

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

**«Визначення параметрів компонентів подвійних систем за
фотометричними спостереженнями»**

“Determination of the parameters of binary systems’ components using the
photometric observations”

Виконав: здобувач денної форми навчання

спеціальність: 104- Фізика та астрономія

Освітня програма Фізика та астрономія

Бабенко Олександр Анатолійович

Керівник д.ф.-м.н професор Панько О. О. _____
(підпис)

Рецензент д.ф.-м.н., професор Андронов І.Л.

Рекомендовано до захисту:
протокол засідання кафедри
фізики та астрономії
№ ____ від. ____ . 20 ____ р.

Захищено на засіданні ЕК № ____
протокол № ____ від. ____ . 20 ____ р.

Оцінка _____ / _____ / _____
(за національною шкалою, шкалою ECTS, бали)

Завідувач кафедри
____ Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ
(підпис) (прізвище, ім'я)

Голова ЕК
____ Володимир ГОЦУЛЬСЬКИЙ
(підпис)

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Подвійні зорі.....	6
1.1. Історія відкриття.....	6
1.2. Класифікація та типи подвійних систем за фізичними властивостями.....	7
1.3. Фізичні параметри зоряних компонент, що визначаються фотометрично.....	12
2. Міжнародні бази даних що містять фотометричні вимірювання....	14
2.1. Відкриті бази даних.....	14
2.2. OGLE(Optical Gravitational Lensing Experiment).....	17
3. Програми що використовуються для визначення фізичних параметрів.....	18
3.1. BM3(Binary Maker 3).....	18
3.2. PHOEBE (PHysics Of Eclipsing BinariEs).....	20
4. Фізичні параметри компонентів 4-х затемнюваних систем.....	23
4.1. OGLE-LMC-ECL-37994.....	23
4.2. OGLE-LMC-ECL-06782.....	26
4.3. OGLE-LMC-ECL-19942.....	28
4.4. OGLE-LMC-ECL-05725.....	30
Висновки.....	32
Список використаних джерел	34

ВСТУП

Фотометричні дослідження зоряних систем набули особливого значення в сучасну епоху космічних місій. Завдяки високоточній фотометрії, яку забезпечили орбітальні обсерваторії (наприклад, Kepler, TESS тощо), астрономи отримали безперервні криві блиску тисяч змінних зір з безпрецедентною точністю. Це призвело до відкриття й детального вивчення величезної кількості затемнюваних подвійних систем, розширивши наші знання про їх різноманітність та еволюцію. Зокрема, лише за даними місії Kepler було ідентифіковано близько 2,8 тисячі затемнюваних подвійних і еліпсоїдальних систем, що становить $\sim 1,3\%$ від усіх спостережуваних цільових зір. Натомість оглядове сканування всього неба місією TESS обіцяє виявити на порядки більше подвійних зір – за оцінками, до кількох сотень тисяч систем. Таким чином, сучасні великомасштабні фотометричні проекти забезпечують величезні масиви даних, які вимагають нових методів обробки і аналізу.

Актуальність теми полягає в тому, що завдяки розвитку технологій фотометрії, а також зростанню обсягів даних від міжнародних баз та космічних місій, подвійні зоряні системи стали ключовим об'єктом для фундаментальних досліджень. Їхнє вивчення дозволяє глибше зрозуміти процеси еволюції, масообміну та гравітаційної взаємодії між зорями, а також вдосконалювати моделі зоряної будови.

Фотометрія, як метод дослідження подвійних зір, дозволяє визначати фундаментальні параметри компонентів, недоступні при вивченні одиночних зір. Аналіз кривої блиску – залежності зоряної світності від часу – дає змогу обчислити орбітальний період системи, оцінити ексцентриситет орбіти та кут нахилу орбітальної площини до променя зору. Зокрема, період обертання компонент визначається безпосередньо з періодичності змін блиску. Кут нахилу і можна оцінити зі спостережуваної глибини мінімумів:

якщо орбіта майже крайова (і близький до 90°), то спостерігаються повні затемнення і глибина мінімумів максимальна. Вимірюючи тривалість та форму затемнень, можна визначити відносні розміри зір і орбітальний розділ між ними. Фотометричні дані в різних фільтрах дозволяють оцінити ефективні температури компонент через порівняння глибин первинного і вторинного мінімумів та використання кольорних індексів. Лише методами фотометрії можна безпосередньо визначити радіуси зір: тривалість затемнення при відомому періоді дає змогу знайти відношення розмірів зір до великої півосі орбіти, а з амплітуди змін блиску поза затемненнями (еліпсоїдальні модуляції) можна судити про ступінь припливної деформації зоряних поверхонь.

Предметом дослідження є подвійні зоряні системи.

Об'єкт дослідження ми обрали фотометричні властивості затемнюваних подвійних систем, а також методи їх аналізу на основі реальних спостережень. Особлива увага приділяється застосуванню комп'ютерного моделювання кривих блиску для отримання орбітальних та фізичних параметрів компонентів системи.

Протягом останніх десятиліть прогрес у дослідженні подвійних зір значно прискорився. Окрім розвитку теорій будови та еволюції зір, які пояснюють спостережувані явища, ключову роль відіграє вдосконалення інструментів спостереження і методів аналізу даних. Сучасні автоматизовані огляди (OGLE, Catalina, Gaia та інші) надають відкриті бази фотометричних спостережень із мільйонами об'єктів. Зокрема, проєкт OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) відкрив десятки тисяч затемнюваних подвійних у Магелланових Хмарах, що стало цінним матеріалом для статистичних досліджень. Космічні місії розширили ці можливості, забезпечивши безперервність і точність фотометрії: змінність з амплітудою до часток відсотка тепер реєструється впевнено, що дозволяє виявляти тонкі ефекти (наприклад, відхилення від періодичності, спричинені третіми тілами або зоряними плямами).

Наукова новизна роботи полягає в тому, що для 4-х затемнюваних подвійних систем, за тривалим рядом високоточних фотометричних спостережень з бази даних OGLE побудовано фазові криві блиску та вперше визначено фізичні параметри зір, що входять до систем.

1. ПОДВІЙНІ ЗОРІ

1.1. Історія відкриття

Перші згадки про зорі, що існують у парах, з'явилися у XVIII столітті, коли англійський астроном Вільям Гершель розпочав систематичне каталогізування об'єктів, які в телескопі виглядали «подвійними». Спочатку такі пари вважали випадковими проекціями, де зорі просто розташовані на одній лінії зору без гравітаційного зв'язку. Проте, Гершель, протягом багатьох років спостерігаючи зміни їхніх відносних позицій, дійшов висновку, що деякі з них дійсно пов'язані спільним центром мас. Це відкриття започаткувало нову епоху в астрономії, демонструючи, що зорі можуть утворювати складні фізичні системи, подібні за своєю взаємодією до Сонячної.

Важливий внесок у вивчення подвійних зір зробив Фрідріх Георг Вільгельм Струве, який у XIX столітті опублікував серію детальних каталогів, відомих як «зорі Струве». Він не лише фіксував їхнє існування, а й з високою точністю вимірював позиційні кути та відстані між компонентами, використовуючи мікрометри. Завдяки цим даним вдалося систематизувати поняття «візуальних подвійних зір» і визначити, які з них справді пов'язані гравітаційно.

Наступний прорив у вивченні подвійних систем відбувся наприкінці XIX — на початку XX століття з розвитком спектроскопії. Якщо зорі в парі були настільки близько одна до одної, що їх неможливо було розрізнити оптично, то періодичні зміни доплерівських зсувів у спектрі підтверджували існування «спектроскопічних подвійних». Це дозволило розширити знання про безліч систем, які раніше не вдавалося спостерігати у телескоп, і визначити їхні орбітальні періоди, відносні маси та інші динамічні характеристики.

