

ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ
АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

На правах рукопису
УДК 524.3

МИХАЙЛО ЮЛІЯНОВИЧ СКУЛЬСЬКИЙ

БУДОВА ВЗАЄМОДІЮЧОЇ СИСТЕМИ БЕТА ЛІРИ
НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Спеціальність 01.03.02- астрофізика,
радіоастрономія

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора фізико-математичних наук
у формі наукової доповіді

Київ-1993

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00803119 (M)

ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ
АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

На правах рукопису
УДК 524.3

МИХАЙЛО ЮЛІЯНОВИЧ СКУЛЬСЬКИЙ

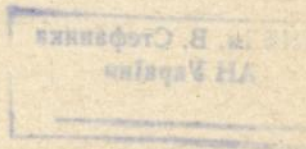
БУДОВА ВЗАЄМОДІЮЧОЇ СИСТЕМИ БЕТА ЛІРИ
НА ОСНОВІ СПЕКТРАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Спеціальність 01.03.02- астрофізика,
радіоастрономія

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора фізико-математичних наук
у формі наукової доповіді

Київ-1993

М. Скульський



РОБОТА ВИКОНАНА У ЛЬВІВСЬКОМУ ПОЛІТЕХНІЧНОМУ ІНСТИТУТІ

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
ВІТАЛІЙ ГЕРАСИМОВИЧ ГОРБАЦЬКИЙ
Санкт-Петербурзький університет

доктор фізико-математичних наук, професор
ІВАН АНТОНОВИЧ КЛИМИШИН
Прикарпатський університет

доктор фізико-математичних наук, професор
ВІКТОР МИХАЙЛОВИЧ ЛЮТИЙ
Кримська лабораторія ДАШ Московського університету

Ведуча установа - КРИМСЬКА АСТРОФІЗИЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Захист відбудеться 3 червня 1993 року на засіданні
Спеціалізованої ради Д 016.14.01 при Головній астрономічній
обсерваторії АН України за адресою: м. Київ - 252127,
Голосіївський ліс; засідання починається о 12-й годині.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Головної
астрономічної обсерваторії АН України.

Дисертацію розіслано 27 квітня 1993 року.

Вчений секретар Спеціалізованої ради
кандидат фізико-математичних наук Н.Г. ГУСЕВА

ЗМІСТ

1.	Загальна характеристика роботи.....	5
1.1.	Актуальність і мета роботи.....	5
1.2.	Наукова новизна та практична цінність.....	6
1.3.	Достовірність результатів та висновків.....	9
1.4.	Вклад автора.....	9
1.5.	Апробація роботи.....	10
1.6.	Основні результати, що виносяться на захист дисертації.....	11
2.	Отримання спектрального матеріалу: телескопи, апаратура.....	14
3.	Абсолютна спектрофотометрія і моделювання континууму в Лірі.....	16
4.	Виявлення ліній вторинного компонента у спектрах в Лірі й ру Щита та визначення мас	19
4.1.	Дослідження спектру в Лірі та перші ототожнення ліній поглинання вторинного компонента.....	19
4.2.	Розрахунок синтетичного спектру системи в Лірі: підтверд- ження присутності ліній вторинного компонента.....	21
4.3.	Параметри орбіт обох компонентів системи в Лірі й остаточне визначення їх мас.....	23
4.4.	Ототожнення ліній поглинання вторинного компонента в спектрі ру Щита й параметри орбіти системи.....	26
4.5.	Розробка незалежного способу визначення мас компонентів у взаємодічній системі по спектру її розвинутих навколозоря- них структур та його апробація.....	28
5.	Відкриття та вивчення магнітного поля в системі в Лірі.....	32
5.1.	Отримання зееманівських спектрограм на 6-м телескопі та ви- явлення магнітного поля в атмосфері яскравого компонента.....	32
5.2.	Результати вивчення магнітного поля фотографічним способом.....	33
5.3.	Пошуки незалежних аргументів підтвердження магнітного поля: а) виявлення депресії континуума на $\lambda 5200$ та її змінність; б) спостереження за допомогою фотоелектричного магнітометра з еталоном Фабрі-Перо.....	36
5.4.	Вивчення магнітного поля в лініях Si III $\lambda 6347,6371$ за допо- могою зееманівських ПЗС-спектрограм: незалежне підтвердження й особливості поведінки поля яскравого компонента і перше його виявлення у вторинного.....	38

