

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

**КОЛЕСНИКОВ СЕРГІЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

УДК 520.85+524.387  
+524.31.084+523.4  
+523.44+523.64

**ОСОБЛИВОСТІ ПОЛЯРИЗОВАНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ  
НЕБЕСНИХ ТІЛ РІЗНОЇ ПРИРОДИ**

01.03.02 — астрофізика, радіоастрономія

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук**

Київ – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.  
Робота виконана в Одеському національному університеті імені І. І. Мечникова  
Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор фізико-математичних наук, професор  
**Андронов Іван Леонідович**, Одеський національний  
морський університет МОН України, завідувач  
кафедри математики, фізики та астрономії.

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Корсун Павло Павлович**, Головна астрономічна обсерваторія  
НАН України, завідувач лабораторії  
фізики малих тіл Сонячної системи;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Еглітіс Ілмарс Емільович**, Астрономічний інститут Латвійського  
університету, заступник директора;  
Астрофізична обсерваторія Балдоне, керівник;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник  
**Лозицький Всеволод Григорович**, Астрономічна обсерваторія Київського  
національного університету імені Тараса Шевченка МОН України,  
провідний науковий співробітник відділу астрофізики.

Захист відбудеться « 14 » грудня 2021 року о « 10 » годині на засіданні  
спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії  
НАН України за адресою:  
03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, Головна астрономічна  
обсерваторія НАН України.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Головної  
астрономічної обсерваторії НАН України за адресою:  
03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, Головна астрономічна  
обсерваторія НАН України  
та на веб-сторінці спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01 за адресою:  
<https://www.mao.kiev.ua/index.php/ua/rady/specrada>

Автореферат розісланий « 08 » листопада 2021 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої вченої ради  
Д 26.208.01,  
кандидат фізико-математичних наук

І. Е. Васильєва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Поляриметрія як метод дослідження зір використовується з середини ХХ століття. Інформація, що отримана з її допомогою, часто не тільки не доступна при інших методах дослідження, але є вирішальною для досить великого кола астрономічних задач. Дисертаційна робота присвячена результатам дослідження кругової і лінійної поляризації різних астрономічних об'єктів, а також приладам і методам, за допомогою яких ці результати отримані.

На даний час автор дисертації має позитивний і більш ніж 25-річний досвід вимірювання кругової поляризації різних астрономічних об'єктів.

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Явище поляризації випромінювання було відкрито у 1669 році під час дослідження подвійного променезаломлення у ісландському шпаті, але увійшло в зоряну астрофізику тільки після публікації роботи Чандрасекара [71] щодо ефекту розподілу ступеня лінійної поляризації по диску гарячої зорі. Поляризація – це міра асиметрії падаючого променя. Тільки поляриметрія оперує векторними величинами і завдяки цьому дає інформацію, яку неможливо отримати іншим способом. Іншою особливістю є те, що поляризація – це статистична величина. Тобто її визначають не як характеристику кожного окремого кванта, а як функцію від кількості квантів з різними певними характеристиками, зареєстрованими за певний інтервал часу. З цього зрозуміло, що результативність поляриметрії залежить від прогресу телескопів та приймачів випромінювання і також – методів вимірювання та методик обробки результатів.

Поляризація випромінювання виявлена (спостерігається): у випромінюванні сонячної корони, верхньої хромосфери і перехідної області Сонця; у сонячному світлі, відбитому від планет, їх атмосфер і малих тіл Сонячної системи; власна лінійна і кругова поляризація у окремих зір і туманностей; міжзоряна; у позагалактичних об'єктів (галактик та їх скупчень, квазарів і ін.).

Обговорюючи джерела поляризації, треба зауважити, що теплове випромінювання, якщо воно генерується хаотично розподіленими атомами і електронами, є завжди неполяризованим. Циклотронне випромінювання генерується системою електронів, що обертаються в магнітному полі, та має кругову поляризацію. Синхротронне випромінювання одного релятивістського електрона має еліптичну поляризацію, але система таких електронів дає лінійно поляризоване випромінювання (праві й ліві еліптичні поляризації компенсують одна одну). У магнітному полі енергетичні рівні атома розщеплюються на різні підрівні (ефект Зеемана і ефекти Пашена – Бака, Коттона – Мутона, Фойгта). Оскільки коливання електронів у магнітному полі орієнтовані, компоненти спектральних ліній поляризовані лінійно, циркулярно або еліптично, в залежності від кута між полем і променем зору. Через малу величину розщеплення, зазвичай спостерігаються різні знаки поляризації в крилах спектральних ліній. Електричні поля можуть створювати аналогічну поляризацію лінії (ефект Штарка). Магнітні поля також змінюють, деполяризують поляризацію лінії через розсіювання (ефект Ханле). Поляризація лінії також може бути створена, коли світло поглинається в плазмі, в якій атоми вирівняні оптичним накачуванням або орієнтовані магнітним полем. Тобто, стан поляризації змінюється і при поширенні випромінювання.

Один з основних механізмів зміни (або – виникнення) поляризації випромінювання – розсіювання на електронах, атомах, молекулах, порошинках – був причиною ефекту, виведеного спочатку Соболевим у 1943 р. і не опублікованого по ряду причин, а потім, у 1946 р., повторно виведеного і опублікованого Чандрасекаром [71]: розподіл ступеня лінійної поляризації по диску гарячої зорі. Оскільки в припущенні електронної атмосфери така поляризація на лімбі зорі становить дуже велику величину,  $\sim 12\%$ , ця публікація була великим стимулом для розвитку спостережної астрополяриметрії.

Зараз ми бачимо дуже великий прогрес у створенні і застосуванні різних поляриметричних приладів [72] і методів аналізу [73], але в першу чергу в тих задачах, або на тих телескопах, де реєструються чисельно великі потоки випромінювання, наприклад для діагностики магнітних полів Сонця. У дослідженні зір приладна частина зазвичай скромніша, оскільки можливі результати обмежені, в першу чергу, статистикою накопичених імпульсів. Але також існують випробувані роками принципові схеми, що змінюються відповідно апаратурним можливостям, а для конкретних приладів обираються відповідно фінансовим можливостям і погодним умовам конкретної обсерваторії.

Безпосереднє вимірювання кругової поляризації досі неможливе: на практиці вона визначається як функція від результатів вимірювання двох лінійних поляризацій. Тому природно, що астрофізична кругова поляриметрія – “це молодша”, ніж лінійна: вона значуще присутня у списку методів астрофізики тільки з 1977 року [74]. Раніше значна кругова поляризація у широких спектральних фільтрах спостерігалася тільки у поодиноких білих карликів (БК). Після відкриття змінної кругової поляризації у подвійної зорі AM Her, вона була знайдена у групі пізніх тісних подвійних систем, де головними компонентами були так само БК, але з напруженістю магнітного поля більш ніж  $10^7$  Гс. І до кінця 20-го століття наявність кругової поляризації пов’язувалася, в першу чергу, зі взаємодією випромінювання з сильним магнітним полем.

**Актуальність теми.** До теперішнього часу результати вимірювання широкосмугової кругової поляризації зір та об’єктів Сонячної системи дуже нечисленні, так само як і прилади, здатні такі вимірювання зробити. Крім отриманих нами, інших тривалих рядів спостережень, а тим більше баз однорідних даних, що містять цей параметр, в літературі не приводиться. Навіть у лінійній астрономічній поляриметрії до теперішнього часу не існує повноцінних поляриметричних каталогів, подібних, наприклад, фотометричним або астрометричним: є тільки “конгломератні”. Але все це необхідно як для розвитку методу дослідження і аналізу отриманих даних, так і для розуміння природи об’єктів, що демонструють кругову поляризацію.

Астрономи України займають лідерські позиції в світі як з досліджень лінійної поляриметрії, так і виготовлення приладів для її вимірювання. Тому важливим є мати пріоритет і в найближчому суміжному напрямку досліджень небесних об’єктів — круговій поляриметрії.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась у НДІ “Астрономічна обсерваторія” Одеського національного університету (ОНУ) імені І. І. Мечникова та під час навчання у докторантурі, на кафедрі теоретичної фізики та астрономії, факультету математики, фізики та

інформаційних технологій ОНУ; а також у НДІ фундаментальних та прикладних досліджень Одеського національного морського університету (ОНМУ). Виконання роботи проводилося в рамках держбюджетних тем:

У НДІ “Астрономічна обсерваторія” ОНУ імені І. І. Мечникова:

- у 2015 – 2017 роках – держбюджетна тема № 526 “Вивчення походження хімічних елементів, структури і еволюції зір, міжзоряного середовища, галактик та великомасштабної структури Всесвіту”, номер державної реєстрації 0115U003200, здобувач брав участь як виконавець;
- у 2017 – 2019 роках – держбюджетна тема № 559 “Визначення фізичних та кінематичних параметрів космічних об’єктів і систем за допомогою фотометрії”, номер державної реєстрації 0117U001113, здобувач брав участь як керівник теми. В НДІ фундаментальних та прикладних досліджень Одеського національного морського університету:
- у 2017 – 2019 роках – держбюджетна тема “Змінність зір на активних стадіях еволюції”, номер державної реєстрації 0117U000620, брав участь як виконавець;
- з 2020 року – держбюджетна тема “Створення та застосування астроінформаційного комплексу алгоритмів та програм аналізу космічних та наземних спостережень нестационарних зоряних систем”, номер державної реєстрації 0120U102369, здобувач брав участь як виконавець.

**Мета і задачі дослідження:** створення більш адекватних уявлень про природу обраних об’єктів і типів об’єктів шляхом порівняння існуючих модельних уявлень з результатами тривалих та однорідних рядів вимірів повних параметрів Стокса.

**Об’єкт дослідження:** випромінювання небесних тіл різної природи: тісних подвійних зоряних систем, одиночних БК, інших зір та обраних об’єктів Сонячної системи: деяких супутників великих планет, астероїдів та комет.

**Предмет дослідження:** кругова і лінійна поляризація та яскравість випромінювання, варіації їх параметрів відповідно до протікання фізичних процесів на небесних об’єктах.

**Завдання дослідження:** отримання та аналіз довгих та однорідних рядів високоякісних спостережних даних щодо повних параметрів Стокса для об’єктів різної природи і розвиток раніше введеного нами [75] в активне використання методу поляриметрії зі швидкою модуляцією.

**Методи дослідження:** метод поляриметрії зі швидкою повною модуляцією, з використанням якого автором дисертації був виготовлений поляриметр, на якому отримані всі спостережні результати дисертації. При обробці спостережень використані періодограмний та автокореляційний аналіз, сплеск-аналіз, шкалограмний аналіз і аналіз фрактальної розмірності, метод головних компонент, вейвлет-аналіз, порівняльний аналіз отриманих даних.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

*Для класичного поляра QQ Vul вперше*

- доведено, що, також як і у BY Cam, більшість спалахів відбувається за межами акреційних колон;
- визначено лінійний розмір крапель в акреційному потоці ( $\sim 6 \times 10^8$  см);
- визначено, що ефективна часова затримка між спалахами становить  $\sim 1.8$  хв;

- визначено середній час падіння згустків (25 с) у припущенні, що швидка змінність виникає у результаті акреції;
- визначено відсутність квазіперіодичних осциляцій та доведено наявність “дробового шуму”;

*Для асинхронного поляра ВУ Sat вперше отримано:*

- ряд залежностей від довжин хвиль, що дозволяють розділяти та аналізувати внесок різних фізичних механізмів у світність системи. Серед них: отримані спостережні підтвердження присутності у світності системи декількох джерел випромінювання – в порядку зменшення температури: “білий карлик + червоний карлик”, “структури акреції, що змінюються з орієнтацією” і “структури акреції, які не змінюються з орієнтацією”;
- ряд залежностей від стану середнього блиску системи. Наприклад, в яскравому стані спостерігається більше одного акреційного регіону з різними фізичними умовами: з більш червоним пов’язується дробовий шум з  $\tau \approx 20$  с, а з більш “гарячою” акреційною плямою – дробовий шум з  $\tau \approx 60$  с;
- ряд загальних залежностей, таких як: неоднорідності структури акреційного потоку мають ті ж самі часові характеристики, що й спалахова активність, тобто остання має природу дробового шуму; оптимальна математична модель для чотирьох головних змін блиску відповідає тригонометричному поліному четвертого порядку.

*Для проміжного поляра V405 Aur:*

- спостережними результатами безальтернативно доведена запропонована нами [48] модель системи V405 Aur, в якій дві акреційні колони мають майже екваторіальне розташування. Її розвиток можливий за одним з двох запропонованих сценаріїв, вибір між якими визначають спостереження.

*Для магнітного БК WD 1748+708 вперше:*

- доведено існування у випромінюванні об’єкта ненульової та змінної кругової поляризації величиною близько 0.5% та регулярної, ймовірно модульованої обертанням, фотометричної змінності на рівні  $m_v = 0^{m.}01$ . Тобто об’єкт має магнітну природу з величиною поверхневого магнітного поля більше 10 МГс.

*Для доказу ефективності методу швидкої модуляції:*

- експериментально доведено високу ефективність методу швидкої повної модуляції при поляриметричних вимірах. Це підтверджують результати, які були отримані при нефотометричних погодних умовах та наведені в спільних зі здобувачем публікаціях:

– на основі поляриметричних досліджень високоальбедних супутників Юпітера Іо, Європи і Ганімеда: те, що фотометричний і поляриметричний опозиційні ефекти спостерігаються одночасно і мають порівняні кутові діапазони, доводить їх пов’язаність з механізмом зворотного когерентного розсіювання. Також значно доповнені криві фазових залежностей поляризації для високоальбедних супутників Юпітера і астероїдів 64 Angelina та 44 Nysa;

– на основі дослідження добре вивченої комети 2P/Encke зроблено висновок, що існування класу комет з поляризацією менше 20% при фазових кутах близько 90° є досить сумнівним. Комети C/2002 T7 (LINEAR), C/2009 P1 (Garradd) класифіковані як пилові, а у комети 8P/Tuttle ступінь лінійної поляризації значно нижчий, ніж у типових пилових комет.

*Методи обробки спостережень та аналізу результатів, запропоновано:*

- метод продовження часу фотометричних і поляриметричних вимірювань на частину сутінків: до поліному, що інтерполює фон, додається доданок з експонентою, що описує зміни яскравості фону під час сутінків;
- метод обробки “збійних” точок з використанням параболічної апроксимації, що дозволяє потім використовувати методи автокореляційного аналізу;
- застосування методу аналізу головних компонентів (Principal Component Analysis, PCA) для визначення статистично значущого числа джерел змінності та їх характеристик.

*Методики вимірювань, прилади для поляриметричних спостережень:*

- разом з М. М. Шаховським, розвинений і реалізований в методику вимірювань метод швидкої повної модуляції для одночасного визначення повних параметрів Стокса з використанням одноканального поляриметра;
- вище вказану методику реалізовано в приладах: у 2002 р. введено в експлуатацію поляриметр з швидким обертанням модулятора для вимірів повних параметрів Стокса у касегренівському фокусі 2.6-м дзеркального телескопа ім. Г. А. Шайна (ДТШ). Під час виконання роботи разом з колегами виготовлено та введено в експлуатацію два прилади POLSHAKH на 2.6-м ДТШ і 2-м телескопі Zeiss обсерваторії Пік Терскол.

**Практичне значення одержаних результатів:** першим результатом цієї роботи, що мав практичну цінність, був доказ придатності для вимірювань кругової поляризації 2.6-м телескопа ім. Г. А. Шайна у схемі Кассегрена. Другим – створення першого працездатного поляриметра для вимірів повних параметрів Стокса для касегренівського фокусу цього телескопа, з використанням частини оптико-механічного блоку від раніше виготовленого автором і М. М. Шаховським приладу.