Паралельно з цим розвивалася фотографічна техніка, що сприяло прогресу у фотометрії. Вимірювання змін блиску зір у часі стало ключовим методом для виявлення «затемнюваних подвійних». Коли одна зоря проходить перед іншою, відбувається помітне зменшення загальної яскравості, а аналіз цих спадів («мінімумів») у кривій блиску дозволяє визначати радіуси зір, нахил орбіти та навіть співвідношення їхніх температур. Цей підхід виявився надзвичайно ефективним для перевірки теоретичних моделей зоряної будови.

У ХХ столітті астрономи активно поєднували фотометрію, спектроскопію та астрометрію, що дозволило значно розширити дослідження подвійних зір. Це призвело до створення комплексних каталогів та вдосконалення списків «візуальних», «спектроскопічних» і «затемнюваних» подвійних систем.

Дослідження подвійних зір відіграє ключову роль у визначенні масового розподілу в Галактиці та розумінні еволюційних процесів, зокрема обміну масою між зорями та формування контактних конфігурацій. Таким чином, розвиток методів – від перших мікрометричних вимірювань до сучасних високоточних технологій – наочно демонструє важливість подвійних систем у вивченні фундаментальних законів зоряної фізики та еволюції [1].

1.2. Класифікація та типи подвійних систем за фізичними властивостями

У даному розділі розглянемо класифікацію подвійних систем за чотирма основними фізичними критеріями: характер взаємодії компонентів, просторове розташування, метод спостереження та еволюційна стадія.

Класифікація за характером взаємодії компонентів

Подвійні системи можна поділити на три групи залежно від ступеня взаємодії між їхніми компонентами та заповненням порожнин Роша [2]:

1) Розділені системи. Приклад розділеної системи наведено на (рис 1.). У розділених подвійних системах обидві зорі залишаються в межах власних гравітаційних областей і не перетинають критичних поверхонь. Такий стан означає, що кожна зоря еволюціонує майже незалежно від партнера, а взаємодія між компонентами мінімальна. Відсутність масообміну робить ці системи особливо цінними для порівняння з теоретичними моделями одиночної зоряної еволюції. Лише у випадку значного розширення однієї з зір у процесі еволюції система може перейти до напіврозділеної.

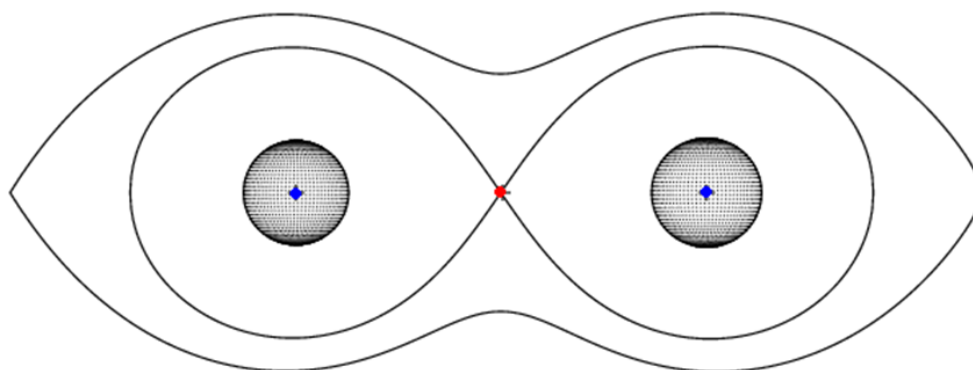


Рис. 1. Еквіпотенціальні поверхні та порожнини Роша для розділеної системи, на прикладі КР Aql [3]. Червоним хрестиком вказано положення точки Лагранжа L1

2) Напіврозділені системи (рис. 2). Коли одна із зір внаслідок еволюційних змін розширюється і досягає межі власної порожнини Роша, починається процес перетікання речовини на сусідній компонент. У результаті виникає динамічна взаємодія, що здатна змінити темп еволюції обох об'єктів. Зоря-донор втрачає частину своєї маси, що впливає на її структуру, тоді як зоря-акретор може збільшити масу, температуру та світність. Такі системи є джерелом складних змін блиску й мають характерну фотометричну поведінку.

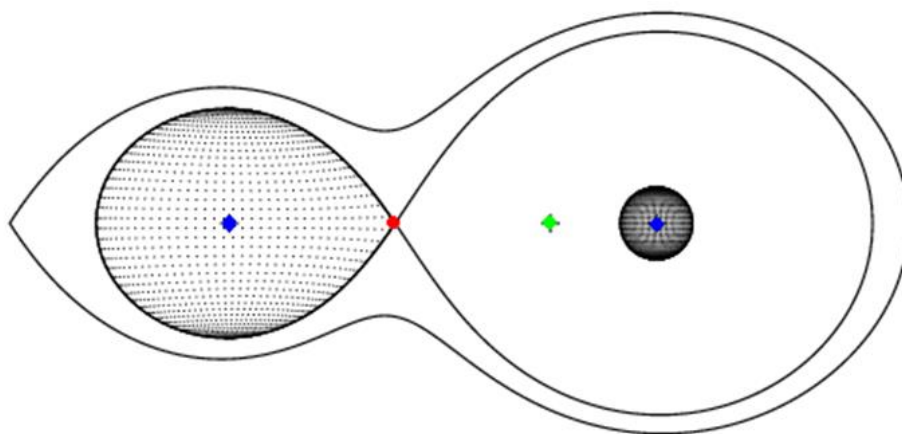


Рис. 2. Еквіпотенціальні поверхні та порожнини Роша для напіврозділеної системи, на прикладі AD Her [4]. Червоним хрестиком вказано положення точки Лагранжа L_1 . Зеленим хрестиком вказано центр мас системи, менша за розміром зоря більш масивна

3) Контактні системи (рис 3.). Це системи які характеризуються тим, що їхні компоненти повністю заповнюють свої порожнини Роша та утворюють спільну оболонку. Речовина безперервно переміщується між зорями, відбувається ефективне вирівнювання температур і обертання. Внаслідок тісного контакту компоненти можуть синхронізувати своє обертання та набувати однакових фізичних характеристик. У багатьох випадках така взаємодія завершується злиттям двох зір або переходом до нестабільної фази розвитку.

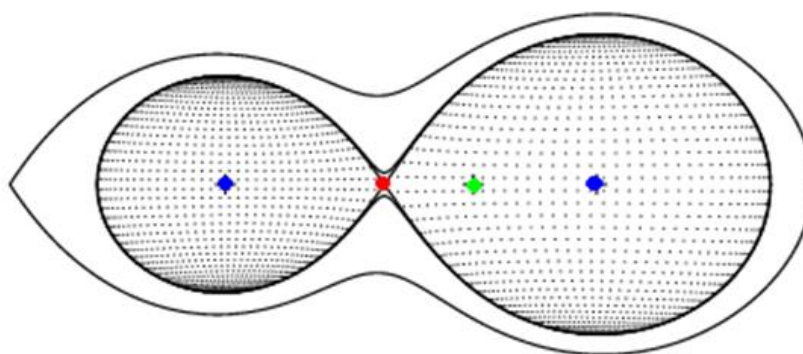


Рис 3. Еквіпотенціальні поверхні та порожнини Роша для контактної системи, на прикладі AE Phe [5]. Позначки, як на рис. 2

Додатково іноді розглядають майже-контактні (рис. 4) та над-контактні системи (рис. 5).

У майже-контактних системах обидві зорі або майже заповнюють свої порожнини Роша, або одна з компонентів практично досягає критичної поверхні. Пряма взаємодія ще не почалася, проте конфігурація є нестабільною — система може швидко перейти до напіврозділеної або контактної фази. Часто у таких парах фіксуються помітні припливні деформації, еліпсоїдальні варіації яскравості та інші ефекти взаємодії. Ці системи є цінними для дослідження перехідних етапів еволюції подвійних зір.