6.	Результати дослідження емісійного спектру системи β Ліри.....	41
6.1.	Вивчення емісійних ліній спектрофотографічним способом.....	41
6.2.	Спектроскопія високої часової роздільності в околі $\text{H}\alpha$	43
6.3.	Абсолютна спектрофотометрія в області емісійної лінії $\text{H}\alpha$: а) квазіперіодичні процеси за спостереженнями 1978-1979 рр.; б) пофазна кореляція змінності в абсолютному потоці випромінювання в $\text{H}\alpha$ -емісії та у магнітному полі.....	45
6.4.	Спектроскопія в околі емісійних ліній з ПЗС-детектором: а) каталог $\text{H}\alpha$ -емісій, їхні енергетика та динаміка, кореляція зі змінністю магнітного поля; б) змінність емісії ліній $\text{HeII}\lambda 6678, 7065, \text{SiII}\lambda 6347, 6371$	49
6.5.	Особливості емісійного спектру системи γ Щита (небулярні лінії) та його подібність зі спектром β Ліри.....	55
7.	Характерні особливості абсорбційного спектру розвинених навологізоряних газових структур у системах β Ліри й γ Щита.....	59
7.1.	Створення віялоподібної системи газових потоків під впливом магнітного поля яскравого компонента β Ліри.....	59
7.2.	Переміщення газових мас всередині системи γ Щита.....	62
7.3.	Кінематичні характеристики стаціонарних газових оболонок поза межами взаємодіючих систем β Ліри й γ Щита.....	63
7.4.	Лінії-сателіти спектра β Ліри як відображення обертання сателіт-диска довкола акреційного вторинного компонента.....	66
7.5.	Міжсезонна змінність в лініях $\text{SiII}\lambda 6347, 6371$ й ознаки прецесійного руху сателіт-диска.....	70
8.	Деякі нові явища й еволюційний статус β Ліри й γ Щита.....	75
8.1.	Феномен циклічних змін еквівалентних ширин ліній поглинання атмосфери яскравого компонента β Ліри.....	75
8.2.	Осциляції та резонанси в системі β Ліри і можливе збудження нерадіальних коливань яскравого компонента.....	80
8.3.	Хімічний склад і еволюційний стан систем β Ліри й γ Щита: а) особливості вивчення хімічного складу яскравого компонента β Ліри і будови його атмосфери; б) хімічний склад небулярних структур системи γ Щита як відображення втрати речовини яскравим компонентом.....	84
9.	Узагальнюючі підсумки.....	90
	Цитована література і список публікацій по темі дисертації.....	93

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ.

1.1. Актуальність і мета роботи.

Дослідження взаємодіючих подвійних систем є одним із пріоритетних напрямків у сучасній астрофізиці. Із відкриттям релятивістських компонентів найінтенсивніше спостерігаються взаємодіючі системи на еволюційному етапі зворотнього переносу речовини на акреціючий супутник, що є, скажімо, нейтронною зорею. Втім, не менш актуальним повинно бути дослідження взаємодіючих систем, особливо масивних, до моменту колапсу одного із компонентів. В основному це є системи типу W Змії, об'єднані як такі, що спостерігаються наприкінці етапу першого переносу маси яскравого компонента на супутник, який ще не проеволюціонував і звичайно є невидимим у спектрі системи [1]. При швидкоплинності процесу обміну речовиною (10^4 - 10^5 років) число таких об'єктів є малим [2]. Різноманітність та малочисельність систем типу W Змії досі не дозволяє надійно встановити їх характеристики як певного класу об'єктів. Має сенс сконцентрувати спостереження на окремих системах із подальшим виявленням їх генетичного взаємозв'язку, позаяк серед них є дуже оригінальні. Перш за все це стосується масивних та гарячих систем β Ліри й KY Цита: серед подвійних зір типу W Змії їх можна виділити в окрему підгрупу завдяки розвинутим навколосоряним газовим структурам, що виникли при крупномасштабній взаємодії компонентів.

Щодо системи β Ліри, то вона завше вважалась унікальною подвійною [3-5] і при відносно високій яскравості інтенсивно спостерігалась: після Сонця у неї найдовший ряд публікацій [6] з регулярними їх оглядами, скажімо, [7,8]. Активність її вивчення дещо згасла всередині 1970-х років при зміщенні інтересу до систем із релятивістським компонентом і вичерпанні традиційних методів і аргументів для створення узгодженої картини будови цієї системи. У цей час найбільший прогрес в її вивченні здобутий позаатмосферними методами. Можна відзначити виявлення ліній високого збудження [9], а, в подальшому, і надлишок випромінювання в континуумі далекого ультрафіолета [10]. Втім, їх інтерпретація неоднозначна: від малосприйнятної тепер гіпотези про чорну діру в центрі масивного

вторинного компонента [9,11], до ударних процесів, що виникають поміж компонентами при їх крупномаштабній взаємодії [12,13]. Потрібні були більш точні спостереження; відчувалось, що в системі мусять мати місце невиявлені досі явища. Це вимагало нових підходів до дослідження системи і довготривалої роботи на перспективу.

Введення в дію 6-м телескопа, задіяння на ньому та інших потужних телескопах якісно нової апаратури, зродило надію на вирішення давно назрілих завдань у дослідженні системи β Ліри та можливого виявлення нових явищ. Скажімо, використання ІЗС-детекторів при високих спектральному розділенні та відношенні сигнал/шум забезпечувало водночас високу точність вимірів доплерівських зміщень. Передбачалось впевнене ототожнення слабких ліній вторинного компонента, вперше виявлених нами [14], й довгождане визначення мас компонентів і розмірів системи. Використання детекторів низького шуму могло мати кардинальне значення у вивченні складних емісійно-абсорбційних ліній, а, відтак, у створенні картини навколосоряних газових утворень. Нові аспекти розуміння природи цього об'єкту з'явилися, коли при спостереженнях на 6-м телескопі ми виявили [15] поверхневе магнітне поле яскравого компонента β Ліри. Першочерговим завданням стало дослідження характеру змінності магнітного поля впродовж орбітального циклу, а, в подальшому, і його впливу на формування картини переносу речовини з цього компонента.