Практична цінність роботи визначається великою кількістю оригінальних фотометричних і поляриметричних даних об’єктів різних типів.

Визначені параметри тісних подвійних систем, разом з виправленими орбітальними ефемеридами, будуть використані для порівняння з теоретичними моделями акреції в магнітних катаклізмичних змінних. Повне чисельне моделювання цих систем неможливе, оскільки число модельних параметрів (маса БК, швидкість акреції, орієнтація і товщина акреційних колон, розподіл густини, напруженість і конфігурація магнітного поля, нахил орбіти) перевищує кількість залежностей для систем цього типу. Але експериментально визначені чисельні параметри можливо використати як граничні умови, що дозволяють частину задач зробити коректними і їх рішення порівняти з існуючими моделями.

Визначені параметри малих тіл Сонячної системи вже враховані й будуть враховуватися у відповідних теоретичних моделюваннях цих об’єктів.

Безумовну самостійну практичну цінність являють собою два нових прилади (POLSHAKH), що з’явилися в процесі виконання цієї роботи, за принциповою схемою, запропонованою автором дисертації, та вже введені в експлуатацію на 2.6-м ДТШ і 2-м Zeiss телескопі обсерваторії Пік Терскол.

Самостійну практичну цінність має доведення ефективності методу швидкої модуляції при поляриметричних вимірах та експериментальне підтвердження можливості використання астрономічних сутінків і

нефотометричних погодних умов для поляриметричних калібрувань і нефотометричних вимірювань при використанні методу швидкої модуляції. Реалізація цього методу можлива при використанні більш сучасного реєструючого світло обладнання на інших телескопах.

Те ж саме можна сказати і про математичні методи обробки даних і аналізу результатів, розроблених та застосованих у роботі.

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані та використовуються в наукових установах України – Головні астрономічній обсерваторії НАНУ, НДІ астрономії Харківського національного університету, астрономічних обсерваторіях Київського та Одеського національних університетів, Одеського національного морського університету, в астрономічних установах інших країн.

Також результати та розроблені методики використовуються у навчальному процесі, для підготовки фахівців з астрофізики та при підготовці кваліфікаційних робіт.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій.** *Достовірність основних результатів* роботи забезпечена повнотою та високою якістю, великим об'ємом і однорідністю спостережного матеріалу, коректністю використаних припущень, ретельним вибором методів обробки та аналізу, використанням визнаних статистичних критеріїв. *Достовірність вимірювань* забезпечувалася як відповідними лабораторними експериментами (тобто вимірами різних форм поляризованого світла в умовах лабораторії), так і вимірами стандартних зір безпосередньо на телескопі. *Достовірність обробки* спостережного матеріалу забезпечена як його однорідністю, так і використанням класичних та розроблених на їх основі сучасних методів статистичного аналізу. *Достовірність висновків* підтверджується збігом з результатами, що отримані пізніше як іншими авторами, так і здобувачем при подальших дослідженнях.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати дисертації викладено в 47 роботах [1 – 47]. Статті [26, 27] написані автором одноосібно. У [4] автором написані два з п'яти розділів тексту, а п'ятий – разом зі співавторами, у [11] автору належить постановка задачі та остання частина тексту, у [23] – постановка задачі та дві з трьох частин тексту, в роботі [8] – частина тексту щодо застосування методу РСА до проміжного поляра V405 Aur. В роботах [6, 33] автор дисертації брав участь у постановці дослідження та обговоренні отриманих результатів. В роботах [24, 25, 46] брав участь у постановці задач, виконував підготовку обладнання, поляриметричні спостереження та їх обробку, отримав результати, що виявились критично важливими для цього дослідження, брав участь в обговоренні остаточних результатів і написанні текстів статей. В роботах [2, 5, 30, 32] дисертанту належить постановка задачі та конкретних завдань для розрахунків, що були проведені за отриманими їм спостереженнями, брав участь у обговоренні отриманих результатів та їх фізичній інтерпретації, написання частин текстів статей: у першій – третя частина в тексті, у другій – частини 2 та 3.1, в третій – перша частина тексту, в останній – перша частина тексту і два рисунки. В роботах [3, 12, 18, 43] дисертант брав участь у постановці



дослідження, проводив частину спостережень та їх обробку, брав участь у фізичній інтерпретації всіх отриманих результатів кооперативних досліджень, обговоренні отриманих результатів, написанні частин текстів: 2, 6, 2 і 1 таблиця, 1 відповідно. Роботи [9, 10, 13, 14, 16, 17, 34 – 42] виконані з використанням результатів спостережень, отриманих на ДТШ, в яких автор дисертації брав безпосередню участь у вимірюваннях, що отримані на виготовленому їм приладі. Крім цього, дисертант виконував контроль впливу апаратурних перешкод на результати вимірювань та отримані висновки, а також визначав параметри кругової поляризації та їх похибки для всіх об'єктів вимірювань. Крім результатів вимірювань ДТШ, у цих роботах використані результати одного-двох телескопів меншого діаметра – найчастіше з 1.25-метрового АДТ-11. Але параметри кругової поляризації в широких спектральних смугах визначалися тільки на телескопі ДТШ, інші дослідники не мали можливості їх отримувати, дивись розділ 2. Таким самим є внесок здобувача і в роботах [19 – 22], в яких автору дисертації також належить частини текстів про визначення похибок вимірювань. Роботи [1, 7, 15, 28, 29, 31, 45, 47] є оглядовими, які охоплюють різні задачі, вирішені автором дисертації спільно зі співавторами: в них автору дисертації належать частини текстів з результатами, отриманими за його спостереженнями.

Автору дисертації належить ідея відновлення поляриметричних вимірювань у касегренівському фокусі ДШТ і створення необхідних для цього приладів. До початку даної роботи, у 1991 р., автором спільно з М. М. Шаховським був створений поляриметр кругової поляризації з аналізатором, що швидко обертається. З використанням частини від оптико-механічного блоку цього приладу автором дисертації в 2002 році був створений і введений в експлуатацію новий прилад – поляриметр повних параметрів Стокса з аналізатором, що швидко обертається. При цьому значну частину робіт автор виконав особисто, або самостійно, залучаючи необхідних для того фахівців.

Експериментальні результати дисертації базуються на спостереженнях, виконаних автором дисертації на вказаному приладі упродовж 15 років на 2.6-м ДТШ. Вони охоплюють 1112 рядів вимірювань різних небесних об'єктів. З них 26 рядів отримані в режимі вимірювання фотометрії та лінійної поляриметрії, всі інші – в режимі вимірювання фотометрії та лінійної і кругової поляриметрії. Із цих 1112 рядів: близько 50% – поляризаційні стандарти, 25% – тісні подвійні системи (ТПС) з різною напруженістю магнітного поля, тобто поляри (класичні, проміжні, асинхронні) та не магнітні катаклізмичні зорі, ще 25% – об'єкти Сонячної системи (супутники великих планет, астероїди, комети).

**Апробація результатів дисертації.** Всі результати, представлені в дисертації, систематично і багаторазово доповідалися на міжнародних та українських конференціях. У списку публікацій здобувача – 23 тези доповідей та 20 статей у матеріалах конференцій, з останніх 6 індексуються Scopus та WoS, [32, 33, 43, 45, 46, 47].

Перелік конференцій:

- 10th European and 75th Annual Assembly of Astronomische Gesellschaft, (JENAM 2001), Мюнхен, Німеччина, 2001.

- “Interplay of Periodic, Cyclic and Stochastic Variability in Selected Areas of the H-R diagram”, Брюссель, Бельгія, 2002.
- New Deal in European Astronomy: Trends and Perspectives and 12th European Meeting for Astronomy and Astrophysics, Будапешт, Угорщина, 2003.
- 3-я Українська конференція з перспективних космічних досліджень, Кацивелі, Україна, 2003.
- NATO Advanced Study Institute on “Photopolarimetry in Remote Sensing” and Workshop, Ялта, Україна, 2003.
- “Research of artificial and natural NEOs and other Solar System Bodies with CCD ground-based telescopes” Миколаїв, Україна, 2004.
- Всеукраїнський з’їзд “Фізика в Україні” Одеса, Україна, 2005.
- “Solar System Bodies: From Optics to Geology”, Харків, Україна, 2008.
- “Cosmic magnetic fields legacy of A.B. Severny: International Symposium”, Научний, Україна, 2013.
- “Living Together: Planets, Host Stars and Binaries”, Літомишль, Чехія, 2014.
- “International Symposium dedicated to the 70th anniversary of the Byurakan Astrophysical Observatory (BAO)”, Єреван, Вірменія, 2016.
- Open Young Sci. Conf. on Astron. and Space Physics: 19th; 22th Київ, Україна, 2012; 2015.
- “Cataclysmic Variables and Related Objects” Геттінген, Німеччина 2001; Кейптаун, Південно-Африканська Республіка 2002; Страсбург, Франція 2004.
- “Asteroids, Comets, Meteors” Балтімор, США, 2008; Ніїгата, Японія, 2012; Гельсінкі, Фінляндія, 2014.
- “Conference on Electromagnetic and Light Scattering” 10th Бодрум, Туреччина 2007; 11th Хартфордшир, Англія 2008; 15th Лейпциг, Німеччина, 2015.
- International Scientific conference Kyiv University, Київ, Україна, 2019; 2020.
- “Gamow International Conference”, Одеса, Україна, 2015; 2018; 2019; 2020.
- Семінари: НДІ “Астрономічна обсерваторія” та кафедри теоретичної фізики і астрономії ОНУ ім. І. І. Мечникова; кафедри математики, фізики та астрономії ОНМУ; загальний астрофізичний семінар ГАО НАНУ.

**Публікації за темою дисертації.** Представлені в дисертаційному дослідженні результати, методи і методики опубліковані в 70 роботах здобувача. Зокрема, 27 статей [1 – 27] надруковано в провідних фахових вітчизняних та зарубіжних журналах, з яких 16 індексуються наукометричними базами Scopus та WoS. Дві статті у виданнях, що індексуються базою Scopus, опубліковані без співавторів. Ще 20 статей [28 – 47] опубліковані в матеріалах міжнародних конференцій, з них 6 надруковано в журналах, які індексуються наукометричними базами Scopus та WoS. 23 публікації [48 – 70], з яких 3 без співавторів, надруковано у збірках тез міжнародних і вітчизняних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, переліку умовних скорочень, семи розділів, в яких описано оригінальні дослідження, висновків та трьох додатків. Списки використаних літературних джерел розміщені після кожного розділу на окремих аркушах і містять 336 найменувань. Дисертація містить 322 сторінки, з них 235 основного тексту, 65 рисунків і 12 таблиць та 3 додатки.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У Вступі** подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, наведено інформацію щодо апробації та публікації результатів досліджень.

**Розділ 1 “Розвиток апаратури і методик поляриметричного методу, як ефективного методу астрофізичних досліджень”** є оглядовим. Крім деяких історичних фактів, в ньому описані основні поняття поляриметрії, а також продуктивні прилади і методи, які були успішно використані до приходу поляриметрії в астрофізику зір, та отримані з їх допомогою спостережні результати. Досвід того часу може істотно допомогти, наприклад, під час розробки нових приладів. Крім того, наведено короткий огляд розвитку Кримської школи поляриметрії до приходу туди автора цієї роботи. Наведені далі висновки цього розділу враховувалися як при виготовленні приладів, так і при організації та проведенні спостережень.

Поляризація випромінювання у астрономічних об’єктів, по-перше, характеризує міру асиметрії як самого об’єкта, так і всього середовища, включаючи вимірювальний пристрій, – це важливо враховувати при вимірах; по-друге, параметри поляризації – це завжди “статистичні величини”, які потрібно визначати спільно; а по-третє, параметри поляризації зазвичай можуть змінюватися і з часом, і з довжиною хвилі. З цього випливає ряд висновків:

- при поляриметричних вимірах часто похибка виявляється “важливіше” самого значення вимірюваних величин, бо дає “верхню межу” значенням параметрів. Це призводить до необхідності використання статистичних методів, які постійно вдосконалюються, та є стимулом до збільшення точності вимірювань;
- краще використовувати симетричні та цілком дзеркальні схеми телескопів з метою зменшення інструментальної поляризації;
- першочерговим завжди є завдання вимірювання “стандартних зір” для визначення параметрів інструментальної поляризації та законів їх зміни;
- для визначення природи джерела поляризації однаково важливі як залежність параметрів поляризації від часу, так й від довжини хвилі.

Матеріали, що увійшли до розділу 1, опубліковані автором дисертації у статті [26], доповідалися та обговорювалися на конференціях [67].

**У розділі 2 “Розвиток методу апертурної поляриметрії в КрАО. Прилади і програмне забезпечення”** описані як прилади Кримської астрофізичної обсерваторії (КрАО), в розвитку і вдосконаленні яких дисертант брав безпосередню участь, так і прилади, створені дисертантом. За допомогою цих пристроїв дисертантом отримані всі спостережні матеріали, використані в цій роботі. Представлені результати критичного аналізу кожного з приладів, які спираються на досвід експлуатації. Це дозволило уникнути ряду їх недоліків при розробці і виготовленні нового обладнання. На прикладі поляриметра з акустооптичним модулятором коротко описані сенс і “технологія” лабораторного тестування. Описані методики і математичні методи, що були запропоновані та

використані здобувачем. Продовження часу фотометричних і поляриметричних вимірювань на частину сутінків досягається за рахунок того, що до поліному, котрий інтерполіює фон, додається доданок з експоненційним членом, який описує зміни яскравості фону під час сутінків. Фон в кожному каналі (лічильнику), відповідно до сенсу методу швидкої модуляції, визначається і враховується окремо, статистично не залежно від інших каналів. При цьому бажано використовувати мінімальний і однаковий ступінь полінома для всіх каналів, з яким досягається задовільний опис поведінки фону по кожному з каналів. Замість значення “збійної” точки використовується результат параболічної апроксимації, що дозволяє подальше використання методів автокореляційного аналізу. Для визначення статистично значущого числа джерел змінності та їх характеристик використано метод аналізу головних компонентів (РСА), що більш детально описано в розділі 4. Також у розділі 2 наведено короткий огляд отриманих експериментальних результатів.

*Визначення ступеня кругової поляризації за спостережуваними значеннями  $CP_1$  і  $CP_2$ .* Параметри  $CP_1$ ,  $CP_2$ , що безпосередньо вимірюються, еквівалентні параметрам Стокса  $q$  і  $u$  для лінійної поляризації. Тобто,  $CP_1$ ,  $CP_2$  – спотворені статистичним шумом проєкції вектора  $P_C$  на осі  $OX$ ,  $OY$ . Для визначення  $P_C$  необхідно визначити таку величину кута  $2\phi_0$  повороту системи координат (тобто поляризатора щодо аналізатора), щоб одна з осей відповідала поляризації, а друга – шуму. Це можна зробити за спостереженнями зорі з великою амплітудою зміни кругової поляризації. А до цього спочатку врахувати поправку за “нуль-пункт” з вимірювання стандартів з нульовою поляризацією, тобто спочатку враховується інструментальна поляризація.