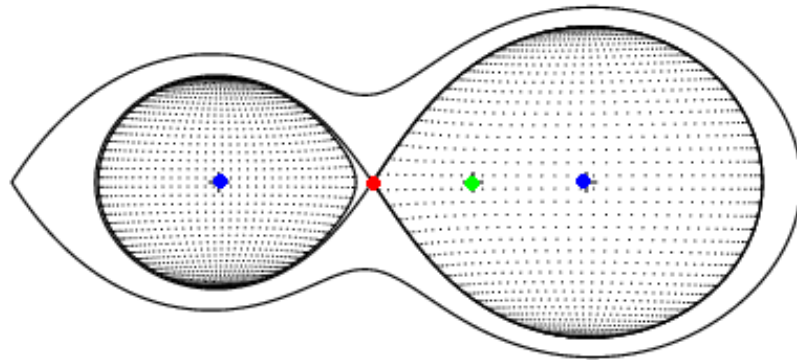


Рис. 4. Порожнини Роша для майже-контактної системи, на прикладі V1010 Ori [6]. Позначки, як на рис. 2

У сверж-контактних системах обидва компоненти перевищують межі своїх порожнин Роша та фізично проникають один в інший, утворюючи єдину спільну конвективну оболонку. Такі конфігурації є результатом глибокої взаємодії — речовина безперервно циркулює між компонентами, що веде до вирівнювання температур, обертання та структури зір.

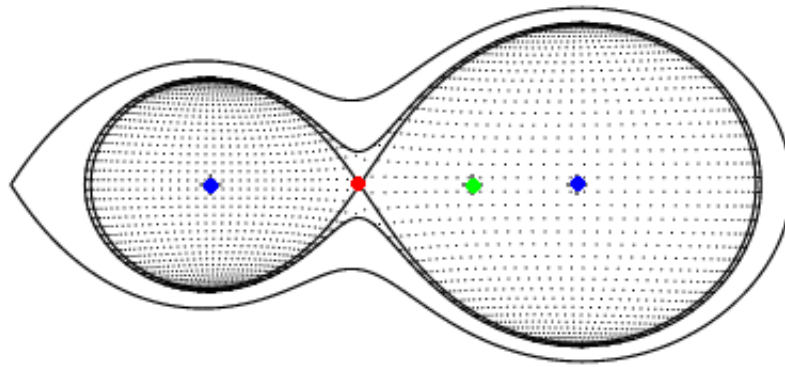


Рис. 5. Порожнини Роша для сверх-контактної системи, на прикладі AD Her [4]. Позначки, як на рис. 2

Класифікація за методом спостереження

Метод виявлення подвійних систем визначає спосіб їх дослідження та аналізу:

- Візуальні подвійні системи:

Компоненти можна розділити за допомогою сучасних оптичних телескопів. Цей тип систем дозволяє безпосередньо вивчати параметри орбіти та фізичні властивості кожної зорі.

- Спектроскопічні подвійні системи:

Виявлення здійснюється через періодичні зсуви спектральних ліній, обумовлені ефектом Доплера при русі зорь навколо спільного центру мас. Такий підхід дозволяє дослідити системи, у яких зорі не можуть бути розділені візуально.

- Епізодичні (затінені) системи:

Спостереження затемнень, коли одна зоря закриває іншу, надає можливість аналізувати орбітальні параметри та розміри компонентів. Еволюція світлової кривої є важливим індикатором фізичних процесів у системі.

- Астрометричні подвійні системи:

Виявлення компаньйона здійснюється шляхом аналізу змін положення основної зорі. Навіть якщо другий компонент не спостерігається

безпосередньо, його наявність може бути встановлена через вплив на рух основної зорі.

Класифікація за масою та еволюційною стадією компонентів

Додатковою ознакою класифікації є маса та стадія еволюції зоряних компонентів:

- **Подвійні системи головної послідовності:**

Обидві зорі перебувають на стадії головної послідовності, що дозволяє аналізувати процеси зоряного формування та ранньої еволюції.

- **Системи з еволюційно старшими компонентами:**

Можуть включати гігантів, надгігантів або компактні об'єкти (білих карликів, нейтронних зір, чорних дір), що відкриває можливості для дослідження пізніх стадій зоряної еволюції та взаємодії між компонентами з різною історією розвитку.

- **Подвійні системи з компактним компонентом**

Принаймні один із компонентів представляє собою компактний об'єкт. Такі системи часто є джерелами інтенсивного рентгенівського випромінювання або інших високоенергетичних явищ, що пов'язано з інтенсивними акреційними процесами [7].

1.3. Фізичні параметри зоряних компонент, що визначаються фотометрично

Фотометричні спостереження, зокрема аналіз кривих блиску, дають змогу визначати низку фундаментальних параметрів компонентів подвійної зоряної системи. Завдяки періодичному затемненню одного компонента іншим, ми можемо отримати прямі спостережувані характеристики, які після моделювання дозволяють відтворити фізичні властивості зір.

Одним із основних параметрів, що визначаються фотометрично, є **орбітальний період P** , який знаходиться шляхом аналізу регулярності змін

блиску. Орбітальний період безпосередньо пов'язаний із законом Кеплера і є відправною точкою для подальших розрахунків.

З глибини первинного та вторинного мінімумів кривої блиску можна оцінити **ефективні температури** компонентів. Якщо припустити, що компонент з більшою глибиною затемнення є холоднішим (або, навпаки, яскравішим – залежно від конфігурації), співвідношення температур може бути встановлене за допомогою простого співвідношення:

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^4 \quad (1)$$

де L – світність, R – радіус, T – температура компонентів.

Тривалість затемнення та форма мінімумів дозволяють визначити **радіуси компонентів** відносно великої півосі орбіти a . Це досягається шляхом аналізу фазового інтервалу, протягом якого відбувається затемнення, та його симетрії. Зокрема, відношення радіусів $\frac{R_1}{a}$ і $\frac{R_2}{a}$ є безпосереднім результатом моделювання кривої блиску.

Ще одним важливим параметром є **кут нахилу орбіти** i . Він впливає на амплітуду змін блиску та глибину мінімумів: повні затемнення спостерігаються лише при значеннях $i \approx 90^\circ$ тоді як при менших значеннях зменшення яскравості часткове або відсутнє.

У випадку неколових орбіт додатково визначається **ексцентриситет орбіти** e та аргумент перицентра ω , які впливають на асиметрію кривої блиску. Зокрема, ексцентриситет викликає нерівномірність проміжків між первинним і вторинним мінімумами.

Співвідношення яскравостей компонентів визначаються шляхом моделювання загального світлового внеску кожної зорі у систему. У поєднанні з температурою це дозволяє оцінити **світності** компонентів і їхні колірні індекси, що має значення для калібрування спектральних типів [8].

2. МІЖНАРОДНІ БАЗИ ДАНИХ ЩО МІСТЯТЬ ФОТОМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

2.1. Відкриті бази даних

Фотометричні дані є основою для аналізу фізичних параметрів подвійних зоряних систем. Їхній збір і попередня обробка забезпечують основу для побудови кривих блиску, які є ключовими для визначення параметрів компонент системи. Залежно від типу досліджень, дані можуть бути отримані як із космічних місій, так і за допомогою наземних обсерваторій.

Джерела даних та космічні місії:

GAIA – це космічна місія Європейського космічного агентства (ESA), запущена в 2013 році з метою створення найдетальнішої карти нашої Галактики. Супутник GAIA здійснює високоточні вимірювання положень, власних рухів, відстаней та фотометричних характеристик мільярдів зір.

До основних завдань GAIA входить: визначення положень і відстаней 1,8 мільярда зір з безпрецедентною точністю, отримання фотометричних та спектроскопічних даних для вивчення фізичних характеристик зір, дослідження структури та динаміки Чумацького Шляху, відкриття змінних зірок, екзопланет, астероїдів та інших небесних об'єктів.

GAIA періодично публікує нові набори даних, що містять фотометричні, спектроскопічні та астрономічні вимірювання. Далі буде наведено невеличкий перелік основних релізів GAIA:

- Gaia DR1 (2016) – перші результати, що включали положення та яскравості понад 1 мільярда зір.
- Gaia DR2 (2018) – розширений каталог із 1.7 мільярда зір, включаючи власні рухи та радіальні швидкості.

