак (Узбекистан) у 1999-2009 роках. На основі отриманих кривих блиску визначена залежність показника кольору (V-I) від блиску у фільтрі R, а також отримані значення нахилу регресії залежності показників кольору (V-I) від (V-R). Показана наявність ефекту мікролінзування у системі SBS 1520+530 та проведена його кількісна оцінка. Визначено час затримки сигналу між зображеннями компонентів А і В з урахуванням ефекту мікролінзування ($\Delta t = 96 \pm 3.5$ дня).

Побудована модель гравітаційно лінзованої системи SBS 1520+530 та отримана оцінка значення сталої Хаббла на основі нового значення часу запізнювання $H_0 = 66.5 \pm 8 (\text{км} \cdot \text{с}^{-1}) \cdot \text{Мпк}^{-1}$. Проведене числове статистичне моделювання процесу мікролінзування в системі SBS 1520+530 за допомогою технології GPU обчислень (CUDA). Отримано оцінки найбільш імовірного розміру випромінюючої області квазара, а також маси мікролінзуючої галактики.

Ключові слова: гравітаційно-лінзовані квазари, SBS 1520 + 530, мікролінзування, фотометрія, крива блиску.

АННОТАЦИЯ

Сергеев А.В. Гравитационно линзированная система SBS 1520 + 530: оптические наблюдения и моделирование. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика, радиоастрономия. — Министерство образования и науки Украины, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков 2018.

Диссертация посвящена исследованию эффекта гравитационного линзирования на основе оптических наблюдений гравитационно линзированной системы SBS 1520+530. Изложены основы теории гравитационного линзирования, приведены примеры проявления гравитационного линзирования во Вселенной, а также приведены астрофизические и космологические приложения гравитационного линзирования.

Изложены современные подходы к обработке астрономических ПЗС изображений. Приведены алгоритмы и методы фотометрии гравитационно линзированных квазаров, и анализа полученных кривых блеска с целью определения времени запаздывания.

Проведена фотометрия ПЗС изображений ГЛС SBS 1520+530 в фильтрах VRI, полученных на 1.5м телескопе АЗТ-22 г. Майданак (Узбекистан) в 1999-2009 годах. На основе полученных кривых блеска определена зависимость показателя цвета V-I от блеска в фильтре R, а также получены значения наклона регрессии зависимости показателей цвета (V-I) от (V-R). Показано наличие эффекта микролинзирования и проведена его количественная оценка для системы SBS 1520+530. Определено время задержки сигнала между изображениями компонентов А и В с учетом эффекта микролинзирования ($\Delta t = 96 \pm 3.5$ дня).

Построена модель гравитационно линзированной системы SBS 1520+530, и получена оценка значения постоянной Хаббла на основе нового значения времени запаздывания $H_0 = 66.5 \pm 8 (\text{км} \cdot \text{с}^{-1}) \cdot \text{Мпк}^{-1}$. Проведено численное статистическое моделирование процесса микролинзирования в системе SBS 1520+530 с использованием технологии GPU вычислений (CUDA). Получена оценка наиболее вероятного размера излучающей области квазара, а также массы микролинз линзирующей галактики.

Ключевые слова: гравитационно - линзированные квазары, SBS 1520 + 530, микролинзирование, фотометрия, кривая блеска.

ABSTRACT

Sergeyev A. V. Gravitationally lensed system SBS 1520 + 530: optical observations and modeling. — Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by speciality 01.03.02 — astrophysics, radio-astronomy. — Ministry of Education and Science of Ukraine, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv 2018.

The thesis is dedicated to the study of a gravitational lensing effect and based on optical observations of the gravitationally lensed system SBS 1520 + 530. The fundamentals of the theory, examples and cosmological applications of gravitational lensing are presented.

Modern approaches to processing of astronomical CCD images are discussed. Algorithms and methods for photometry of gravitationally lensed quasars, and the analysis of the obtained light curves for determining the time delays are presented.

Photometry of the CCD images of GLS SBS 1520 + 530 in the VRI spectral bands obtained at the 1.5-m AZT-22 telescope of the Maidanak Observatory (Uzbekistan) in 1999-2009 was carried out. The values of (V-I) color indices versus R magnitudes and (V-I) versus (V-R) were determined on the basis of the obtained quasar light curves of images A and B.

The light curves of quasar images of the SBS 1520+530 system demonstrate the evidence of microlensing effect. Its quantitative estimation was obtained in this work. The time delay between two images A and B ($\Delta t = 96 \pm 3.5$ days) was determined taking into account the microlensing effect .

The model of the SBS 1520+530 gravitationally lensed system was constructed. It provides a possibility to estimate the value of the Hubble constant $H_0 = 66.5 \pm 8(\text{km} \cdot \text{c}^{-1}) \cdot \text{Mpc}^{-1}$. Numerical statistical modeling of the microlensing process in the SBS 1520 + 530 system was performed, using GPU computing technology (CUDA). Estimation of the most probable size of quasar emitting region, as well as a mass of a microlenses of the lensing galaxy, were estimated.

Key words: gravitationally lensed quasars, SBS 1520 + 530, microlensing, photometry, light curve.