Введемо систему координат  $X$  і  $Y$  таким чином, щоб початок координат збігався із середніми значеннями ( $\langle P_1 \rangle$ ,  $\langle P_2 \rangle$ ), а вісь  $OX$  була розвернена по відношенню до  $P_1$  на кут  $\phi$  (рівний  $2\pi\phi_0$ ). Тоді:

$$\begin{aligned} P_1 &= \langle P_1 \rangle + X \cos \phi - Y \sin \phi & X &= (P_1 - \langle P_1 \rangle) \cos \phi + (P_2 - \langle P_2 \rangle) \sin \phi \\ P_2 &= \langle P_2 \rangle + X \sin \phi + Y \cos \phi & Y &= -(P_1 - \langle P_1 \rangle) \sin \phi + (P_2 - \langle P_2 \rangle) \cos \phi \end{aligned}$$

Обчислимо центральні моменти другого порядку для змінних  $P_1$ ,  $P_2$ :

$$\mu_{ij} = \langle (P_i - \langle P_i \rangle)^2 (P_j - \langle P_j \rangle)^2 \rangle. \text{ Тоді:}$$

$$\langle X^2 \rangle = \mu_{11} \cos^2 \phi + 2\mu_{12} \cos \phi \sin \phi + \mu_{22} \sin^2 \phi = \frac{1}{2}(\mu_{11} + \mu_{22}) + \frac{1}{2}(\mu_{11} - \mu_{22}) \cos 2\phi + \mu_{12} \sin 2\phi,$$

$$\langle XY \rangle = -(\mu_{11} - \mu_{22}) \cos \phi \sin \phi + \mu_{12} (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) = -\frac{1}{2}(\mu_{11} - \mu_{22}) \sin 2\phi + \mu_{12} \cos 2\phi,$$

$$\langle Y^2 \rangle = \mu_{11} \sin^2 \phi - 2\mu_{12} \cos \phi \sin \phi + \mu_{22} \cos^2 \phi = \frac{1}{2}(\mu_{11} + \mu_{22}) - \frac{1}{2}(\mu_{11} - \mu_{22}) \cos 2\phi - \mu_{12} \sin 2\phi.$$

Ці вирази справедливі для будь-якого кута повороту  $\phi$ , однак, при ортогональній регресії обирається такий кут, щоб змішаний момент  $\langle XY \rangle = 0$ . Тоді:

$$\operatorname{tg} 2\phi = \frac{2\mu_{12}}{\mu_{11} - \mu_{22}}, \quad \sin 2\phi = \frac{2\mu_{12}}{\sqrt{(\mu_{11} - \mu_{22})^2 + 4\mu_{12}^2}}, \quad \cos 2\phi = \frac{\mu_{11} - \mu_{22}}{\sqrt{(\mu_{11} - \mu_{22})^2 + 4\mu_{12}^2}},$$

$$\langle X^2 \rangle = \frac{1}{2}(\mu_{11} + \mu_{22}) + \frac{1}{2} \sqrt{(\mu_{11} - \mu_{22})^2 + 4\mu_{12}^2}, \quad \langle Y^2 \rangle = \frac{1}{2}(\mu_{11} + \mu_{22}) - \frac{1}{2} \sqrt{(\mu_{11} - \mu_{22})^2 + 4\mu_{12}^2}.$$

Рівняння  $\operatorname{tg}2\varphi=\lambda$  має 4 різних корені  $\varphi=\frac{1}{2}\arctg\lambda+\frac{k\pi}{2}, k=0,1,2,3$ . Два з цих чотирьох коренів відповідають напрямку великої осі еліпса розсіювання уздовж осі  $OX$  і два – напрямку уздовж осі  $OY$ . Ми обираємо основний напрямок в тій чверті, в якій виконуються співвідношення для  $\sin2\varphi, \cos2\varphi$ . Тоді величини  $X$  та  $Y$  мають (з усіх можливих кутів повороту) відповідно найбільшу і найменшу дисперсії. Звичайна інтерпретація може бути в тому, що величина  $X$  інтерпретується, як змінна характеристика з шумом спостережень, а  $Y$  – “чистий шум”.

З викладеного зрозуміло, що для того щоб так визначати кут  $\varphi$ , а потім і параметр кругової поляризації, необхідні вимірювання джерела з великою змінною круговою поляризацією. Тоді величина кута  $\varphi$  може бути максимально звільнена від похибок. Оскільки поляри часто показують велику амплітуду кругової поляризації, ми використовували цей метод визначення у всіх наших вимірах.

Матеріали, що викладені у розділі 2, були опубліковані у статтях [4, 23, 27] та обговорювалися на міжнародних конференціях Workshop NATO (2003) [49], NATO ASI-2010 [61], KOLOS-2017, “Навколоземна астрономія - 2015” [44], “Astronomy and Space Physics in the Kyiv University” (2019) [66], Gamow 2018 [67], Gamow 2019 [68], Gamow 2020 [69, 70].

### Розділ 3 “Застосування поляриметричних приладів. Поляриметрія зір.”

На початку розділу коротко перелічені різноманітні астрофізичні процеси, що відбуваються в класичних, асинхронних і проміжних полярках. Це обґрунтовує вибір методики вимірювань і нестандартної спектральної смуги 550 – 750 нм (WR), яка об’єднує смуги V і R фотометричної системи Джонсона – Козінса. Там спостерігаються прояви тільки одного фізичного явища, перевипромінювання, і досягається максимум чутливості наявних приймачів випромінювання. Часова роздільна здатність складала 1 с для фотометрично змінних об’єктів або 4 с – для об’єктів, у яких фотометрична змінність не досліджувалася. Апаратне та програмне забезпечення дозволило фіксувати момент часу з точністю не гірше 0.01 с. Оскільки всі фізичні процеси відбувалися з великим характерним часом, ми проводили вимірювання серіями фіксованої довжини. Це дало змогу застосувати автокореляційний метод для аналізу змінності і статистично коректного розрахунку величини похибок, що залежить від довжини ряду.

**Класичний довгоперіодичний поляр QQ Vul: дослідження та результати.** Використавши результати вимірювань, отриманих автором у 1986 – 1988 роках на 0.5-м камері Шмідта Абастуманської обсерваторії і пізніше – в КрАО на телескопах ДТШ і АДТ-11 (астрономічний дзеркальний телескоп, 11 модель, 1.25-м), були отримані нові значення ефемерид для подвійної системи:

$$\text{HJD} = 2\,440\,000.0628 + 0.154520356 \cdot E + 1.56(36) \cdot 10^{-12} \cdot E^2$$

і оцінка збільшення періоду системи із швидкістю  $7.4(17) \cdot 10^{-9}$  днів за рік. Тут і далі в дужках – величина похибки в одиницях останнього десяткового знака.

Дослідивши можливі зміни періоду за всіма наявними в літературі даними – більше ніж за 60 років, виявлено, що залежність фазового зсуву від часу добре представлена лінійною функцією. Тому запропоновано комбіновані

ефемериди:  $HJD = 2\ 448\ 446.47105(48) + 0.15452040(2) \cdot E$ . Ця ефемерида зберігає нульову фазу, яка визначається орбітальним рухом, і використовує значення фотометричного періоду. Початкова епоха для фотометричних мінімумів складає  $HJD\ 2440000.06166 \pm 0.00074^d$ , тому спектроскопічне сполучення відбувається на  $0.0989^p \pm 0.0048^p$  після фотометричних мінімумів. Значення періоду відповідає орбітальному руху і періоду обертання БК, що характерно для класичних полярів.

*Аналіз довготривалої змінності QQ Vul.* Система показує два стани активності: у спокійнішому стані амплітуда фазової кривої була близько  $0.^m5 - 1.^m0$ , а в активному наші спостереження давали амплітуду близько  $1.^m5$ . Виявлено слабку залежність між зоряною величиною у максимумі блиску і амплітудою орбітальної кривої (коефіцієнт кореляції  $r = 0.72$ , а його відношення до похибки  $r/\sigma_r = 3.6$ ). Але амплітуда різко збільшується, коли максимальний блиск системи стає слабшим  $15.^m7$ . Можливо, що у разі більш високої швидкості акреції, потік змінює глибину свого проникнення у магнітне поле БК. У результаті цього змінюється положення акреційного регіону на поверхні БК, і він стає видимим вже під іншим кутом до променя зору.

*Багатокольорова фотометрія і поляриметрія* показує слабкі зміни форми кривої блиску з довжиною хвилі. Найсильніше система червоніє в B–R у вторинному мінімумі, тоді як у головному більше почервоніння в R–I, а у I симетричний в інших фільтрах головний мінімум стає різко асиметричним.

*Квазіперіодичні осциляції, їх сплеск-аналіз* дав максимум розподілу в районі  $0.007 - 0.008$  доби, що узгоджується з періодами нестійкості в точці Лагранжа  $L_1 \sim 10$  хвилин [76], але він є малозначущим. Не виявлено залежності частот квазіперіодичних коливань від блиску і поляризації системи. Фазова крива частот квазіперіодичних змін показала пік тривалості квазіперіодичних коливань після головного мінімуму. Це узгоджується з інтерпретацією, згідно якої, у цей момент часу ми бачимо “зовнішню” сторону акреційної колони [77].

*Спалахова активність:* спалахи відносно рідкі і поодинокі, виділяються за амплітудою відносно фліккерингу з малою амплітудою. Максимуми розподілу амплітуд ( $0.^m22$ ) і тривалостей ( $0.^s0013$ ) близькі до відповідних параметрів для VY Cam. Вивчення крос-кореляцій амплітуди спалахів з круговою поляризацією показало слабку залежність: тільки 8 з 28 спалахів мали коефіцієнт кореляції більше 0.5. З них 3 вказували на те, що зі збільшенням блиску поляризація росте, а 5 – навпаки: тобто більшість спалахів не пов’язана зі зміною поляризації.

Але вивчення крос-кореляцій між кольорами B та R у спалахах показало, що більшість з них або належить червоному карлику (рис. 1), або виникає не в акреційній колоні: плазмові глоби “проникають” та акреціюють за межами колони, тому не змінюють поляризацію, бо мають не циклотронну природу світності. І це відрізняється від класичної моделі.

Уважний розгляд результатів двох доповнюючих один одного методів – вейвлет-аналізу і спектрів потужності, отриманих методом фур’є-аналізу, що описаний Дімінгом [79], – дозволив отримати висновок про відсутність когерентних коливань у варіаціях QQ Vul.

Виявлено [30], що усі спалахи мають приблизно однакову потужність, що можна бачити на рис. 2. Це можна пояснити накопиченням акреціуючої

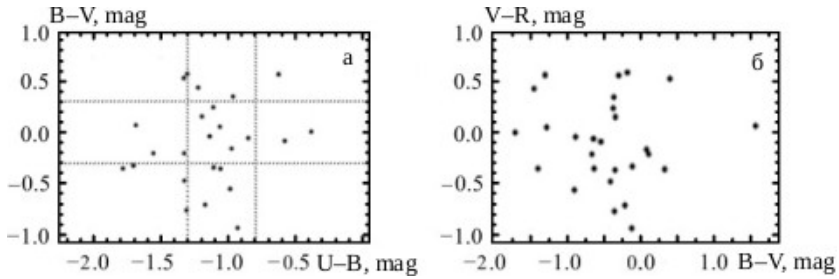


Рис. 1 а, б. Кольори спалахів QQ Vul за спостереженнями на АДТ-11. На рис. “а” відмічена область кольорів, характерна для спалахів UV Cet [78]

речовини в одній з магнітних “ям”, що виникають під впливом тиску потоку. А скидання на поверхню БК відбувається після досягнення критичної маси.

Розрахунок часу когерентності подій на кривій блиску дозволив зробити висновок про те, що в більшості випадків немає подій з часом, що значно перевищує часовий масштаб змінності (див. рис. 3 а і 3 б). Отже, в цьому випадку простий аналіз спектру потужності не є ефективним. Беручи до уваги некогерентний характер виявлених подій, можемо інтерпретувати оцінені часові інтервали як типовий часовий інтервал, тривалістю  $1.79 \pm 0.20$  хв, між двома послідовними помітними спалахами або будь-якими іншими проявами нестабільності, що не перекриваються (рис. 3 а). Такий експоненціальний розподіл очікується, якщо спалахи випадковим чином розподілені у часі.

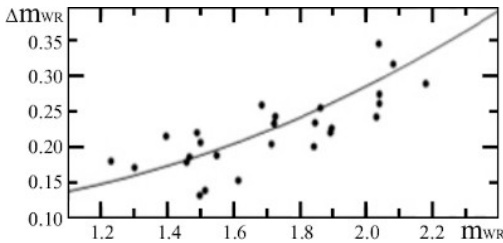


Рис. 2. Залежність амплітуди спалахів від середнього блиску системи. Плавна крива – лінія рівної потужності окремо взятого спалаху для різних значень блиску

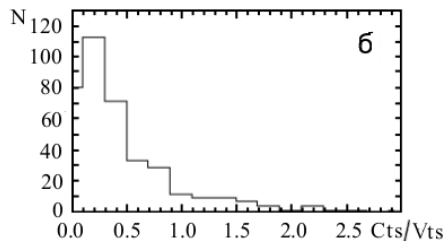
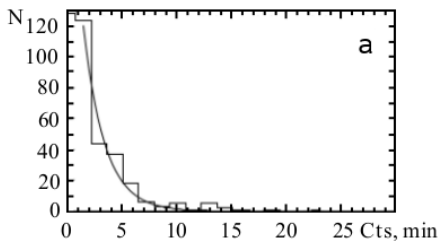


Рис. 3 а. Розподіл шкал часу когерентності фотометричних подій. Cts (coherence time-scale) – час, протягом якого зберігається когерентність. Для квазіперіодичних осциляцій (QPOs) – часовий інтервал, в якому вони спостерігаються. Суцільна лінія показує експоненціальний спад з найкращим значенням  $\tau = 1.79$  хв.

б. Розподіл співвідношення між тривалістю фотометричних подій (Cts, когерентна часова шкала) і Vts (Variability time-scale) – часовим масштабом змінності: період для фотометричних подій у разі QPOs, або довжина циклу

Дробовий шум інтерпретується як результат акреції великих діамантних згустків. Автором виявлено, що швидка змінність QQ Vul добре описується моделлю дробового шуму, тобто результатом суперпозиції спалахів з часовим масштабом близько 25 с (рис. 4). Якщо дробовий шум виникає у результаті акреції згустків на атмосферу БК, то 25 с – це середній час падіння згустків.

Використавши: вирази з [80, 81] та алгоритм з [82], можна визначити тиск у потоці, середню відстань зв'язку, тобто радіус, на якому магнітний тиск (magnetic pressure) починає перевищувати динамічний тиск (ram pressure), і розрахувати найменшу нестійку довжину в залежності від відстані зв'язку. Отримано, що час падіння глоба не залежить від висоти зупинки, а час випромінювання для одиночних крапель визначається тільки початковим розміром і відстанню зв'язку від центра БК. Оскільки, згідно з [83], значення початкових розмірів краплі дуже чутливі до визначення маси БК, то якщо зафіксувати значення відстані точки зв'язку, то зі спостережуваного розподілу  $\tau$  можемо розрахувати лінійні розміри глобів до їх деформації магнітним полем.

Таким чином, при швидкості перетікання  $10^{17}$  г/с і значенні маси БК  $0.54M_{\odot}$  [84] відстань зв'язку становить близько  $5.1 \times 10^9$  см. Використовуючи співвідношення маса–радіус для БК у формі, опублікованій у [85], радіус, відповідний масі  $0.54M_{\odot}$ , дорівнює  $R_{wd} = 7.42 \times 10^8$  см. Таким чином, зв'язок відбувається при  $\sim 7R_{wd}$ . Відповідний розподіл початкових розмірів краплі для QQ Vul має максимум поблизу  $6 \times 10^8$  см, що відповідає утворенню крапель на відстані  $1.2 \times 10^{10}$  см від центра БК.

*Висновки розділу 3:*

- розміри “крапель” у потоці акреції  $\sim 6 \times 10^8$  см  $= 0.8R_{wd}$ ;
- маючи негативний результат при виявленні QPOs (квазіперіодичні осциляції) і маючи добре перевірений апарат автокореляційного аналізу, визначено: QPOs не виявлені, а виявлений “дробовий шум”;
- ефективна часова затримка між сусідніми найбільш помітними одиночними спалахами становить  $\sim 1.8$  хв;
- якщо дробовий шум є результат акреції – середній час падіння згустку є 25 с;
- аналіз кольорів спалахів показав, що більшість спалахів відбуваються за межами акреційної колони;
- побічний результат – більш точно визначення фотометричного періоду системи.