- Gaia EDR3 (2020) – оновлення, що покращило точність вимірювань.
 - Gaia DR3 (2022) – найповніший каталог, що містить 1.8 мільярда зір, спектральні характеристики, інформацію про змінні об'єкти та астероїди.
- Фотометричні вимірювання GAIA охоплюють три основні діапазони:
- G-band (350-1000 нм) – загальний діапазон яскравості.
 - BP-band (330-680 нм) – синьо-фотометричний канал.
 - RP-band (640-1050 нм) – червоно-фотометричний канал [9].

Kepler / K2

Kepler — космічна місія NASA, запущена 7 березня 2009 року з метою пошуку екзопланет методом транзитів. Однак окрім основного завдання, Kepler став джерелом високоточних фотометричних спостережень, які мали надзвичайно велике значення для вивчення змінних зір, зокрема затемнюваних подвійних систем. Упродовж основної місії апарат безперервно спостерігав ~150 000 зір у сузір'ї Лебедя протягом 4 років, забезпечуючи безпрецедентну точність і сталість кривих блиску [10].

Після втрати другого махового колеса у 2013 році місія продовжилася у зміненому форматі під назвою K2. В рамках K2 телескоп спостерігав послідовні ділянки неба вздовж екліптики, що дозволило охопити значно ширшу вибірку зір і підвищити статистичну значущість виявлених об'єктів. Kepler/K2 відкрив понад 2800 затемнюваних подвійних зір, багато з яких виявилися короткоперіодичними або мали складні форми світлових кривих [11].

Місія надала відкриті дані у форматі високоточної фотометрії з частотою до 30 хвилин і до 1 хвилини. Всі зібрані дані зберігаються у Масиві архівів NASA MAST, а також доступні через різні візуалізаційні інструменти (наприклад, LcTools, PyKE, Lightkurve) [12].

Отже можна казати що Kepler вніс визначальний внесок у сучасну астрофізику змінних зір а саме:

- дозволив виявити неочікуване велику кількість тісних подвійних систем;

- надав основу для перевірки моделей приливної взаємодії та синхронізації обертання;
- виявив нові типи подвійних систем, зокрема з ефектом відбиття або гармонічною модуляцією [13].

Наземна місія

American Association of Variable Star Observers (AAVSO) – це міжнародна наукова організація, заснована у 1911 році в США, яка координує спостереження змінних зір як професійними астрономами, так і аматорами. Організація накопичує, зберігає та аналізує дані про змінність зір та надає відкритий доступ до своїх каталогів. Наприклад AAVSO веде **Міжнародну базу даних змінних зір (AID)**, яка містить понад **50 мільйонів фотометричних вимірювань**, отриманих з 1911 року. База даних оновлюється регулярно, оскільки до неї щодня надходять нові спостереження. Також у базі містяться спостереження, виконані у різних фотометричних системах, зокрема:

- Візуальна фотометрія – суб’єктивні оцінки яскравості за допомогою телескопів.
- Фотоелектрична фотометрія – точні вимірювання яскравості за допомогою фотоелектричних приладів.
- Цифрова фотометрія (CCD та DSLR) – сучасні високоточні вимірювання.

AAVSO Light Curve Generator - це онлайн-інструмент який дозволяє будувати криві блиску змінних зірок на основі спостережень з бази AAVSO [14].

2.2. База даних та проєкт OGLE

Проєкт OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment) є масштабним астрономічним дослідженням, спрямованим на вивчення змінних зірок і явища гравітаційного лінзування, переважно в центральних областях Чумацького Шляху. Спочатку запущений у 1997 році проєкт послідовно розвивався через кілька етапів: OGLE-II (1997–2000), OGLE-III (з 2001 року) і, в даний час, OGLE-IV (з 2010 року).

Основною метою проєкту є детальне вивчення змінних зірок, у тому числі пульсуючих та затемнених бінарних систем, що дозволяє отримувати прямі вимірювання фундаментальних параметрів зірок, таких як маси, розміри, температури, абсолютні світності та характеристики обертання. Ці дані, у свою чергу, сприяють перевірці теорій зоряної еволюції, аналізу динамічних взаємодій у подвійних системах та більш точному визначенню відстаней до об'єктів у Чумацькому Шляху та за його межами.

З точки зору розвитку OGLE-II здійснював постійний моніторинг близько 30 мільйонів зірок на площі 11 квадратних градусів. З запуском OGLE-III спостерігається область була розширена до 69 квадратних градусів, а кількість зірок, що спостерігаються, зросла до 200 мільйонів. У рамках поточного етапу OGLE-IV проєкт регулярно здійснює спостереження близько 400 мільйонів зірок у 182 квадратних градусах найщільніших областей галактичного ядра.

Досягнення проєкту заслуговують на окрему увагу: завдяки OGLE значно збільшилася кількість відомих змінних зірок і затемнених бінарних систем – понад 450000 об'єктів, що є збільшенням у два порядки в порівнянні з попередніми каталогами. Серед отриманих результатів відзначається виявлення ультракороткоперіодичних подвійних систем з орбітальними періодами менше 0,22 дня, включаючи системи з рекордно короткими орбітальними періодами.

Спостереження в рамках OGLE проводяться з використанням 1,3-метрового Варшавського телескопа, розміщеного в обсерваторії Лас Кампанас (Чилі), оснащеного CCD-камерою з 32 детекторами, що покриває близько 1,4 квадратних градуси неба. Основна серія спостережень виконується із застосуванням фільтра Cousins I з експозицією 100 секунд, при цьому додаткові виміри Johnson V (до 10% спостережень, експозиція 150 секунд) дозволяють розширити спектр одержуваних даних. Для обробки фотометрії застосовується метод аналізу різницевих зображень (DIA), після чого інструментальна фотометрія калібрується в стандартну систему з точністю нульової точки порядку 0,02 маг, що забезпечує високу якість отриманих результатів [15].

3. ПРОГРАМИ ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

3.1. Binary Maker 3

Binary Maker 3 (BM3) є програмним інструментом, призначеним для моделювання та аналізу затемнених подвійних зір, що робить його дуже корисним як для дослідників, так і для студентів-астрономів. Програма забезпечує інтегроване візуальне та числове представлення подвійні систем, дозволяючи користувачеві вводити навчальні параметри (такі як кут нахилу орбітальної площини, радіуси зір і їхні температури) через головне вікно введення. Ці параметри можуть бути задані вручну або завантажені з підготовлених файлів, що забезпечує швидке перемикання між спостережними даними та теоретичними моделями.

Одночасно з модулем введення, вікно «Binary» надає тривимірне зображення бінарної системи, у якому зорі демонструють динамічний орбітальний рух навколо спільного центру мас, позначеного червоним прицілом. Таке представлення дозволяє спостерігати не лише орбітальну динаміку, але й деформацію зір, зумовлену гравітаційними та відцентровими силами. Ці деформації відображаються у вигляді поверхонь Роша — екіпотенціальних контурів, що характеризують рівноважний розподіл гравітаційного потенціалу, що особливо важливо для розуміння процесів масо-перенесення у напіввідокремлених системах.