Матеріали, що увійшли до Розділу 3, були опубліковані у статтях [1, 2, 5, 30, 32], та обговорювалися на конференціях [45, 53, 54, 56, 60, 63, 67, 70].

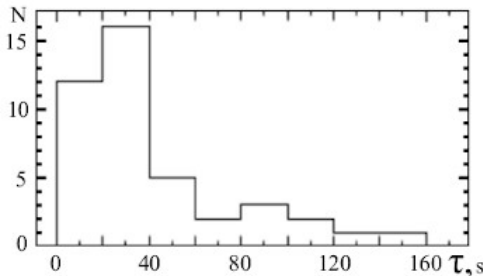


Рис. 4. Розподіл експоненціального часу згасання дробового шуму з максимумом близько 25 с



**Розділ 4 “Дослідження асинхронного поляра ВУ Сам”.** Як показують спостереження, спіновий період обертання БК і орбітальний період розрізняються у асинхронних полярів приблизно на 1%. Як показали наші попередні роботи [86, 87], спіновий період БК у цій системі становить  $199.345 \pm 0.004$  хвилини, орбітальний період складає 197.44 хвилини, і, відповідно, період биття становить 14.52 доби. На різних фазах періоду биття акреція може відбуватися як на один з полюсів, так і на обидва. Існуюча якісна модель системи передбачає два магнітних полюси різних знаків і напруженості у видимій частині поверхні БК [88, 89]. Позитивна поляризація виникає на полюсі з  $\sim 25$  МГц і показує самозатемнення акреційної колони, в той час як негативна поляризація виникає на полюсі з  $\sim 32$  МГц. При цьому реальна фізична модель квадрупольна, і відбувається прецесія осі обертання БК з періодом 100 – 150 діб.

*Швидка змінність блиску і поляриметрія ВУ Сам.* У червоних і синіх довжинах хвиль яскравість системи більша, ніж у смузі V. Амплітуда змінності збільшується зі збільшенням довжини хвилі та може зміщуватися зі смуги I в смугу V при зменшенні середнього блиску системи, та спостерігаються різкі зміни амплітуди на  $0.5^m$ . Залежність частоти квазіперіодичних коливань від зоряної величини показує у слабких станах відсутність коливань з періодами менше 0.005 доби (7.2 хвилини) та присутність їх у більш яскравих станах. Природно пояснити це двома причинами коливань, які проявляються на різних періодах змінності. Але, якщо зміни на більш тривалих проміжках часу “звично” пов’язувати з нестійкістю іонізаційного фронту в точці Лагранжа L1, тоді збільшення блиску системи є збільшенням темпу акреції, що зменшує період осциляцій. Це не погоджується зі зростанням максимальних періодів при збільшенні блиску системи. Альтернатива – можливе пояснення зникання осциляцій іонізаційного фронту у L1 при деякому рівні темпу акреції.

*Індивідуальні сплескограми* показують ефект, названий нами “відлуння”. Він полягає у тому, що поява коливань з певним періодом за проміжок часу близько  $0.007^d$  (10 хвилин), супроводжується плавним її подовженням на  $0.002^d - 0.005^d$  (3 – 7 хвилин), зазвичай зі збільшенням періодик. Аналіз показує, що в цих випадках проміжок часу активності високих частот змінюється проміжком часу з низькочастотними коливаннями. Це може бути реакція іонізаційного фронту на спалах випромінювання в акреційній зоні. Збільшення світності акреційного регіону спричиняє рух фронту іонізації в напрямку до червоного карлика, що на якийсь час збуджує коливання (механізм описаний в [90]). Однак, згідно з сучасними моделями, цей механізм пояснює тільки 7 – 10-хвилинну змінність. З іншого боку, акреційні колони осцилюють з частотами порядку 1 герца [91]. Тому складно пояснити наявність квазіперіодичних осциляцій на проміжках часу 3 – 5 хвилин. Лоу [92] пропонує механізм осциляцій, пов’язаний з проходженням магніто-акустичних та магніто-гравітаційних хвиль по поверхні БК. При цьому, для наших умов, періоди перших лежать у діапазоні 0.1 – 10 секунд, а других – 100 – 1000 секунд.

*Спалахова активність.* Звичайний спалах, що реєструється в червоній частині видимого діапазону, є перевипромінюванням жорсткого рентгенівського “гальмівного” випромінювання, що виникає в області ударної хвилі акреційної

колони. Але більш щільні і масивні згустки газового потоку легше проникають глибше в магнітне поле, і тому частина з них не потрапляє в одну з акреційних колон, а, як у QQ Vul, “проникають” на поверхню БК за їх межами та висвічуються в м’якому рентгенівському діапазоні в атмосфері БК. Їх спектр більш блакитний: спалах має планківський характер з максимумом у м’якому рентгені. Ще одно джерело спалахів – червоний карлик зі спалахами типу UV Cet – їх можна відрізнити від акреційних тільки за спектральними характеристиками.

Зі спостережень на ДТШ і АДТ-11 були виявлені, відповідно, 134 і 105 спалахів. Для результатів, отриманих на ДТШ, визначалися: тривалість спалаху, значення блиску (відносно зорі порівняння) і поляризації системи в момент спалаху, обчислювалася крос-кореляція між блиском і поляризацією протягом спалаху. Аналіз розподілу блиску спалахів, відносно згладженого блиску, показав максимум розподілу зоряних величин спалахів на  $-0.2^m$ . З розподілу тривалості спалахів випливає, що більшість з них лежить у діапазоні від 35 до 120 с. Значних кореляцій для цих параметрів не знайдено.

Крос-кореляції між змінами блиску системи під час спалаху та поляризацією випромінювання: зі 134 спалахів 3 мають максимальне значення кореляції більше 0.7, 9 – більше 0.6 і 23 – більше 0.5. З цих 23 спалахів – 8 супроводжуються збільшенням ступеня поляризації, а решта 15 – зменшенням. Для першої групи середня величина зміщення максимуму крос-кореляційної функції дорівнює  $1 \pm 7$  с (при величині 0.56), а для другої (при величині 0.60)  $-25.5 \pm 6.9$  с, тобто негативна, екстремум поляризації настає раніше фотометричного. Те, що більшість спалахів не показала значної кореляції, означає, що акреція, яка їх створила, відбулась поза межами акреційних колон.

*Спектральні властивості спалахів* вивчалися, використовуючи результати п’ятиколірних фотометричних спостережень, отриманих на АДТ-11. Основна маса спалахів має червоний колір, що може свідчити про перевагу циклотронного характеру спалахової активності в даній магнітній катаклізмичній системі. Однак серед них не виключена присутність спалахів червоного карлика.

*Спостережні прояви неоднорідності структури акреційного потоку.* Отримана для яскравого стану автокореляційна функція описується суперпозицією дробових шумів з різним часом експоненціального затухання. Тобто спостерігається більше одного акреційного регіону з різними фізичними умовами, і автокореляційний аналіз показує збільшення вкладу квазіперіодичних складових. Але великі похибки не дозволяють назвати ці висновки остаточними.

*Аналіз основних компонентів.* Метод PCA [8] є ефективним інструментом для визначення компонентів змінності, які мають різні спектральні розподіли енергії, тобто залежність від довжини хвилі амплітуд змінності. Виявлено, що зміна амплітуди першого головного компонента ( $U_1$ ) набагато більша, ніж у інших. Це пояснює 84% загальної дисперсії у всіх кольорах. Другий компонент  $U_2$  відповідає за 10%, а загальний внесок інших трьох ( $U_3$ ,  $U_4$ ,  $U_5$ ) становить всього 5.8%. Незважаючи на розкид третього компонента ( $U_3$ ), він має очевидні варіації у масштабі орбіти. Відношення амплітуди “сигнал/шум”, отримане з використанням шкалограмного аналізу “ковзаючої параболи” [8, 93], становить 26, 14, 8, 4 і 4 для  $U_1 - U_5$  відповідно.

Тому перші три основні компоненти – статистично значущі.  $U_1$  – домінуюче джерело змінності, обумовлене циклотронною емісією акреційної колони – як у класичного поляра AM Her. У спектральному розподілі енергії  $U_2$  є “синім”, а  $U_1$  – “інфрачервоним”. У  $U_2$  переважає змінність  $\sim 30$  хвилин, тоді як  $U_1$  домінує в обертальній (спіновій) змінності.

*Висновки розділу 4:*

*Отримані залежності від довжин хвиль*, що дозволяють розділяти (та аналізувати) внесок різних фізичних механізмів у світність системи:

- спостережні підтвердження присутності у світності системи декількох джерел випромінювання. В порядку зменшення температури: “білий карлик + червоний карлик”, “структури акреції, що змінюються з орієнтацією” і “структури акреції, які не змінюються з орієнтацією”;
- блиск системи збільшується до червоних і синіх довжин хвиль, амплітуда змінності збільшується зі збільшенням довжини хвилі, може зміщуватися зі смуги I в смугу V при зменшенні середнього блиску системи та показує різкі зміни амплітуди на  $0.5^m$ ;
- більшість спалахів відбувається за межами акреційних колон;
- основна маса спалахів має червоний колір, що може свідчити про перевагу циклотронного характеру спалахової активності в даній магнітній катаклізмичній системі. Однак серед них не виключена присутність спалахів червоного карлика, що знімає протиріччя з попереднім фактом;
- на відміну від проміжних полярів BG CMi і MU Cam, варіації в різних кольорах показують збільшення амплітуди з довжиною хвилі;
- другий основний компонент змінності характеризується зменшенням амплітуди з довжиною хвилі. Амплітуди для 30-хвилинних,  $P/4$  і  $P$  варіацій порівняні, що вказує на те, що 30-хвилинні QPOs більш “блакитні”, ніж спінова змінність.

*Отримані залежності від станів середнього блиску системи:*

- у слабких станах відсутні коливання з періодами менше 0.005 доби (7.2 хвилини), які присутні в більш яскравих станах;
- в яскравому стані спостерігається більше одного акреційного регіону з різними фізичними умовами: з більш червоним пов’язується дробовий шум з  $\tau \approx 20$  с, а з більш “гарячою” акреційною плямою – дробовий шум з  $\tau \approx 60$  с;
- основні відмінності між спіновими кривими блиску в “яскравих” і “слабких” станах блиску:
  - а) середній показник кольору  $V-R$  більший для “яскравого” стану (тобто пов’язаний з акрецією, має “інфрачервоний” розподіл енергії);
  - б) “яскрава” крива блиску має меншу амплітуду;
  - в) “яскрава” крива блиску більш стабільна;
  - г) “яскрава” крива блиску має менше значення  $|m_{\max} - m_{\text{mean}}|$ , що вказує на більшу тривалість максимуму (який зазвичай розділяється на два горби).

*Отримані загальні залежності:*

- коливання з певним періодом подовжуються на більших періодах (“відлуння”);
- неоднорідності структури акреційного потоку мають ті ж самі часові характеристики, що й спалахова активність, тобто остання має природу дробового шуму;

- оптимальна математична модель для чотирьох головних змін блиску відповідає тригонометричному поліному четвертого порядку. Крім обговорених залежностей цих параметрів від фази періоду биття і середнього блиску, присутні квазіперіодичні коливання з ефективною довжиною циклу 30 і 8 хвилин зі змінною амплітудою;
- виправлені ефемериди для орбітальних мінімумів.

Визначені параметри можуть бути використані для порівняння з теоретичними моделями акреції в магнітних катаклізмичних змінних. Але на даний момент адекватних чисельних моделей для систем цих типів не існує. Для чисельного моделювання спостережуваних залежностей необхідні додаткові поляриметричні і спектральні спостереження, оскільки число модельних параметрів (маса БК, швидкість акреції, орієнтація і товщина акреційних колон, швидкість акреції, розподіл густини, напруженість і конфігурація магнітного поля, нахил орбіти) перевищує кількість залежностей.

Матеріали розділу 4, були опубліковані у статтях [1, 2, 12, 32] та обговорювалися на конференціях [30, 45, 53, 54, 56, 60, 67, 70].

**Розділ 5 “Дослідження проміжного поляра V405 Aur”.** Цей об’єкт був виявлений як оптичний аналог ROSAT-джерела м’якого рентгенівського потоку X-RAY 1RXS J055800.7 + 535358 (RX J0558.0 + 5353) Габерл та ін. [94]. Потік змінювався з періодом 272.74 с, який повинен був бути періодом обертання БК. Пізніше [95, 96] встановили, що період обертання БК в два рази більший: 545.45 с. У жовтні 1997 року дисертантом зі співавторами була вперше виміряна змінна кругова поляризація та виправдано значення подвоєного періоду обертання БК виявленням змінності поляризації з періодом  $P = 544.4 \pm 4.8$  с та напівамплітудою  $1.80 \pm 0.16\%$  [97]. Відзначаючи дуже схожі фотометричні максимуми (два протягом поляриметричного періоду), ми із співавторами запропонували модель системи, в якій дві акреційні колони мають майже екваторіальне розташування [48]. Пірола та ін. [98, 99] проаналізували інтервали між максимумами, отримані у 1994 – 2007 роках, та опублікували ефемериду з використанням полінома другого порядку:

$$T_{max} = \text{HJD } 2449681.46389(5) + 0.0063131474(4)E + 4(4) \cdot 10^{-16} E^2. \quad (1)$$

*Спостереження і їх обробка.* Ми використали спостереження, отримані в рамках національного проєкту “Українська віртуальна обсерваторія” [100] та міжнародного проєкту “Астрономія між довготами” [7]. Фотометричні ПЗЗ-спостереження отримані співавторами з використанням різних телескопів:

- 1-м Віхорлатський народний телескоп VNT (фільтри V та R) та
- 28-см рефлектор (без фільтра), що встановлені у астрономічній обсерваторії Гуменне, Словаччина;
- 35-см Beringer Automated Telescope, BAT, (без фільтра);
- 50-см рефлектор в обсерваторії м. Байя, Угорщина (фільтри V та R);
- 20-см MEADE LX-200 обсерваторія Глоховець, Словаччина (фільтри V та R);
- спостереження без фільтра з Обсерваторії Університету Арканзасу, США.

Також були використані результати, отримані дисертантом:

- широкосмугова фотометрія та поляриметрія у фільтрі WR, 2.6-м ДТШ;

• багатокольорова фотометрія UBVRI, 1.25-м AZT-11.

Остаточні часові ряди були отримані програмою MCV [101] з урахуванням багатьох зір порівняння. Аналіз періодогам проводився з використанням пакетів MCV і FDCN [102]. Для всіх даних враховувалася поправка для переведення моментів часу до барицентра Сонячної системи [103].

*Аналіз моментів максимумів.* Для отримання фазових кривих ми використали попередні значення періоду обертання БК та початкової епохи (1) з роботи Пірола і ін. [99]. На додаток до наших даних був використаний публічний архів SuperWASP [104], максимуми опубліковані в [96, 105, 107].

Всупереч пропозиції Пірола та ін. [99], що пропонували збільшення періоду, наші результати за останні роки показують явне скорочення періоду.

Найпростіша гіпотеза полягає у тому, що, приблизно у 2007 році, відбулася зміна періоду. Були окремо проаналізовані фотометричні дані, отримані на VNT [18] у 2010 – 2013 роках. Оскільки криві блиску у фільтрах V і R мали порівнянні між собою амплітуди, але відрізнялися зоряними величинами, було відняте середнє значення зоряної величини з даних в кожному фільтрі та з'єднані дані. Визначене нове значення періоду та початкової епохи, яке найкращим чином відповідає всім моментам максимуму обертання БК у спостереженнях:

$$T_{\max} = \text{HJD } 2455882.470614(25) + 0.00631314602(46) \cdot E.$$

Проте попередні дослідження проміжних полярів свідчать про плавні варіації періоду, а не про стрибки в періоді, тому були проаналізовані інші моделі з точки зору зміни періоду.