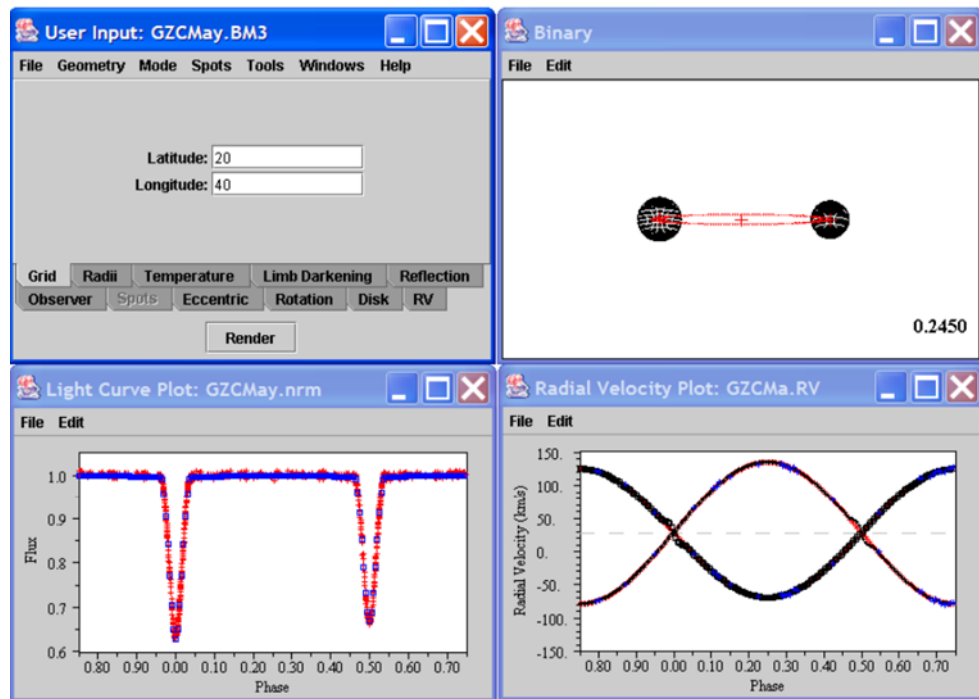


Рис 7. Приклади робочих вікон програми Binary Maker. [16]

Особлива увага в Binary Maker 3 (BM3) приділяється аналізу блиску кривої, що відображається у спеціальному вікні (Рис7 ліворуч знизу). Графік, де по одній осі відкладається потік, а по іншій – орбітальна фаза, демонструє зміну потоку енергії зоряної системи протягом повного орбітального періоду. Такий аналіз дозволяє розрізнити головний та вторинні мінімуми, виявляючи, наприклад, ситуації, коли гарячіше зоря закривається холоднішою, що призводить до різної глибини затемнень.

Можливість оперативній інтерактивної корекції параметрів системи робить програму VM3 потужним інструментом для експериментального дослідження фізики системи.

Крім того, модуль побудови кривих радіальної швидкості (рис. 1, праворуч знизу) надає додатковий вимір динаміки системи, дозволяючи простежити зміну орбітальних швидкостей зір відносно барицентра. Це, своєю чергою, сприяє визначенню співвідношення мас компонентів, що є фундаментальним аспектом у вивченні еволюції бінарних систем.

Таким чином, VM3 поєднує в собі можливості інтерактивного моделювання, візуалізації та аналізу, дозволяючи користувачеві не лише отримувати точні теоретичні моделі світлових кривих і кривих радіальної швидкості, але й глибше розуміти фізичні процеси, що відбуваються у подвійних зоряних системах. Програма демонструє, як незначні зміни у вхідних параметрах можуть суттєво вплинути на спостережні характеристики системи, що робить її важливим інструментом як для проведення наукових досліджень, так і для освітніх цілей у галузі астрономії та астрофізики [17].

3.2. PHOEBE

PHOEBE є сучасним програмним пакетом для моделювання та розв'язання задач фотометрії затемнених подвійних зір, створений як розширення і надбудова над класичним кодом Вілсона–Девінні (WD). PHOEBE успадковує перевірені часом алгоритми розрахунку кривих блиску, реалізовані у кодї WD (який з'явився ще 1971 року), але доповнює їх новими можливостями та вдосконаленнями. Пакет розповсюджується з відкритим вихідним кодом під ліцензією GNU GPL, тому активно підтримується й розвивається науковою спільнотою. Відкритість коду

дозволяє астрономам вільно модифікувати й адаптувати програму під власні задачі, що є великою перевагою над закритими комерційними продуктами.

PHOEBE підтримує одночасний аналіз кількох фотометричних кривих блиску (у різних фільтрах) та кривих променевих швидкостей. Більше того, реалізована підтримка спектральної інформації – можна використовувати табличні спектри (атлас модельних спектрів з бібліотек планківських кривих або спектрів моделей атмосфер) для більш точного обчислення вузько-смугових величин і кольорів. Це означає, що PHOEBE здатний врахувати реальний розподіл енергії випромінювання зір, а не лише ідеалізоване випромінювання чорного тіла при заданих температурах. Зокрема, врахування колірних індексів та синтетичних спектрів дозволяє зменшити виродженість рішення – наприклад, розрізнити вплив температури і радіусу на світність компонента, що складно зробити за односмуговою кривою блиску. Такі вдосконалення усувають типові систематичні похибки у визначенні ефективних температур, радіусів тощо.

На відміну від Binary Maker 3, пакет PHOEBE має вбудовані алгоритми автоматичного пошуку оптимальних параметрів. Він реалізує класичний метод диференціальних поправок (розрахунок матриці часткових похідних χ^2 по параметрах і поступове коригування параметрів для зменшення розбіжності), у варіанті алгоритму Левенберга–Марквардта. Також присутній альтернативний алгоритм оптимізації – симплекс Нелдера–Міда. Ці методи дозволяють автоматично підігнати модель до даних, мінімізуючи різницю між теоретичними і спостережними кривими. У новіших версіях PHOEBE (починаючи з PHOEBE 2) додатково інтегровані сучасні підходи глобальної оптимізації – такі як генетичні алгоритми та марковські ланцюги Монте-Карло (MCMC) для оцінки розподілу ймовірностей параметрів. Це особливо важливо, щоб уникнути потрапляння в локальні мінімуми і правильно оцінити похибки параметрів, враховуючи можливу кореляцію між ними.

РНОЕВЕ, як і ВМЗ, моделює геометрію системи на основі рівнянь рівноваги в полі тяжіння (потенціали Роша). Однак архітектура РНОЕВЕ побудована багаторівнево. На нижньому рівні знаходиться обчислювальне ядро – модифікований код WD, який виконує чисельний розрахунок світності в заданих фазах, враховуючи геометрію і атмосферні моделі. На середньому рівні реалізовані надбудови: модулі для оцінки точності рішення, накладання додаткових фізичних обмежень (наприклад, відповідність колірної температури спектральному класу), застосування методів оптимізації. Нарешті, верхній рівень – це користувацький інтерфейс. Історично РНОЕВЕ 1 мав графічний інтерфейс на Java, де користувач задавав параметри через вікна і діалоги. Сучасна версія РНОЕВЕ 2 надає інтерфейс у вигляді Python-бібліотеки з командним керуванням або через ноутбуки Jupyter, що забезпечує велику гнучкість: можна будувати свої скрипти аналізу, автоматизувати завдання типового розрахунку, інтегрувати РНОЕВЕ з іншими науковими бібліотеками Python. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям відкритої науки і відтворюваності результатів.

РНОЕВЕ враховує повний набір фізичних ефектів:

- затемнення,
- відбиття,
- лімбове та гравітаційне потемніння,
- зоряні плями,
- припливні деформації,
- орбітальний ексцентриситет,
- асинхронне обертання,
- наявність третіх тіл.

Окрім цього, РНОЕВЕ може виконувати статистичну оцінку похибок знайдених параметрів. На основі розподілу значень χ^2 та застосування ймовірнісних підходів програма здатна побудувати довірчі інтервали для кожного параметра, а також визначити ступінь взаємної кореляції між ними.

Це є ключовою відмінністю від інструментів на кшталт VMЗ, які такої функціональності не мають. Похибки оцінюються не лише через простий підбір параметрів, а з урахуванням статистичних коливань у реальних спостереженнях.

Серед важливих можливостей також варто відзначити підтримку багато-смугових спостережень. У випадку, коли крива блиску доступна в кількох фотометричних смугах (наприклад, V та I), РНОЕВЕ дозволяє виконати узгоджене моделювання, яке враховує спектральну залежність яскравості та розширює інформацію для уточнення температур, співвідношення радіусів тощо. Таким чином, програма забезпечує точніші результати, зменшуючи виродженність розв'язку.