Щоб зменшити оцінки похибок початкової епохи і періоду, була вирахована інша цілочислова епоха  $E_0$ , ближча до середнього значення даних. У нашому випадку  $E_0 = 504600$ . Рівняння відповідності фаз максимумів  $\phi$  (які пов'язані з традиційними значеннями  $(O - C) = \phi P$ ) призводить до наступного виразу для квадратичної ефемериди:

$$T_{\max} = 2452867.07807(2) + 0.006313147426(70) \cdot (E - E_0) - 659(233) \cdot 10^{-18} (E - E_0)^2.$$

Величина квадратичного члена досягає 2.8с, тому його відхилення від нуля не є статистично значущим. Це не відповідає досить надійним недавнім результатами, отриманим здобувачем на АДТ-11 і ДТШ. Тому була розрахована зважена апроксимація 3-го степеня, що відповідає фазам максимумів, і отримані кубічні ефемериди:

$$T_{\max} = \text{HJD } 2452867.07807(2) + 0.006313147760(131) \cdot (E - E_0) - 502(237) \cdot 10^{-18} (E - E_0)^2 - 239(80) \cdot 10^{-23} (E - E_0)^3.$$

Це краще відповідає всім спостереженням і відповідає останнім нашим спостереженням, що показують виразну негативну тенденцію.

Також була перевірена гіпотеза про періодичну зміну  $O - C$ . Для цього обчислена періодограма з використанням апроксимації, що об'єднує 1-го порядку тригонометричний й 1-го порядку алгебраїчний многочлени. На періодограмі максимальний пік відповідає періоду  $2268^d = 6.2^y$ . Отримана апроксимація, де періодична складова є статистично значущою,

$$\psi = -0.00049(219) + 0.0000002(14) \cdot (T - 2452881) + 0.0315(32) \cdot \cos(2\pi \cdot (T - 2452389)/2268^d),$$

а відхилення від лінійної ефемериди менше похибок. Оскільки ці періодичні

зміни є статистично значущими, на рівні напівамплітуди  $9.7\sigma$ , можна припустити третє тіло, що обертається навколо внутрішньої подвійної системи з періодом  $\approx 6.2$  року на відстані  $(5.15 \pm 0.53) \cdot 10^9$  м. Відповідна функція маси [106]  $f(M3) \approx 0.09M_{\odot}$ , тому третє тіло може бути червоним карликом малої маси.

#### Висновки розділу 5:

- запропонована нами [48] модель системи V405 Aur, в якій дві акреційні колони мають майже екваторіальне розташування, безальтернативно доведена – як нашими результатами, так і результатами інших авторів [96, 98, 99, 105, 107];
- подальший її розвиток, який виражається в обговорюваних вище фізичних причинах спостережуваного факту зміни періоду, не може бути однозначним без отримання результатів подальших вимірювань. Необхідне з'ясування характеру змін спостережуваного періоду подвійної системи. Обидві запропоновані причини цих змін є абсолютно фізичними, тому для вибору між ними необхідні додаткові спостереження;
- у разі дослідження цієї системи роль методу кругової поляриметрії зі швидкою модуляцією є вирішальною, оскільки обидва джерела оптичної змінності об'єкта показують подібну фотометричну поведінку, що цілком природно в рамках прийнятої моделі.

Матеріали, що увійшли до розділу 5, були опубліковані у статті [18], та обговорювались на конференції [48, 60].

### Розділ 6 “Дослідження одиночного білого карлика WD 1748+708”.

Дослідження проводилось з метою перевірки гіпотези магнітної природи білого карлика. Паралельні фотометричні вимірювання проводилися співавторами з використанням 1.25-м АДТ-11 та ПЗЗ-камери FLI ProLine PL23042. Цей об'єкт спостерігався протягом чотирьох послідовних ночей. Поляриметричні виміри виконані на 2.6-м ДТШ, з поляриметром зі швидким обертанням аналізатора. В якості стандартів нульової та ненульової поляризації були використані зорі: HD 165908, HD 185395, HD 188512, HD 154445. Редукція і аналіз даних поляриметрії виконані стандартним способом [11, 23, 27]. Результати поляриметрії та фотометрії представлені у табл. 1 і на рис. 5 – в залежності від фази змінності з можливим періодом 8.3 год. Дві оцінки з чотирьох демонструють статистично значущі величини на рівнях, що перевищують критерій  $3\sigma$ . Сумарна, по всіх ночах спостережень, оцінка кругової поляризації:  $V = -0.36 \pm 0.087\%$  є також стійкою на рівні більш  $4\sigma$ .

Таблиця 1.

Кругова поляриметрія ДТШ, фільтр V

VJD, доба	Ехр., хв.	CP, %	$\sigma$ , %
2457280.37441	106	- 0.5022	0.1227
2457281.35396	102	- 0.4112	0.1421
2457282.44118	341	- 0.4812	0.1495
2457283.35619	136	- 0.1345	0.1139
$\Sigma$	685	- 0.36	0.087

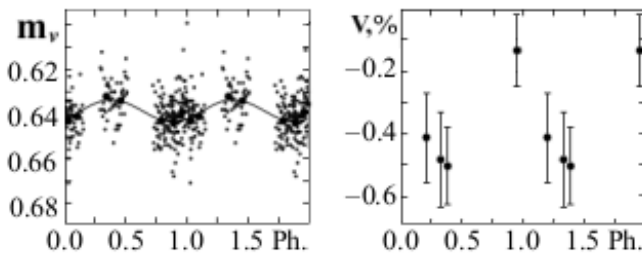


Рис. 5. Періодичні зміни у фільтрі V потоку (зоряні величини, щодо зорі порівняння) зліва і кругової поляризації праворуч в залежності від фази змінності ( $Ph.$ ) з можливим періодом 8.3 години.

*Обговорення та висновки розділу 6.* У проведених поляриметричних і фотометричних дослідженнях магнітного білого карлика WD 1748+708 нами отримані надійні свідчення на користь існування у випромінюванні об'єкта ненульової та змінної кругової поляризації та регулярної, ймовірно – модульованої обертанням, фотометричної змінності на рівні  $m_v = 0^m.01$ . Наявність у континуумі спектру БК кругової поляризації величиною близько 0.5% практично безальтернативно вказує на магнітну природу об'єкта [108]. Точну величину поверхневого магнітного поля зорі можна буде назвати тільки після проведення фазорозрізняючої зееманівської спектрополяриметрії об'єкта. Але, внаслідок кругового дихроїзму такі величини поляризації у континуумі виникають при величині поверхневого магнітного поля у БК більше 10 Мгс.

Найбільш ймовірна природа фотометричної змінності, на наш погляд, полягає в індукуванні магнітним полем неоднорідностей (зокрема, в навколуполосних областях) в силу причин, описаних в роботах [109 – 112]. Подібні явища також добре відомі [113] і спостерігаються [114] у конвективно-спокійних зір спектральних класів Ap / Vp. Отримані результати поляриметричних та ПЗЗ фотометричних спостережень повністю підтверджують вищеописану якісну модель WD 1748+708.

Матеріали розділу доповідались [46] і опубліковані [24, 25].

**Розділ 7. Поляриметрія малих тіл Сонячної системи.** Адекватні механізми розсіювання світла пиловими частинками повинні враховувати не тільки склад, розміри і структуру, але також форму і орієнтацію порошинок. Тому основна частина наших досліджень тіл Сонячної системи була проведена в режимі квазі-одночасного вимірювання параметрів лінійної і кругової поляризації. Спільні дослідження, які проводилися автором дисертації з колегами, під час нефотометричних погодних умов, дозволили співавторам отримати рішення для кількох актуальних задач. В той самий час автором дисертації були отримані деякі результати з кругової поляриметрії досліджуваних об'єктів. Але крім того, саме те, що ці роботи проводилися “в блоці” з завданнями дослідження зір, тобто під час змінної хмарності, всі отримані результати безальтернативно доводять високу ефективність методу поляриметрії зі швидким обертанням аналізатора: проведення досліджень іншим методом у подібних умовах були неможливі.

Щоб ще раз довести високу ефективність методу швидкої модуляції при поганих погодних умовах далі коротко представлені отримані результати. Результати цих робіт щодо супутників Юпітера Іо, Європа, Ганімед і Каллісто були представлені у спільних публікаціях [16, 19, 38, 40]. А у 2017 році була представлена спільна робота [42], де були викладені результати лінійної поляриметриї супутників Юпітера і Сатурна (Реї, Енцелада, Япета), отримані на декількох телескопах та приладах, та зроблені наступні висновки.

Поляриметричні спостереження галілеєвих супутників Юпітера мають хорошу внутрішню збіжність і підтверджують наявність ефекту поляризаційної опозиції (в лінійній поляризації) для Іо, Європи і Ганімеда в діапазоні фазових кутів менше  $2^\circ$ . Форма і амплітуда ефекту поляризаційної опозиції трохи розрізняються для різних супутників і для різних сезонів. В межах точності вимірювань не виявлено ніякого ефекту поляризаційної опозиції для супутника з помірним альбедо Каллісто. Різкий асиметричний поляризаційний опозиційний ефект (РОЕ) з мінімумом  $\sim -0.35 \pm 0.02\%$  з центром близько  $0.8^\circ$  спостерігається для супутника Юпітера Європи ( $p_v = 0.68$ ). Цей мінімум накладається на майже плоску негативну гілку лінійної поляризації (NPВ).

Фазова залежність лінійної поляризації супутника Сатурна Реї, отримана в широкому діапазоні фазових кутів, має асиметричну форму з мінімумом поляризації  $P_{\min} \approx -0.8 \pm 0.1\%$  на фазовому куті  $\alpha_{\min} \approx 1.8^\circ$ . Фазова залежність лінійної поляризації супутника Сатурна Енцелада досить асиметрична з мінімальною поляризацією  $P_{\min} \approx -0.51\%$  при фазовому куті  $\alpha_{\min} \approx 2.4^\circ$ . Характеристики дуже схожі з характеристиками супутника Сатурна Реї з високим альбедо, незважаючи на відмінності альбедо: у Енцелада  $p_v = 1.38$ , у Реї  $p_v = 0.7$ . Різкий асиметричний РОЕ з  $P_{\min} \approx -0.7 \pm 0.2\%$  з центром близько  $1.5^\circ$  спостерігається для світлої сторони супутника Сатурна Япета ( $p_v = 0.6$ ), що нагадує криву, отриману Ліо для зразка MgO [115] у вигляді частинок. В межах точності вимірювань не виявлено ніякого ефекту поляризаційної опозиції для супутників Сатурна.

В акумульованих даних спостережень, які дозволили зробити цей висновок, є внесок і телескопа ДТШ з однопроменевим поляриметром зі швидкою модуляцією, що був виготовлений автором цієї роботи. Крім того, автор дисертації був постійним учасником спостережень. Зрозуміло, що внесок одного інструмента значно менше загального, при цьому метод швидкої модуляції, використаний і на частині інших приладів, дозволяв отримувати результати лінійної поляриметриї з подібною точністю.

Результати поляриметричних спостережень високоальбедного астероїда Е-типу 64 Angelina [20] отримані в діапазоні фазових кутів  $0.8\text{--}24.3^\circ$ , і на великих фазових кутах узгоджуються з отриманими раніше результатами та лягають на регулярну гілку поляризації. Поведінка фазової залежності поляризації на малих фазових кутах ( $\leq 2^\circ$ ) підтверджує виявлену раніше наявність поляриметричного опозиційного ефекту у вигляді вторинного мінімуму негативної поляризації. Його характеристики відрізняються від отриманих під час інших опозицій, що може бути підтвердженням неоднорідності поверхневого шару астероїда 64 Angelina.



Поляриметричні спостереження високоальбедного астероїда E-типу 44 Nysa були проведені, коли мінімальний фазовий кут досяг  $0.4^\circ$  [14]. Вони показали, що негативна гілка поляризації має бімодальну форму, а саме, вузький мінімум негативної поляризації з амплітудою близько 0.3% з центральним кутом фази  $0.8^\circ$  накладений на набагато ширшу негативну гілку поляризації з мінімумом – 0.3% з фазовим кутом  $\sim 5.8^\circ$ .

Поляриметричні дослідження комет. Міжнародна компанія з ПЗЗ- та апертурної поляриметрії добре вивченої комети 2P/Енске мала за мету перевірку можливості істотного пропускання емісії частиною фільтрів, що використовуються для виділення континууму при кометних дослідженнях. В роботі [9] було зроблено висновок, що існування класу комет з поляризацією менше 20% при фазових кутах близько  $90^\circ$  є досить сумнівним. Класифікація комет відповідно до їх поляризації вимагає більш ретельного розгляду обраної апертури і впливу молекулярної емісії, що пропускається фільтром, використаним для виділення спектрального діапазону.

Поляриметричні дослідження динамічно нової комети C/2002 T7 (LINEAR) проводилися у рамках кооперативної компанії, в ході якої на ДТШ було отримано 8 з 20 рядів вимірів. За всіма отриманими даними в [10] зроблені висновки про те, що середня спектральна залежність негативної гілки поляризації – плоска; в період 21–25.11.2003 виявлені значні (до  $\approx 0.5\%$ ) варіації ступеня лінійної поляризації випромінювання, ймовірно, пов'язані з активністю комети; в цілому спостережувані характеристики близькі до середніх аналогічних характеристик типових пилових комет.

Комета C/2009 P1 (Garradd) в спільній роботі [17], виходячи з усіх результатів лінійної поляриметрії, класифікована як пилова.

Для ще двох комет були отримані наступні результати: у C/2001 Q4 (NEAT) встановлена можливість існування зв'язку між параметрами лінійної і кругової поляризації [34], а для комети 8P/Tuttle ступінь лінійної поляризації значно нижчий, ніж у типових пилових комет [35].

**У додатку А** наведено для QQ Vul: списки рядів спостережень; сплескограми та таблиці періодичностей, визначених за ними; параметри спалахів, визначені за спостереженнями АДТ-11 та ДТШ; моменти мінімумів.

**У додатку Б** наведено для ВУ Сам: списки рядів спостережень; сплескограми та таблиці періодичностей, визначених за ними; параметри спалахів, визначені за спостереженнями ДТШ та АДТ-11; UBVRI-розподіл власного блиску спалахів, параметри фотометричної активності за індивідуальні ночі, параметри спалахів, визначені за спостереженнями.

**У додатку В** – “Список публікацій здобувача за темою дисертації” наведено перелік статей автора у фахових виданнях та тез конференцій, а також відомості про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

## ВИСНОВКИ

1. Багаторічне вивчення класичного довгоперіодичного поляра QQ Vul довело, що велика частина спалахової активності відбувається за межами акреційних колон і описується моделлю дробового шуму. Визначено розміри крапель в акреційному потоці ( $\sim 6 \times 10^8$  см), часова затримка  $\sim 1.8$  хв між

спалахами і середній час падіння згустку (25 с) у припущенні, що швидка змінність виникає у результаті акреції.

2. Для асинхронного довгоперіодичного поляра VY Cam визначено великий ряд чисельних характеристик, у тому числі:

Залежності від довжин хвиль. Одна з них – спостережене підтвердження присутності у світності системи декількох джерел випромінювання в порядку зменшення температури: “білий карлик + червоний карлик”, “структури акреції, що змінюються з орієнтацією” і “структури акреції, які не змінюються з орієнтацією”.

Залежності від стану середнього блиску системи, такі як: в яскравому стані спостерігається більше одного акреційного регіону з різними фізичними умовами – з більш червоним пов’язується дробовий шум з  $\tau \approx 20$  с, з більш “гарячою” акреційною плямою – дробовий шум з  $\tau \approx 60$  с.