РНОЕВЕ використовується в наукових публікаціях для моделювання як простих, так і складних систем. Наприклад, вона дозволяє врахувати розсіяне світло, випромінювання акреційного диска або взаємодію в потрійних системах. Її застосовують як для індивідуального аналізу об'єктів, так і для масової обробки каталогів (у супроводі автоматизованих скриптів) [18].

4. ФІЗИЧНІ ПАРАМЕТРИ КОМПОНЕНТІВ 4-Х ЗАТЕМНЮВАНИХ СИСТЕМ

4.1. OGLE-LMC-ECL-37994

Система OGLE-LMC-ECL-37994 (далі ECL-37994) була відібрана для аналізу як представник майже-контактних подвійних систем із відносно коротким орбітальним періодом. За даними фотометричних спостережень OGLE у фотометричних смугах V та I, вона має чітко виражені первинне і

вторинне затемнення, що дозволяє провести якісне моделювання кривої блиску. Фазова крива блиску ECL-37994, з періодом та початковою епохою, що вказано в базі даних OGLE, представлена на рис. 8. Одразу видно, що початкова епоха, яка повинна відповідати положенню головного мінімуму, потребує уточнення. На рисунку положення головного мінімуму відповідає фазі 0.67

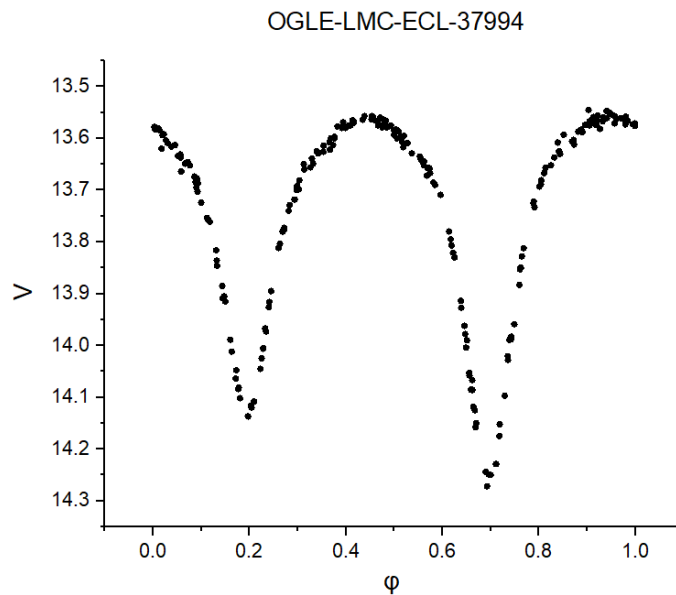


Рис 8. Фазова крива блиску OGLE-LMC-ECL-37994

Основні фотометричні характеристики, за даними OGLE:

- Орбітальний період: $P = 3.0680308$ діб
- Епоха первинного мінімуму: $T_0 = 7002.4308$ (JD = 2457002.4308)
- Середня зоряна величина: $I = 13.726$ mag, $V = 13.560$ mag
- Показник кольору: $V - I = -0.166$ mag
- Амплітуда першого мінімуму: $A_1 = 0.664$ mag
- Амплітуда другого мінімуму: $A_2 = 0.553$ mag

Для подальшої обробки ми уточнили епоху первинного мінімуму, $T_0 = 2456698.68538$

Параметри моделі було підібрано таким чином, щоб досягти відповідності між теоретичною та спостережуваною кривими блиску (рис. 7, нижня панель).

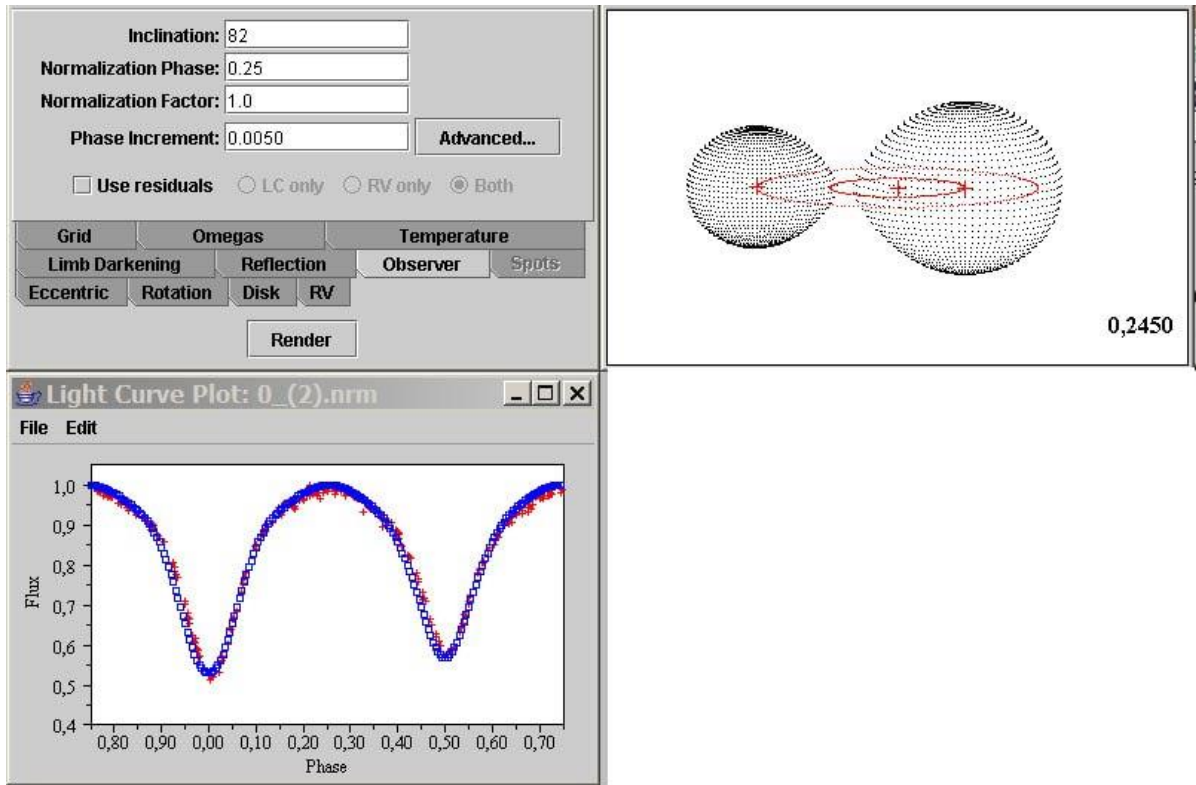


Рис. 9. Результати моделювання ECL-37994 та робочі вікна ВМЗ. Ліворуч: зверху – вікно, в якому задаються параметри системи для моделювання, знизу модельна та спостережна криві блиску у одиницях потоку (сині та червоні символи відповідно). Праворуч: конфігурація змодельованої системи

За результатами моделювання було визначено:

- Співвідношення мас: $q = 2.094$
- Температура компонентів: $T_1 = 5385 \text{ K}$ та $T_2 = 5610 \text{ K}$
- Нахил орбіти: $i = 82^\circ$
- Орбіта: колова ($e = 0$)
- Потенціали Роша: $\Omega_1 = \Omega_2 = 5.421$
- Коефіцієнти гравітаційного потемніння: $g_1 = g_2 = 0.32$
- Коефіцієнти потемнення до лібму: $x_1 = x_2 = 0.69$
- Відбивання: $reflection_1 = reflection_2 = 0.5$

Візуалізація конфігурації системи у ВМЗ підтверджує, що обидві зорі деформовані та майже заповнюють свої порожнини Роша, що дозволяє класифікувати систему як навколо-контактну. Додатково, гарячіша зоря має меншу масу та розмір, що свідчить, що перший обмін речовиною у системі.

4.2. OGLE-LMC-ECL-06782

Система OGLE-LMC-ECL-06782 (далі – ECL-06782) була відібрана для аналізу як приклад розділеної подвійної системи з чітко вираженою геометрією і слабким гравітаційним впливом між компонентами. Згідно з фотометричних даних OGLE у фільтрах V та I, система демонструє два глибокі, майже симетричні мінімуми з досить рівною позатемнювальною ділянкою кривої блиску, що вказує на відсутність суттєвої еліпсоїдальності або припливної деформації. Фазова крива блиску наведена на рис. 10. На рисунку положення головного мінімуму відповідає фазі 0.00.

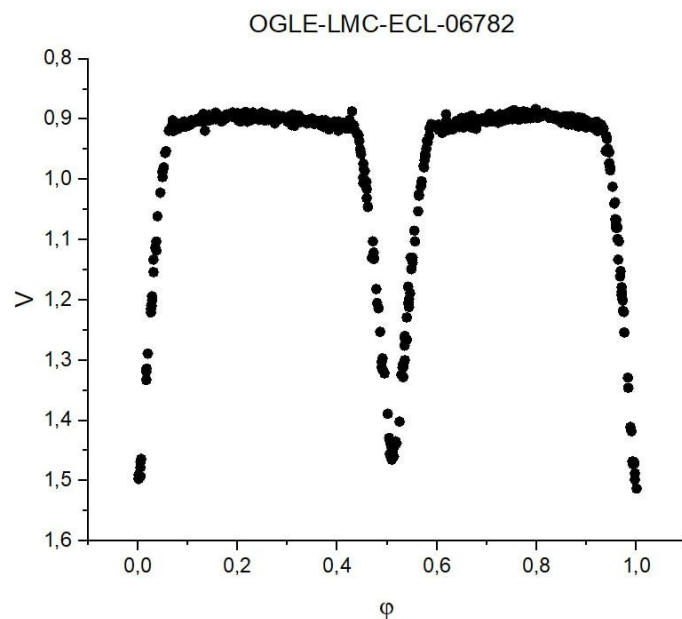


Рис 10. Фазова крива блиску OGLE-LMC-ECL-06782. Мінімальна різниця між глибинами мінімумів вказує на схожі температури компонентів.

Відсутність явного асиметричного зсуву у фазі дає змогу припустити що система має колову орбіту.

Основні фотометричні характеристики, за даними OGLE:

- Орбітальний період: $P = 4.2707766$ діб
- Епоха первинного мінімуму: $T_0 = 7003.0277$ (JD = 2457003.0277)
- Середня зоряна величина: $I = 13.892$ mag, $V = 13.698$ mag
- Показник кольору: $V - I = -0.194$ mag
- Амплітуда першого мінімуму: $A_1 = 0.603$ mag
- Амплітуда другого мінімуму: $A_2 = 0.544$ mag

Для подальшої обробки ми уточнили епоху первинного мінімуму,
 $T_0 = 2455546.69255$

За результатами моделювання було визначено:

- Співвідношення мас: $q = 0.86$
- Температура компонентів: $T_1 = 6383$ K та $T_2 = 5930$ K
- Нахил орбіти: $i = 88^\circ$
- Орбіта: колова ($e = 0$)
- Потенціали Роша: $\Omega_1 = 6.783670$, $\Omega_2 = 7.834161$
- Коефіцієнти гравітаційного потемніння: $g_1 = g_2 = 0.32$
- Коефіцієнти потемнення до лібму: $x_1 = x_2 = 0.57$
- Відбивання: $reflection_1 = reflection_2 = 0.5$

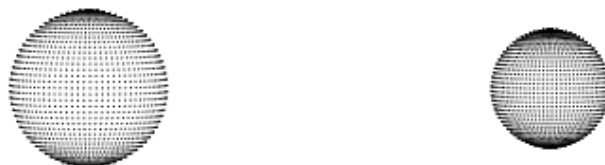


Рис. 11. Модель системи OGLE-LMC-ECL-06782 у ВМ3.

Конфігурація системи у ВМЗ (рис. 11) підтверджує, що обидва компоненти мають сферичну форму і не досягають критичних поверхонь Роша. Це дає змогу підтвердити класифікацію системи як розділеної, у якій еволюція зір відбувається незалежно. Температурна різниця є відносно малою, що корелює з близькими глибинами затемнень.

4.3. OGLE-LMC-ECL-19942

Система OGLE-LMC-ECL-19942 (далі – ECL-19942). Її крива блиску має характерні широкі, дещо асиметричні мінімуми та виражену зміну яскравості впродовж усього орбітального періоду, що дуже чітко вказує на значну взаємодію між компонентами. Також певну увагу привертає нерівномірність позатемнювальних ділянок кривої блиску, яка, ймовірно, пов'язана із наявністю зоряних плям або активних ділянок на поверхні. Фотометричні дані OGLE дозволили побудувати фазову криву блиску, подану на рис. 12. На рисунку положення головного мінімуму відповідає фазі 0.00.

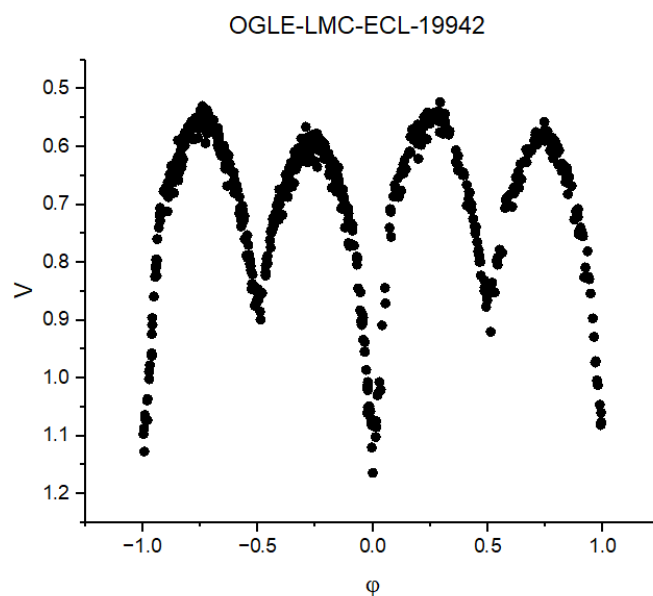


Рис 12. Фазова крива блиску OGLE-LMC-ECL-19942

Основні фотометричні характеристики, за даними OGLE:

- Орбітальний період: $P = 4.8175251$ діб
- Епоха первинного мінімуму: $T_0 = 7000.7708$ (JD = 2457000.7708)
- Середня зоряна величина: $I = 13.554$ mag, $V = 13.499$ mag
- Показник кольору: $V - I = -0.0550003$ mag
- Амплітуда першого мінімуму: $A_1 = 0.539$ mag
- Амплітуда другого мінімуму: $A_2 = 0.313$ mag

Для подальшої обробки ми уточнили епоху первинного мінімуму,
 $T_0 = 2455945.72463$

За результатами моделювання було визначено:

- Співвідношення мас: $q = 0.3885$
- Температура компонентів: $T_1 = 6500\text{K}$ та $T_2 = 5922\text{K}$
- Нахил орбіти: $i = 68.5^\circ$
- Орбіта: колова ($e = 0$)
- Потенціали Роша: $\Omega_1 = 2.6545$, $\Omega_2 = 2.6604$
- Коефіцієнти гравітаційного потемніння: $g_1 = g_2 = 0.32$
- Коефіцієнти потемнення до лібму: $x_1 = 0.527$, $x_2 = 0.573$
- Відбивання: $reflection_1 = reflection_2 = 0.5$

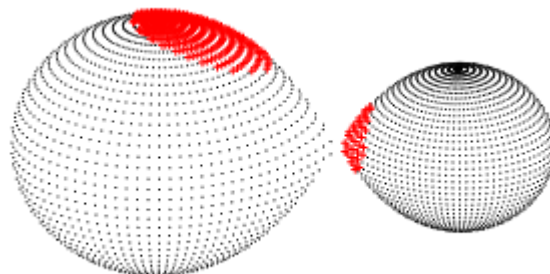


Рис. 13. Модель системи OGLE-LMC-ECL-19942 у ВМЗ

Згідно з візуалізацією у ВМЗ, обидва компоненти заповнюють свої порожнини Роша, утворюючи спільну оболонку. Така конфігурація характерна для контактної системи, в якій відбувається активний обмін енергією та речовиною. Помітна різниця в температурах і масах компонентів може свідчити про асиметричну еволюцію та можливу фазу переносу маси в минулому.