Загальні залежності, такі як: неоднорідності структури акреційного потоку і спалахова активність мають однакові часові характеристики, тобто остання має природу дробового шуму; оптимальна математична модель для чотирьох головних змін блиску відповідає тригонометричному поліному четвертого порядку.

Для VY Cam, так само, як для QQ Vul, отримано доказ того, що більшість спалахів відбувається за межами акреційних колон, що не узгоджується зі стандартною моделлю ТПС з великою напруженістю магнітного поля головного компонента.

3. Висунута нами фізична модель для проміжного поляра V405 Aur, в якій дві акреційні колони мають майже екваторіальне розташування, повністю підтверджена спостереженнями – як нашими, так і інших авторів.

4. Підтверджено висунуту співавторами модель для одиночного магнітного білого карлика WD 1748 + 708.

5. Експериментально доведено високу ефективність методу швидкої модуляції при поляриметричних вимірах навіть при нефотометричних погодних умовах.

Поляриметричні дослідження високоальбедних супутників Юпітера Іо, Європи і Ганімеда підтвердили одночасність фотометричного і поляриметричного опозиційних ефектів та порівнянність їх фазових кутових діапазонів. Це доводить їх пов’язаність з механізмом зворотного когерентного розсіювання.

Значно доповнені криві фазових залежностей поляризації для високоальбедних супутників Юпітера і Сатурна та астероїдів 64 Angelina і 44 Nysa.

На основі дослідження добре вивченої комети 2P/Encke зроблено висновок, що існування класу комет з поляризацією менше 20% при фазових кутах близько  $90^\circ$  є досить сумнівним. Комети C/2002 T7 (LINEAR), C/2009 P1 (Garraff) класифіковані як пилові, а у комети 8P/Tuttle ступінь лінійної поляризації значно нижчий, ніж у типових пилових комет.

6. Результатами даної роботи доведено високу продуктивність методу швидкої модуляції при поляриметрії в умовах “неідеального” астроклімату. Для поліпшення результатів спостережень, необхідно використовувати симетричні і

безлінзові оптичні схеми; визначати поляриметричну систему телескопа та приладу і також – контролювати її зміни; використовувати якомога більш тривалі та однорідні спостережні ряди повних параметрів Стокса і результати вимірювань у різних спектральних інтервалах. При вимірі протяжних об’єктів приділяти додаткову увагу кутовій та спектральній роздільній здатності приладу і телескопа. При обробці і аналізі використовувати класичні та розроблені на їх основі сучасні методи статистичного аналізу.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.

### Статті у періодичних журналах:

1. I. L. Andronov, A. V. Baklanov, L. L. Chinarova, D. Chochol, K. Gazeas, A. V. Halevin, S. V. Kolesnikov, L. S. Kudashkina, V. I. Marsakova, P. A. Mason, P. G. Niarchos, L. Patkos, E. P. Pavlenko, N. M. Shakhovskoy, L. L. Shapovalova, J. Tremko, S. Zola, “Periodic and aperiodic variability of the interacting binary and long-periodic stars”, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel, Suppl*, **3**, 383-388 (2000).
2. A. V. Halevin, N. M. Shakhovskoy, I. L. Andronov, S. V. Kolesnikov, “Outburst activity in magnetic cataclysmic variables BY Cam and QQ Vul”, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel, Suppl*, **3**, 402-405 (2000).
3. I. L. Andronov, S. V. Kolesnikov, P. G. Niarchos, N. M. Shakhovskoy, S. Zola “BH Lyn: UBVRI and CCD photometry of the eclipsing cataclysmic Variable”, *Odessa Astron. Publ.*, **14** 15 – 16 (2001).
4. Н. М. Шаховской, И. Л. Андронов, С. В. Колесников, А. В. Халевин “Методика измерения круговой поляризации с одноканальным фотополяриметром. Одноканальный фотометр-поляриметр: Аппаратное и программное обеспечение”, *Изв. Крым. астрофиз. обс.* **97** 91-100 (2001).
5. A. V. Halevin, N. M. Shakhovskoy, I. L. Andronov, S. V. Kolesnikov “Unstable processes in magnetic cataclysmic variables. I. Case of the long-period polar QQ Vulpeculae”, *Astron. and Astrophys.*, **394** (1), 171 – 179, (2002).
6. I. L. Andronov, V. Burwitz, K. Reinsch, H. Barwig, L. L. Chinarova, S. V. Kolesnikov, N. M. Shakhovskoy, V. Hambaryan, K. Beuermann, D. A. Yuharov “Structure and evolution of the prototype magnetic Cataclysmic variable AM Her: Clues from X-ray (Chandra) and optical polarimetry and photometry. Four-component Model of the auto-correlation function”, *Odessa Astron. Publ.*, **16**, 7 – 10 (2003).
7. I. L. Andronov, A. Antonyuk, P. Augusto, A. V. Baklanov, L. L. Chinarova, D. Chochol, Yu. S. Efimov, K. Gazeas, A. V. Halevin, Y. Kim, S. V. Kolesnikov, L. S. Kudashkina, V. I. Marsakova, P. A. Mason, P. G. Niarchos, D. Nogami, N. I. Ostrova, L. Patkos, E. P. Pavlenko, N. M. Shakhovskoy, J. Tremko, A. V. Yushchenko, S. Zola “Inter-longitude astronomy project: some results and perspectives”, *Astron. And Astrophys. Transac.* **22**, (4 – 5), 793 – 798, (2003).  
DOI: <https://doi.org/10.1080/1055679031000124501>
8. I. L. Andronov, N. M. Shakhovskoy, S. V. Kolesnikov “Principal Components of Variability of the Accretion Structures Near White Dwarfs”, in: *White Dwarfs*, editors: de Martino D., Silvotti R., Solheim JE., Kalytis R. (NATO Science Series II, **105**: Mathematics, Physics and Chemistry, Springer, Dordrecht, 2003), 325-328.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-010-0215-8\\_96](https://doi.org/10.1007/978-94-010-0215-8_96) ISBN978-94-010-0215-8  
WOS:000185234100096

9. K. Jockers, N. Kiselev, T. Bonev, V. Rosenbush, N. Shakhovskoy, S. V. Kolesnikov, Yu. Efimov, D. Shakhovskoy, K. Antonyuk “CCD imaging and aperture polarimetry of comet 2P / Encke: are there two polarimetric classes of comets?”, *Astron. And Astrophys.*, **441**, (2), 773 – 782 (2005).
10. V. K. Rosenbush, F. P. Velichko, N. N. Kiselev, S. F. Velichko, N. M. Shakhovskoy, Yu. S. Efimov, K.A. Antonyuk, S. V. Kolesnikov, D. N. Shakhovskoy “Comet C/2002 T7 (Linear): Polarimetric and photometric studies”, *Solar System Research*, **40**, (3), 230 – 238 (2006). WOS:000238493900007  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0038094606030075>
11. V. V. Breus, I. L. Andronov, S. V. Kolesnikov, N. M. Shakhovskoy “Simultaneous linear and circular polarimetry of variable Stars in the 2.6m Shain telescope computer program for data reduction”, *Astron. and Astrophys. Transac.*, **26** (4-5), 241 – 243 (2007).
12. I. L. Andronov, K. A. Antonyuk, V. V. Breus, L. L. Chinarova, W. Y. Han, Y. B. Jeon, Y. Kim, S. V. Kolesnikov, J. Y. Oh, E. P. Pavlenko, N. M. Shakhovskoy “Idling magnetic white dwarf in the synchronizing polar BY Cam. The Noah-2”, *Central European Journ. of Physics.*, **6** (3), 385 – 401 (2008).
13. V. Rosenbush, N. Kiselev, L. Kolokolova, S. Velichko, F. Velichko, K. Antoniuk, S. Kolesnikov “Polarization properties of odd comet 17P/Holmes”, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.*, **110** (14 – 16), 1719 – 1725 (2009).
14. V. K. Rosenbush, V. G. Shevchenko, N. N. Kiselev, A. V. Sergeev, N. M. Shakhovskoy, F. P. Velichko, S. V. Kolesnikov, N. V. Karpov. “Polarization and brightness opposition effects for the E-type Asteroid 44 Nysa”, *Icarus*, **201** (2), 655 – 665 (2009). DOI:<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.01.007>
15. I. L. Andronov, K. A. Antoniuk, A. V. Baklanov, V. V. Breus, V. Burwitz, L. L. Chinarova, D. Chochol, P. A. Dubovsky, W. Han, T. Hegedus, A. Henden, L. Hric, Chun-Hwey Kim, Yonggi Kim, S. V. Kolesnikov, I. Kudzej, A. Liakos, P. G. Niarchos, A. Oksanen, L. Patkos, K. Petrik, N. V. Pit', N. M. Shakhovskoy, N. A. Virnina, J. Yoon, S. Zola “Inter-Longitude Astronomy (ILA) Project: Current Highlights and Perspectives. I. Magnetic vs. Non-Magnetic Interacting Binary Stars”, *Odessa Astron. Publ.* **23**, 8-10 (2010).
16. S. V. Zaitsev, N. N. Kiselev, V. K. Rosenbush, F. P. Velichko, S. V. Kolesnikov, K. A. Antonyuk, V. N. Psarev “Polarimetric observations of the Galilean satellites near opposition in 2011”, *Advances in Astronomy and Space Physics.*, **2**, 177 – 179 (2012).
17. N. N. Kiselev, V. K. Rosenbush, V. L. Afanasiev, S. V. Kolesnikov, S. V. Zaitsev, D. N. Shakhovskoy “Linear and circular polarization of comet C/2009 P1 (Garradd)”, *Earth, Planets and Space*, **65** (10), 1151 – 1157 (2013)  
DOI:<https://doi.org/10.5047/eps.2013.05.014>
18. V. V. Breus, I. L. Andronov, P. Dubovsky, S. V. Kolesnikov, E. A. Zhuzhulina, T. Hegedus, P. Beringer, K. Petrik, J. W. Robertson, A. V. Ryabov, I. Kudzej, N. M. Shakhovskoy “Variability of the spin period of the white dwarf in the intermediate polar V405 Aur: Low-mass third body or precession?”, *Journal of Physical Studies*, **17** (3), 3902.7p (2013)
19. S. Zaitsev, N. Kiselev, V. Rosenbush, F. Velichko, S. Kolesnikov “Polarimetry of galilean satellites of Jupiter near opposition in 2012–2014”, *Вісник Київського ун-ту. Серія радіофізики та електроніки* **1 – 2 (20-21)**, 49 -51 (2014).

20. S. V. Zaitsev, N. N. Kiselev, V. K. Rosenbush, S. V. Kolesnikov, K. A. Antonyuk “Polarimetry of the E-type asteroid 64 Angelina”, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **30** (3), 155 – 160 (2014).  
DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591314030064> WOS:000339278300005
21. S. V. Zaitsev, N. N. Kiselev, V. K. Rosenbush, S. V. Kolesnikov, D. N. Shakhovskoy “Polarimetry of Saturnian satellite Enceladus”, *Advances in Astron. and Space Physics*, **5**, 29 – 32 (2015).  
DOI: <https://doi.org/10.17721/2227-1481.5.29-32> WOS:000378724900006
22. S. V. Zaitsev, N. N. Kiselev, V. K. Rosenbush, S. V. Kolesnikov “Polarimetry of Saturn’s Satellite Rhea”, *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **31** (6), 281 – 285 (2015) DOI: <https://doi.org/10.3103/S0884591315060070> WOS:000368528500003
23. S. V. Kolesnikov, V. V. Breus, N. N. Kiselev, I. L. Andronov “A technique for simultaneous measurement of circular and linear polarization with a single-channel polarimeter”, *Odessa Astron. Publ.* **29**, 74 – 77 (2016)
24. K. A. Antonyuk, S. V. Kolesnikov, N. V. Pit, G. G. Valyavin, A. F. Valeev, T. E. Burlakova, G. A. Galazutdinov “Detection of circular polarization and low-amplitude photometric variability of the white dwarf WD1748+508”, *Astrophysical Bulletin*, **71** (4), 475 – 478 (2016). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990341316040106> WOS:000393119100010
25. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, A. S. Moskvitin, A. O. Grauzhanina, D. R. Gadelshin, S. V. Kolesnikov, T. E. Burlakova G. A. Galazutdinov, A. G. Gutaev, R. Ya. Zhuchkov, A. I. Ikhsanova, A. Joshi, J. C. Pandey, E. A. Zhuzhulina, G. G. Valyavin “Search for and study of photometric variability in magnetic white dwarfs”, *Astrophysical Bulletin*, **72** (1), 44 – 50 (2017)  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990341317030051> WOS:000395067800005
26. С. В. Колесніков “Розвиток апаратури та методик поляриметричного методу як ефективного методу астрофізичних досліджень. I.”, *Журнал фізичних досліджень* **23**(3), 3901(15 с.) (2019) DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.23.3901>
27. С. В. Колесніков “Розвиток апаратури й методик поляриметричного методу, як ефективного методу астрофізичних досліджень. II. Опис і розвиток методу апертурної поляриметрії в КрАО. Прилади і програмне забезпечення”, *Журн. фіз. досл.*, **23**(4), 4901(14 с.) (2019) DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.23.4901>

### Матеріали конференцій

позначені роботи, що індексуються базами SCOPUS(\*) та WoS(+).

28. I. L. Andronov, S. V. Kolesnikov, N. M. Shakhovskoy “Twenty five years of the AM phenomenon: results of the polarimetric and photometric monitoring”, in: *The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects*, Michigan, 2002, ASP Conf. Ser., **261**, 129 – 130 (2002).
29. P. A. Mason, I. L. Andronov, N. M. Shakhovskoy, S. V. Kolesnikov “Evolution of the spin period of AM Herculis”, in: *The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects.*- Michigan, 2002., ASP Conf. Ser., **261** 157 – 158 (2002).
30. A. V. Halevin, I. L. Andronov, N. M. Shakhovskoy, E. P. Pavlenko, S. V. Kolesnikov, N.I. Octrova. “Accretion instabilities with time-scales from seconds to years in magnetic cataclysmic variables”, in: *The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects.*- Michigan, 2002, ASP Conf. Ser., **261**, 155 – 156 (2002).

31. I. L. Andronov, A. V. Baklanov, L. L. Chinarova, S. V. Kolesnikov, N. I. Ostrova, A. V. Yushchenko, P. G. Niarchos, K. D. Gazeas, N. M. Shakhovskoy, E. P. Pavlenko. “Evolution of superhump characteristics in SU UMa and nova-like variables”, in: *Interplay of Periodic, Cyclic and Stochastic Variability in Selected Areas of the H-R diagram*. ed. C. Sterken – San Francisco, 2003, ASP Conf. Ser., **292**, 313 – 314 (2003).
32. A. V. Halevin, I. L. Andronov, N. M. Shakhovskoy, S. V. Kolesnikov, N. I. Ostrova “Blooby accretion in magnetic cataclysmic variables”, in *Magnetic Cataclysmic Variables: Proceed. IAU Coll. No. 190, 8-13 Dec., 2002 in Cape Town, South Africa / Ed. S. Vrielmann, M. Cropper.*- San Francisco: ASP, 2004.- P. 265.- (ASP Conf.; Vol. **315**). Journal: International Astronomical Union Colloquium / Volume **190** / 2004 Published online by Cambridge University Press: 12 April 2016, pp. 265-271 DOI:<https://doi.org/10.1017/S0252921100002189>
33. I. L. Andronov, V. Burwitz, K. Reinsch, H. Barwig, L. L. Chinarova, S. V. Kolesnikov, N. M. Shakhovskoy, V. Hambaryan, K. Beuermann, D. A. Yukhanov “Four-Component Model of the Auto-Correlation Function of AM Her Based on a CHANDRA Observation”, in *The Astrophysics of Cataclysmic Variables and Related Objects*, Proceed.- San Francisco: Astron. Soc. of the Pacific, **330**, 407-408 (2005)).
34. V. Rosenbush, N. Kiselev, N. Shakhovskoy, S. Kolesnikov, V. Breus, “Circular and linear polarization of comet C/2001 Q4 (NEAT). Why circular polarization in comets is predominantly left-handed?”, Ed. by G. Videen, M. Mishchenko, M. P. Mengüç and N. Zakharova, Proceedings. In: *Tenth Conference on Electromagnetic and Light Scattering*, Bodrum, Turkey, June 17-22, 2007: Peer- Reviewed Abstracts/ Ed. by G. Videen et al. 181-184. (2007)
35. V. Rosenbush, N. Kiselev, K. Antoniuk, S. Kolesnikov “Optical Properties of Recent Bright Comets C/2001 Q4 (NEAT), 73P/Schwassmann-Wachmann 3, 17P/Holmes, and 8P/Tuttle Derived from Aperture and Imaging Polarimetry”, Asteroids, Comets, Meteors 2008. – Baltimore, USA, 2008. – P. id. 8393. – (LPI Contr.; No. 1405).
36. V. K. Rosenbush, N. N. Kiselev, F. P. Velichko, L. Kolokolova, S. F. Velichko, S. V. Kolesnikov, K. A. Antonyuk “Atypical polarization in some recent comets C / 1999 S4 (LINEAR)”, In Proceedings of the “11th Conference on Electromagnetic and Light” Scattering, Hertfordshire, UK. 2008, IHMT, pp. 193–196.
37. V. K. Rosenbush, V. G. Shevchenko, N. N. Kiselev, A. V. Sergeev, N. M. Shakhovskoy, F. P. Velichko, S. V. Kolesnikov and N. V. Karpov “Polarimetry and photometry of asteroid 44 Nysa: comparison of opposition effects in e-type asteroids”, Abstr. Book of Int. Conf. “Solar System Bodies: From Optics to Geology”, Kharkiv, Ukraine, May 26-29, 2008 p.104-105
38. V. K. Rosenbush, N. N. Kiselev, S. V. Zaitsev, V. L. Afanasiev, S. V. Kolesnikov, K. A. Antoniuk “Solar System Bodies: Observational Results”, Asteroids, Comets, Meteors 2012: Proceed. of conf. May 16-10, 2012, Nigata, Japan, 2012, LPI Contr.; № 1667, id.6110,
39. N. N. Kiselev, V. K. Rosenbush, V. L. Afanasiev, D. A. Blinov, S. V. Kolesnikov, S. V. Zaitsev “Comparative Polarimetry of Comets 103P/Hartley 2, 9P/Tempel 1, and C/2009 P1 (Garradd)”, Asteroids, Comets, Meteors 2012: Proceed. of conf. May 16-10, 2012, Niigata, Japan, LPI Contr.; № 1667 id.6102.

40. V. Rosenbush, N. Kiselev, S. Zaitsev, V. Afanasiev, S. Kolesnikov, K. Antoniuk “Opposition optical phenomena in solar system bodies: observational results”, *Asteroids, Comets, Meteors* (2012) Contribution № 1667, id.6130.
41. V. Rosenbush, A. Ivanova, N. Kiselev, V. Afanasiev, S. Kolesnikov, D. Shakhovskoy “Linear and circular polarimetry of recent comets: Observational results for eight comets”, *Asteroids, Comets, Meteors* 2014: Proceed. of the conf. (Helsinki, Finland, 2014), p. 450.
42. N. N. Kiselev, V. K. Rosenbush, V. L. Afanasiev, S. V. Zaitsev, S. V. Kolesnikov, D. N. Shakhovskoy “Polarimetric properties of icy moons of the outer planets”, *Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today: International conf.* (Saint-Petersburg Univ., Russia, 2015), pp. 203-209.
43. K. Petrik, V. V. Breus, I. L. Andronov, M. Csatoryova, J. Drga, T. Hegedus, S. Zola, L. L. Chinarova, Y. H. Kim, J. Park, J.-N. Yoon, P. Dubovsky, S. V. Kolesnikov, K. A. Antonyuk “Spin Period Study of the Intermediate Polars MU Cam, V2306 Cyg and V1323 Her”, in *Living Together: Planets, Host Stars and Binaries: Proceed. of a conf.*, held 8-12 Sept. 2014 in Litomyšl, Czech Republic, Ed. by S. M. Rucinski et al., San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, Conference Series. **496**, 252 – 253 (2015) WOS:000369467900047
44. Н. Н. Киселев, Д. Н. Шаховской, Ю. С. Иванов, Н. В. Карпов, В. К. Тарадий, К. А. Антониук, А. В. Долгополов, С. В. Колесников, В. К. Розенбуш. “Апертурные фотополяриметры для Терскольской и Крымской обсерваторий. Принципы построения и возможности.”, “Околосемная астрономия- 2015”: IX Междунар. конф., п.Терскол, Россия, 31.8 – 5.9.2015 г., Нальчик, сс113-114 (2015).
45. I. L. Andronov, K. D. Andrych, K. A. Antoniuk, A. V. Baklanov, P. Beringer, V. V. Breus, V. Burwitz, L. L. Chinarova, D. Chochol, L. M. Cook, M. Cook, P. Dubovsky, W. Godlowski, T. Hegedus, K. Honkova, L. Hric, Y. B. Jeon, J. Jurysek, C. H. Kim, Y. Kim, Y. H. Kim, S. V. Kolesnikov, L. S. Kudashkina, A. V. Kusakin, V. I. Marsakova, P. A. Mason, M. Masek, N. Mishevskiy, R. H. Nelson, A. Oksanen, S. Parimucha, J. W. Park, K. Patrik, C. Quinones, K. Reinsch, J. W. Robertson, I. M. Sergey, M. Szpanko, M. G. Tkachenko, L. G. Tkachuk, I. Traulsen, J. Tremko, V. S. Tshmeystrenko, J. N. Yoon, S. Zola, N. M. Shakhovskoy, “Instabilities in Interacting Binary Stars”, Ed. by A. M. Mickaelian; H. A. Harutyunian; E. H. Nikoghosyan, *Astronomical Society of the Pacific Conf. Ser.* **511**, 43 – 50 (2017). WOS:000411770300006
46. A. F. Valeev, K. A. Antonyuk, N. V. Pit, A. S. Moskvitin, A. O. Grauzhanina, D. R. Gadelshin, S. V. Kolesnikov, T. E. Burlakova, G. A. Galazutdinov, A. G. Gutaev, R. Ya. Zhuchkov, A. I. Ikhsanova, A. Joshi, J. C. Pandey, E. A. Zhuzhulina, G. G. Valyavin, “Detection of Low-Amplitude Photometric Variability of Magnetic White Dwarfs”, *Stars: From Collapse to Collapse: Proceedings of a conference, held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7 Oct., 2016.* Ed. by Yu. Yu. Balega et al., San Francisco: Astronomical Society of the Pacific Conf. Ser., **510**, 504 – 506 (2017). WOS:000411770200127
47. S. V. Kolesnikov, I. L. Andronov “AM Her – Type Stars: 40 Years of Exciting Surprises”, *Stars: From Collapse to Collapse: Proceedings of a conference, held at Special Astrophysical Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia 3-7. Oct., 2016,* Ed. by Yu. Yu. Balega et al., San Francisco: Astronomical Society of the Pacific Conf. Ser. **510**, 502 – 503 (2017) WOS:000411770200126

### Тези конференцій

48. N. M. Shakhovskoy, I. L. Andronov, S. V. Kolesnikov “Near Equatorial Magnetic Axis of the White Dwarf in the Intermediate Polar V405 Aur”, Joint European and National Meeting: JENAM 2001 of the European Astronomical Society and the Astronomische Gesellschaft: Contributed Talks and Posters.- Hamburg, 2001.- P. 16. (Astron. Gesellschaft Abstract Ser., 2001; Vol.18,#P.16.)
49. N. M. Shakhovskoy, D. N. Shakhovskoy, S. V. Kolesnikov “The upgrade of the single-channel polarimeter with rapidly rotating analyser”, NATO Advanced Study Institute on Photopolarimetry in Remote Sensing and Workshop on Remote Sensing Techniques and Instrumentation: International Cooperation.- Yalta, 2003.- P. 11.
50. I. L. Andronov, H. Barwig, K. Beuermann, S. V. Kolesnikov, N. M. Shakhovskoy “Simultaneous X-ray (Chandra) observations and optical polarimetry and photometry of the prototype magnetic cataclysmic variable AM Her”, NATO Advanced Study Institute on Photopolarimetry in Remote Sensing and Workshop on Remote Sensing Techniques and Instrumentation: International Cooperation.- Yalta, 2003.- P. 3.
51. I. L. Andronov, S. V. Kolesnikov, N. M. Shakhovskoy “Regular vs irregular variability of the prototype polar AM Her”, JENAM 2003: New deal in European astronomy: Trends and perspectives: Information booklet.- Budapest, Hungary, 2003.- P. 40.
52. I. L. Andronov, K. A. Antoniuk, L. L. Chinarova, S. V. Kolesnikov “Positive vs. Negative superhumps in TT Ari”, JENAM 2003: New deal in European astronomy: Trends and perspectives: Information booklet.- Budapest, Hungary, 2003.- P. 40.
53. I. L. Andronov, S. V. Kolesnikov, N. M. Shakhovskoy “Cyclotron emission from accretion columns: UBVR observations of magnetic cataclysmic variables”, NATO Advanced Study Institute on Photopolarimetry in Remote Sensing and Workshop on Remote Sensing Techniques and Instrumentation: International Cooperation.- Yalta, 2003.- P. 18.
54. И. Л. Андронов, С. В. Колесников, Л. Л. Чинарова, Н. М. Шаховской “Координированные космические (IUE, HST, Chandra) и наземные наблюдения катаклизмических переменных звезд”, Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям, 3-я.- Кацивели, 2003. (Научный, Крым, 2003) С. 1.3.39, 188.
55. N. N. Kiselev, Yu. S. Efimov, S. V. Kolesnikov, N. M. Shakhovskoy, K. A. Antonyuk. “Polarimetry and photometry of comet C/ 2002 T7 (LINEAR)”, Int. Conf. "Research of artificial and natural NEOs and other Solar System Bodies with CCD ground- based telescopes", Nikolaev. (Nikolaev: Atoll, 2004) P. 15.
56. I. Л. Андронов, К. А. Антонюк, О. В. Бакланов, С. В. Колесников, М. М. Шаховської “Будова та еволюція катаклізмичних подвійних систем”, Всеукраїнський з’їзд “Фізика в Україні”: Тез. доп. (Одеса: ОНУ, 2005), С. 58 – 59.
57. I. L. Andronov, A. V. Baklanov, S. V. Kolesnikov, “Multiple Time – Scales in the old Nova V603 Aql”, Bull. Korean Space Sci. Soc. **14**( 2) P.84 (2005)
58. I. L. Andronov, A. V. Baklanov, V. Burwitz, S. V. Kolesnikov, E. P. Pavlenko, N. M. Shakhovskoy “Multi-color Photometry of the Newly Discovered Intermediate Polar RXS J062518+733433”, Bull. Korean Space Sci. Soc.**14**( 2) P.85 (2005).



59. N. N. Kiselev, V. K. Rosenbush, F. P. Velichko, S. V. Kolesnikov, S. V. Zaitsev, K.A. Antonyuk. "Polarimetric observations of the Galilean satellites near opposition in 2011", *19th Open Young Sci. Conf. on Astronomy and Space Physics (YSC'19)*, Kyiv, Apr. 23 - 28, 2012: Abstr. (Kyiv, 2012) P.22.
60. I. L. Andronov, S. V. Kolesnikov, N. M. Shakhovskoy, "Photo-polarimetry of cataclysmic variables". NATO Advanc. Study Inst. "Special Detect. Technique (Polarimetry) and Rem. Sens." Kyiv, Ukr. 12–25 Sept. 2010
61. S. V. Kolesnikov, N. M. Shakhovskoy, I. L. Andronov, I. V. Galibeyj, N. V. Epihina, S. V. Kliment'eva, and E. A. Zhuzhulina, "Polarimeter with a rapidly rotating retarder." NATO Advanced Study Institute on "Special Detection Technique (Polarimetry) and Remote Sensing" Kyiv, Ukraine 12–25 Sept. 2010
62. I. L. Andronov, Y. Kim, K. A. Antoniuk, V. V. Breus, L. L. Chinarova, P. Dubovsky, W. Han, S. V. Kolesnikov, I. Kudzej, A. Oksanen, A. V. Ryabov, N. M. Shakhovskoy, J. N. Yoon, E. A. Zhuzhulina "Space laboratory to study accretion in magnetic cataclysmic variables: the case of exotic newly-discovered eclipsing polar OTJ 071126+440405", in *Cosmic magnetic fields legacy of A.B. Severny: International Symposium*, Book of abstracts, Nauchny, Crimea, Sept. 2-6, 2013. (Nauchny, Crimea, 2013) P. 7 – 8.
63. I. L. Andronov, K. A. Andrich, O. A. Bodrov, S. V. Kolesnikov "Multi-component variability of stars: the clues from the "inter-longitude astronomy" campaign", International Conf. in Odessa, Gamow 2015 (Odessa 2015) P. 31.
64. N. N. Kiselev, S. V. Zaitsev, V. K. Rosenbush, S. V. Kolesnikov "Polarimetry of saturnian satellite Rhea.", 22-nd Young Sci. Conf. (YSC) on Astronomy and Space Physics, Kyiv, Apr. 20- 25, 2015: Abstracts, (Kyiv, 2015) P. 54.
65. N. N. Kiselev, V. K. Rosenbush, S. V. Zaitsev, S. V. Kolesnikov, D. N. Shakhovskoy "Similarity and diversity of the polarization opposition effects for high-albedo atmosphereless Solar System bodies", Electromagnetic and Light Scattering Conference, 15<sup>th</sup>. (Leipzig, Germany, 2015) Abstracts ELS-XV-2015-45.
66. N. N. Kiselev, D. N. Shakhovskoy, A. V. Dolgopol, K. A. Antoniuk, V. K. Rosenbush, Yu. S. Ivanov, N. V. Karpov, V. K. Taradij, S. V. Kolesnikov "New two- channel photoelectric polarimeters: design and results of the first observations", Intern. Conf. "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University", Kyiv, May 28 - May 31, 2019: book of abstr. P14 2019
67. С. В. Колесніков "Поляриметричні дослідження космічних об'єктів. Методики та результати", International Conference in Odessa, Gamow 2018. Abstracts (Odessa, 2018) P.4-5
68. С. В. Колесніков "Методи поляриметричних досліджень", International Conference in Odessa, Gamow 2019. Abstracts, Odessa, 2019 P.4
69. V. V. Breus, S. V. Kolesnikov, I. L. Andronov "Least squares approach for simultaneous determination of all stokes parameters", XX Gamow International Astronomical Conference-School in Odessa, Gamow 2020. Abstracts Odessa, 2020 P.4
70. S. V. Kolesnikov "Astrophysical highlights of aperture polarimetry obtained at the 2.6m Shain telescope in this century", XX Gamow International Astronomical Conference Odessa, Gamow 2020 Abstracts (Odessa, 2020) P.5