Обидві зорі мають плями, на що вказують різні рівні максимумів. Менша холодніша зоря має гарячу пляму, яскравість якої перевищує звичайний рівень впливу більшого компонента. Пляма на полюсі більшого компонента, ймовірно за все, пов'язана з аномалією хімічного складу, що потребує подальшого вивчення.

4.4. OGLE-LMC-ECL-05725

Система OGLE-LMC-ECL-05725 (далі – ECL-05725) була включена до аналізу як приклад розділеної подвійної системи з майже однаковими компонентами. Її фотометричні характеристики вказують на чітко виражену симетрію кривої блиску з близькими амплітудами обох мінімумів, що свідчить про схожі світності зір. Побудована крива блиску (рис. 14) демонструє глибокі й різкі затемнення, що вказує на високий кут нахилу орбіти та повні затемнення.

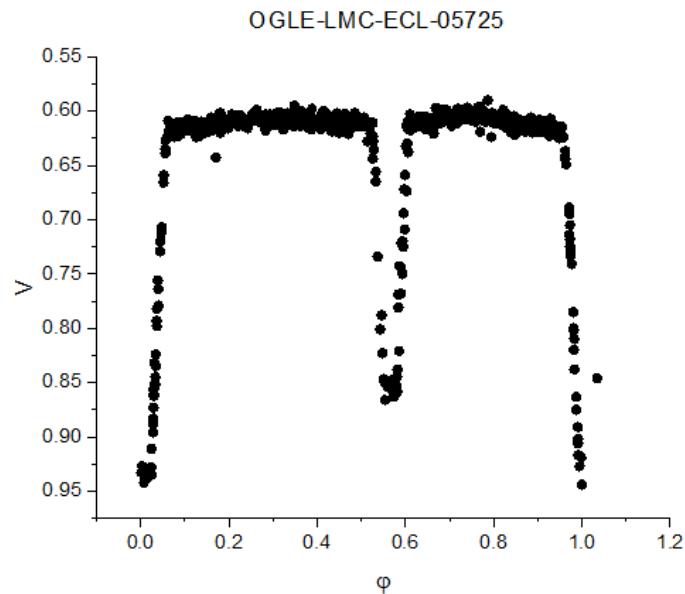


Рис 14. Фазова крива блиску OGLE-LMC-ECL-05725. Форма кривої блиску вказує на високий ступінь симетрії та майже однакові геометричні й температурні характеристики компонентів

Основні фотометричні характеристики, за даними OGLE:

- Орбітальний період: $P = 5.2558607$ діб
- Епоха первинного мінімуму: $T_0 = 7000.6052$ (JD = 2457000.6052)
- Середня зоряна величина: $I = 15.109$ mag, $V = 14.942$ mag
- Показник кольору: $V - I = -0.167$ mag
- Амплітуда першого мінімуму: $A_1 = 0.333$ mag
- Амплітуда другого мінімуму: $A_2 = 0.255$ mag

Для подальшої обробки ми уточнили епоху первинного мінімуму, $T_0 = 2456595.85963$.

За результатами моделювання було визначено:

- Співвідношення мас: $q = 0.97$
- Температура компонентів: $T_1 = 5784$ K та $T_2 = 5639$ K
- Нахил орбіти: $i = 87.9^\circ$
- Орбіта: колова ($e = 0$)
- Потенціали Роша: $\Omega_1 = 4.843619$, $\Omega_2 = 4.758115$

- Коефіцієнти гравітаційного потемніння: $g_1 = g_2 = 0.32$
- Коефіцієнти потемнення до лібму: $x_1 = 0.604, x_2 = 0.604$
- Відбивання: $reflection_1 = reflection_2 = 0.5$



Рис. 15. Модель системи OGLE-LMC-ECL-05725 у ВМ3

Візуалізація системи у середовищі Binary Maker 3 (рис. 15) демонструє, що обидві зорі мають сферичну форму та не заповнюють власні порожнини Роша. Відсутність контактної оболонки й ознак суттєвої деформації поверхонь дозволяє класифікувати систему як розділену.

ВИСНОВКИ

На підставі аналізу кривих блиску встановлено:

1. Система OGLE-LMC-ECL-37994 є навколоконтактною, та такою, що вже пройшла стадію першого обміну речовиною.
2. Системи OGLE-LMC-ECL-06782 та OGLE-LMC-ECL-05725 є розділеними.
3. Система OGLE-LMC-ECL-19942 є контактною, на поверхнях обох зір є плями, причому пляма на поверхні другого компонента є гарячою (температура плями більша за обумовленої ефектом розігріву).

4. Початкові епохі головного мінімуму, що вказані в базі даних OGLE, потребують уточнення.

5. Великий обсяг даних OGLE, що є у вільному доступі, дозволяє, навіть в умовах обмеженого доступу до бази спостережень, отримувати результати, що вдосконалюють наші знання з фізики затемнюваних зір.

_____ Бабенко О.А.
(Підпис автора роботи)

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. An Introduction to Modern Astrophysics / Carroll B., Ostlie D. – Addison-Wesley, 2017. – 1359 с.
2. CALEB [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://caleb.eastern.edu>
3. KP Aql – CALEB Star Summary [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://caleb.eastern.edu/star_summary.php?star_id=42
4. Ad Her – CALEB Star Summary [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://caleb.eastern.edu/star_summary.php?star_id=41
5. AE Phe – CALEB Star Summary [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://caleb.eastern.edu/star_summary.php?star_id=39
6. V1010 Oph – CALEB Star Summary [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://caleb.eastern.edu/star_summary.php?star_id=40
7. An Introduction to Close Binary Stars / Hilditch R. – Cambridge University Press, 2001. – 381 с.
8. Evolutionary Processes in Binary and Multiple Stars / Eggleton P. P. – Cambridge University Press, 2006. – 322 с.
9. GAIA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/> та <https://gea.esac.esa.int/archive/>.
10. NASA. Kepler and K2 Missions [Електронний ресурс] // NASA – 2024. – Режим доступу: https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/main/index.html
11. Prša A., Batalha N., Slawson R. W. et al. Kepler Eclipsing Binary Catalog // The Astronomical Journal. – 2011. – Vol. 141(3). – Article ID: 83, с 1-16. doi:10.1088/0004-6256/141/3/83.
12. Lightkurve Collaboration. Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://github.com/lightkurve/lightkurve>

13. Slawson R. W., Prša A., Welsh W. F. et al. Kepler Eclipsing Binary Stars Catalog // The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2011. – Vol. 142(1). – P. 160.
14. Vision and Mission / AAVSO [Электронный ресурс]. – доступ: <https://www.aavso.org/visionmission>
15. The OGLE Collection of Variable Stars. Over 450 000 Eclipsing and Ellipsoidal Binary Systems Toward the Galactic Bulge / Soszyński I., Pawlak M., Pietrukowicz P. et al. // Acta Astronomica, Vol. 66, 2016, с. 405–420. – [Электронный ресурс]. – доступ: <https://arxiv.org/pdf/1701.03105>
16. Fundamentals of Solving Eclipsing Binary Light Curves Using Binary Maker 3 / Bradstreet D. H. // Proceedings of the 24th Annual Symposium on Telescope Science, 2005, с. 23–36.
17. Binary Maker 3 User Manual / David H. Bradstreet [Электронный ресурс]. – доступ: https://daniel.eastern.edu/faculty_personal/dbradstr/Sample_BM3_Lab.pdf
18. PHOEBE Scientific Reference [Электронный ресурс]. доступ: https://stach.oa.uj.edu.pl/Pracownia-zima2021/W-D/Prsa-Phoebe_Scientific_Reference.pdf