### Цитована література

71. S. Chandrasekhar. “On the radiative equilibrium of a stellar atmosphere. X.” *ApJ*, **103**, 351–370 (1946). DOI: <https://doi.org/10.1086/144816>
72. F. A. Iglesias, A. J. Feller “Instrumentation for solar spectropolarimetry: state of the art and prospects” *Optical engineering* **58** (8), 082417 (2019). <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.8.082417>
73. E. Landi Degl’Innocenti, M. Landolfi, *Polarization in Spectral Lines*, (Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers., 2004)
74. S. Tapia “Discovery of a magnetic compact star in the AM Herculis (3U 1809+50 system)”, *Astrophys. Journ.*, **212**, L125-L129 (1977).
75. Н. М. Шаховской, И. Л. Андронов, С. В. Колесников, А. В. Халевин “Методика измерения круговой поляризации с одноканальным фотополариметром” *Кинемат. и физ. неб. Тел.*, **14**, №5, 468-472 (1998).
76. K. Mukai “Accretion streams in AM Her type systems”, *Mon.Not.R.Astron.Soc.* **232**, 175 – 197 (1988).
77. M. S. Cropper “Polarimetry of QQ Vul”, *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, **295**, 353 – 359 (1998).
78. Р. Е. Гершберг *Активность солнечного типа звезд главной последовательности.* (Антиква, Симферополь 2015).
79. Deeming, T. J. “Fourier Analysis with Unequally-Spaced Data” *Ap&SS*, **36**, 137 – 158 (1975).
80. A. P. Beardmore, J. P. Osborne “Simultaneous rapid hard X – ray and optical variability in AM Herculis: measurement of blob parameters”, *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, **290**, 145 – 159 (1997)
81. J. M. Hameury, A. R. King, J.-P. Lasota, “Accretion flows in the non-synchronous magnetic cataclysmic variables”, *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, **218**, 695 – 710 (1986) DOI: <https://doi.org/10.1093/mnras/218.4.695>
82. P. Heerlein, K. Horne, A. D. Schwope, “Modelling of the magnetic accretion flow in HU Aquarii”, *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, **304**, 145 – 154 (1999) DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02311.x>
83. L. Ferrario, R. Wehrse, “Accretion funnels in AM Herculis systems – I. Model characteristics”, *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, **310**, 189 – 202 (1999). DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02976.x>
84. M. S. Catalan, A. D. Schwope, R. C. Smith, “Mapping the secondary star in QQ Vulpeculae” *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, **310**, 123 – 145 (1999).
85. I. L. Andronov Yu. B. Yavorskij, “On the moments of inertia and radii of the white dwarfs and polytropic stars”, *Contrib. Astron. Obs. Skalnat Pleso*, **20**, 155 – 158 (1990)
86. A. D. Silber, P. Szkody, D. W. Hoard, M. Hammergren, J. Morgan, E. Fierce, K. Olsen, P. A. Mason, R. Rolleston, R. Ruotsalainen, E. P. Pavlenko, N. M. Shakhovskoy, S. Shugarov, I. L. Andronov, S. V. Kolesnikov, T. Naylor, E. Schmidt, “The Noah Project: detection of the spin-orbit beat period of BY Camelopardalis”, *MNRAS*, **290**, 25 – 33 (1997)
87. P. A. Mason, G. Ramsay, I. Andronov, S. Kolesnikov, N. Shakhovskoy, E. Pavlenko, “Evidence for pole switching in the magnetic cataclysmic variable

BY Camelopardalis”, MNRAS, **295**, 511 – 518 (1998).

88. V. Piirola, G. V. Coyne, S. J. L. Takalo, S. Larsson, O. Vilhu, “UBVRI polarimetry of AM Herculis – type binaries. V. The asynchronous polar BY Camelopardalis (H0538+608)”, Astron. Astrophys., **283**, 163 – 174 (1994).

89. A. D. Silber, H. V. Bradt, M. Ishida, T. Ohashi, R. A. Remillard, “H0538+608 (=BY Camelopardalis): an asynchronously rotating AM Herculis binary?”, Astrophys. J., **389**, 704 – 713 (1992).

90. J. Yuan, Z. Li “The nature and applications of an irradiation ionization front in cataclysmic variables”, Astron. Astrophys., **322**, 841 – 845 (1997).

91. K. Wu, H. Pongracic, G. Chanmugam, G. Shaviv “Simulations of quasi – periodic oscillations in accreting white dwarfs”, Publ. Astron. Soc. Australia., **13**, 93 – 96 (1992).

92. Y. Q. Lou “Possible oscillation modes of magnetic white dwarfs”, Mon. Not. R. Astron. Soc., **275**, L11 – L15 (1995).

93. I. L. Andronov “Autocorrelation Function Bias Owed To A Limited Number Of De – trended Observations”, Astron. Nachr., **315** (2) 353 – 370 (1994).

DOI: <https://doi.org/10.1002/asna.2103150506>

94. F. Haberl, J.R. Throstensen, C. Motch, A. Schwarzenberg-Czerny, M. Pakull, A. Sharnbrook, W. Pietsch, “Discovery of the new intermediate polar RXJ0558.0+5353”, Astron. Astrophys., **291**, 171 – 180, (1994).

95. A. Allan, K. Horne, R.W. Hilditch, “RX J0558+53”, IAU Circ. **6154**, 2 (1995).

96. D. R. Skillman “Photometry of the New DQ HER Star, RX J0558.0+5353”, Publ. Astron. Soc. Pacif., **108**, 130 — 133 (1996). DOI: <https://doi.org/10.1086/133701>

97. N.M. Shakhovskoj, S.V. Kolesnikov, IAU Circ., **6760**, 2 (1997).

98. V. Piirola “Polarimetric Analysis of Binary Stars”, In “*Binaries – key to comprehension of the universe*” eds. Andrej Prša and Miloslav Zejda, ASP Conference Series, **435**, 225- 235 (2010).

99. V. Piirola, T. Vornanen, A. Berdyugin, G. V. Coyne, “V405 Aurigae: A High Magnetic Field Intermediate Polar”, Astrophys. J., **684** 558 – 568, (2008).

DOI: <https://doi.org/10.1086/590144>

100. I. B. Vavilova, L. K. Pakulyak, A. A. Shlyapnikov, Yu. I. Protsyuk, V. E. Savanevich, I. L. Andronov, V. N. Andruk, N. N. Kondrashova, A. V. Baklanov, A. V. Golovin, P. N. Fedorov, V. S. Akhmetov, I. I. Isak, A. E. Mazhaev, V. V. Golovnya, N. V. Virun, A. V. Zolotukhina, L. V. Kazantseva, N. A. Virnina, V. V. Breus, S. G. Kashuba, L. L. Chinarova, L. S. Kudashkina, V. P. Epishev, “Astroinformation resource of the Ukrainian virtual observatory: Joint observational data archive, scientific tasks, and software”, Kinematics and Physics of Celestial Bodies, **28** 85 – 102 (2012).

DOI <https://doi.org/10.3103/S0884591312020067>

101. I. L. Andronov, A. V. Baklanov, “Algorithm of the artificial comparison star for the CCD photometry”, Astronomical School Reports **5**, 264 – 272 (2004).

DOI: <https://doi.org/10.18372/2411-6602.05.1264>

102. I. L. Andronov: “(Multi-)frequency variations of stars. Some methods and results”, Odessa Astron. Publ., **7**, 49 – 54 (1994).

103. M. Soma, Th. Hirayama, H. Kinoshita, “Analytical expressions of the earth’s position and velocity for the calculation of apparent positions”, Celest. Mech., **41**, 389 – 410 (1988).

104. Butters O. W., West R. G., Anderson D. R., Collier Cameron A., Clarkson W. I., Enoch B., Haswell C. A., Hellier C., Horne K., Joshi Y., Kane S. R., Lister T. A., Maxted P. F. L., Parley N., Pollacco D., Smalley B., Street R. A., Todd I., Wheatley P. J., Wilson D. M., “The first WASP public data release”, *Astron. Astrophys.*, **520**, L10 P. 4. (2010). DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015655>
105. B. N. Ashoka, T.M.K. Marar, S. Seetha, K. Kasturirangan, J.C. Bhattacharyya, “Detection of optical pulsations from RX J0558.0+5353”, *Astron. Astrophys.*, **297**, L83– L86 (1995).
106. К. Ленг *Астрофизические формулы* (Мир. Москва, 1978) с. 407
107. P.A. Evans, C. Hellier, “Why does the intermediate polar V405 Aurigae show a double-peaked spin pulse?”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **353**, 447 – 452 (2004).
108. G. D. Schmidt and J. E. Norsworthy, “Rotation and Magnetism in White Dwarfs”, *Astrophys. J.*, **366**, 270 – 276, (1991). DOI: <https://doi.org/10.1086/169559>
109. G. Valyavin, K. Antonyuk, S. Plachinda, D. M. Clark, G. A. Wade, Lester Fox Machado, M. Alvarez, J. M. Lopez, D. Hiriart, Inwoo Han, Young-Beom Jeon, S. Bagnulo, S. V. Zharikov, C. Zurita, R. Mujica, D. Shulyak, T. Burlakova, “A Study of the Photometric Variability of the Peculiar Magnetic White Dwarf WD 1953-011”, *Astrophys. J.*, **734**, 17, p.9 (2011). DOI:<https://doi.org/10.1088/0004-637X/734/1/17>
110. G. Valyavin, D. Shulyak, G. A. Wade, K. Antonyuk, S. V. Zharikov, G. A. Galazutdinov, S. Plachinda, S. Bagnulo, L. Fox Machado, M. Alvarez, D. M. Clark, J. M. Lopez, D. Hiriart, Inwoo Han, Young-Beom Jeon, C. Zurita, R. Mujica, T. Burlakova, T. Szeifert, A. Burenkov, “Suppression of cooling by strong magnetic fields in white dwarf stars”, *Nature* **515**, 88-91, (2014). DOI: <https://doi.org/10.1038/nature13836>
111. G. A. Wade, S. Bagnulo, T. Szeifert, C. Brinkworth, T. Marsh, J. D. Landstreet, P. Maxted, “The Magnetic White Dwarf WD 1953-011: Migrating Magnetic and Brightness Spots?”, *ASP Conf. Ser.*, **307**, 569-572 (2003).
112. C. S. Brinkworth, M. R. Burleigh, K. Lawrie, Th. R. Marsh, Chr. Knigge, “Measuring the Rotational Periods of Isolated Magnetic White Dwarfs”, *Astrophys. J.*, **773**, 47(16pp) (2013). DOI: <https://doi.org/10.1088/0004-637X/773/1/47>
113. I. I. Romanyuk, “Magnetic fields of chemically peculiar and related stars. 2. Main results of 2015 and near-future prospects”, *Astrophysical Bulletin*, Volume 71, Issue 3, P.314-329 DOI: 10.1134/S1990341316030068
114. I. Romanyuk, D. Kudryavtsev, E. Semenko, and A. Moiseeva, “Magnetic stars with wide depressions in the continuum. 1. The Ap star with strong silicon lines HD5601”, *Astrophysical Bulletin*, **71**(4), 447-452, (2016). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990341316040076>
115. B. Lyot, “Recherches sur la polarisation de la lumiere des planetes et de quelques substances terrestres”, *Ann. Obs. Meudon*, **8**, (1) 1-161 (1929)

#### АНОТАЦІЯ

**Колесніков С. В. Особливості поляризованого випромінювання небесних тіл різної природи.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – астрофізика, радіоастрономія (10 – природничі науки, 104 – фізика та астрономія). – Одеський національний університет імені І. І. Мечникова МОН України, Одеса; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена результатам дослідження кругової і лінійної поляризації у різних астрономічних об'єктів. Багаторічне дослідження групи полярів дозволило не тільки експериментально визначити низку характеристик цих пізніх тісних подвійних зоряних систем, поки не доступних для теоретичного моделювання, але й істотно змінило існуючі модельні уявлення про них. Істотні зміни у розумінні природи об'єкта викликали результати кругової поляриметрії і для одиночного білого карлика. Ці та інші результати були отримані автором дисертації при проведенні більш ніж 15-річного поляриметричного моніторингу, виконаного автором дисертації на найбільшому телескопі України за допомогою розробленого і виготовленого їм поляриметра для вимірювання повних параметрів Стокса. Висока ефективність використаного в приладі методу швидкої повної модуляції доведена і результатами досліджень обраних малих тіл Сонячної системи, так само отриманими автором дисертації.

**Ключові слова:** кругова поляриметрія, лінійна поляриметрія, метод швидкої модуляції, поляри класичні, поляри асинхронні, поляри проміжні, білі карлики, супутники великих планет, астероїди, комети, стандарти великої та малої поляризації, методи обробки поляриметричних спостережень.

## ANNOTATION

**Kolesnikov S. V. Peculiarities of the Polarized Radiation of Celestial Bodies of Different Nature.** – Qualification scientific work on the form of a scientific report.

The thesis of the Doctor's degree of physical and mathematical sciences, speciality 01.03.02 – astrophysics, radio astronomy, (10 – Natural Sciences; 104 – Physics and Astronomy). – Odessa I. I. Mechnikov National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa; Main Astronomical Observatory National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to the results of the study of circular and linear polarization in various astronomical objects. The applicant is the author of the “ZTSh polarimeter with a fast rotating modulator” (ZTSh - the Shain 2.6-meter mirror telescope) and has more than 25 years of experience in measuring broadband circular polarization of stars. Until 2001, the author obtained the world's largest base of uniform photopolarimetric measurements of a group of close binary systems with different magnetic field strengths in the mode of measuring circular polarization on a 2.6-meter telescope. It contains about 300 series of measurements of the investigated and reference objects. In this work, started in 2001, the author significantly expanded the capabilities of the device, moving on to measurements of the total Stokes parameters, without violating the homogeneity of the series of measurements. At the same time, various bodies of the solar system were added to the objects of study, and by the end of the project more than 1100 series of measurements of the investigated and reference objects were obtained.

The purpose of this work was to revise the existing model concepts of objects showing a change in one Stokes parameter by studying the behavior of the total Stokes parameters in long and homogeneous series of measurements. The goals are to increase the amount of reliable data on the total polarization parameters for objects of various natures and to develop a method of polarimetry with fast modulation speed, which we have previously introduced into active use. This method, the most effective in real conditions, was the main research method along with the methods of numerical analysis and mathematical statistics used in the processing and analysis of observational data. The results of the analysis of the obtained data are presented.

In particular, using the example of the classical polar QQ Vul and asynchronous polar BY Cam, it is shown that the majority of flares in long-period polars occur outside the boundaries of accretion columns. Otherwise, all the results obtained are in good agreement with the existing qualitative models of these systems. A number of characteristics were obtained, such as the linear size of the droplets, the delay time between successive flares, and the average time of falling clumps in the accretion stream for QQ Vul.

For BY Cam, a number of wavelength dependences were obtained that allow one to isolate and analyze the contribution of various physical mechanisms to the luminosity of the system. Among them: the obtained observational confirmation of the presence of several radiation sources in the luminosity of the system - in order of decreasing temperature: “white dwarf + red dwarf”, “accretion structures that change with orientation” and “accretion structures that do not change. change with orientation”. A number of dependences on the state of the average brightness of the system. For example, in the bright state, more than one accretion region with different physical conditions is observed: shot noise with  $\tau \approx 20$  s is associated with a redder one, and fractional noise with  $\tau \approx 60$  s is associated with a hotter accretion spot. And also a number of general dependencies, such as: inhomogeneities in the structure of the accretion stream have the same temporal characteristics and flare activity, that is, the latter has the character of shot noise; The optimal mathematical model for the four basic brightness variations corresponds to the fourth order trigonometric polynomial. The resulting dependencies can be used in modeling both these systems and objects of these types.

For the intermediate polar V405 Aur, the model of two almost equatorial columns put forward by us earlier is fully confirmed, two possible variants of its development are proposed. Choosing between them will allow for subsequent observational tests. The magnetic nature of the variability of the single white dwarf WD1748 + 708 has been proved.

The high efficiency of the fast modulation method for polarimetric measurements has been experimentally proven even in non-photometric weather conditions. This is confirmed by a number of results obtained jointly with co-authors in the study of objects in the solar system.

**Key words:** circular polarimetry, linear polarimetry, fast modulation method, classical polars, asynchronous polars, intermediate polars, white dwarfs, satellites of major planets, asteroids, comets, high and low polarization standards, methods for processing polarimetric observations.