Із врахуванням означених вище та інших завдань основною метою нашої роботи було їх вирішення за допомогою комплексу спектральних досліджень та отримання узгодженої картини будови й адекватного розуміння природи взаємодіючої масивної системи β Ліри.

1.2. Наукова новизна і практична цінність роботи.

Наукова новизна роботи полягає в постановці завдання детального дослідження взаємодіючої системи β Ліри на основі ряду всебічних і багатосезонних спостережень на крупних телескопах з якісно новою апаратурою з метою отримання узгодженої картини її будови, а також у важливих астрофізичних результатах, отриманих у процесі таких спостережень і їх обробки, теоретичного моделювання й аналізу даних, які або істотно розширюють наші уявлення про процеси, що відбуваються у системі, або є вперше виявленими явищами, які внесли

нове розуміння природи і будови взаємодіючої системи β Ліри та, демонструючи практичну цінність, природи тісних подвійних систем подібних типів. Відзначимо такі основні моменти.

1. Вперше для системи β Ліри проведено абсолютну спектрофотометрію в області довжин хвиль 3300-7400 Å в основних фазах орбітального періоду та теоретичне моделювання композиційного континууму системи. Це привело до впевненого визначення трьох основних складових у цій області спектра: випромінювання компонентів типу B8III та A5III, а також іонізованої водневої оболонки з електронною температурою ≈ 20000 K.

2. Вперше, у спектрі системи β Ліри були ототожнені неглибокі лінії поглинання вторинного, але більш масивного компонента, який ще не проеволюціонував. Спостереження з використанням ПЗС-детектора забезпечили одночасне визначення параметрів орбіти обох компонентів та остаточне встановлення величини їх маси та розмірів системи β Ліри. Застосовуючи подібну методику, також вперше ототожнено лінії поглинання вторинного компонента і визначено маси обох компонентів у взаємодіючій системі RY Щита такого типу.

3. Розроблено, теоретично обґрунтовано та апробовано спосіб незалежного визначення мас компонентів взаємодіючих систем. Він має практичне застосування в разі присутності у спектрах таких систем ліній одного з компонентів, але при наявності певного типу розвинених газових структур, що відображають кінематику переносу речовини всередині системи, а також втрати маси поза її межі. Застосований до систем β Ліри та RY Щита, він, після ототожнення ліній вторинного компонента, дав добре узгодження з традиційним способом визначення мас при наявності у спектрі системи ліній обох компонентів, показавши тим самим добрі прогностичні можливості.

4. Вперше виявлено та досліджено (на основі поставленої задачі отримання на 6-м телескопі зееманівських спектрограм) магнітне поле яскравого компонента, який водночас активно втрачає масу в процесі своєї еволюції в системі β Ліри; це є першим виявленням магнітного поля для подвійних взаємодіючих систем подібного типу. Незалежно, за допомогою стоксметра та ПЗС-детектора, встановлених на 2.6-м телескопі, вивчено магнітне поле в лініях SiII $\lambda\lambda 6347, 6371$, які формуються у зовнішніх шарах атмосфери яскравого компонента, і зроблено висновок, що поле в цій атмосфері спадає назовні.

5. Виявлено та досліджено явище циклічної змінності еквівалентних ширин ліній поглинання яскравого компонента вздовж фази орбітального періоду. Показано, що ця змінність одночасно модулюється гравітаційним та магнітним полями.

6. В результаті вивчення динаміки навколосоряних структур в околі компонентів показано, що магнітне поле яскравого компонента, який втрачає масу, істотно впливає на загальну картину локалізації та формування цих структур, зокрема, що стосується витoku та переносу речовини вздовж силових ліній магнітного поля та подальшої її акреції на вторинний компонент. Особливо активною зоною витoku речовини з поверхні яскравого компонента є зона того магнітного полюса, який звернений до масивного акреціуючого компонента.

7. Виявлені і вивчені швидкісні процеси взаємодії у системі β Ліри, зокрема на основі вперше проведеної спектроскопії високої часової роздільності (секунди-хвилини) як з дисекторним спектрофотометром на 6-м телескопі, так і з ПЗС-детектором на 2.6-м телескопі. Швидкі флуктуації потоку в $\text{H}\alpha$ -емісії свідчать про неізотропний і неламінарний характер витoku і переносу речовини між компонентами.

8. Висунуто гіпотезу, яка пояснювала появу в спектрі системи β Ліри ліній-сателітів тільки у фазах до та після центра головного затемнення обертанням довкола акреціуючого компонента деякого зовнішнього газового кільця; подальші спостереження за допомогою ПЗС-детектора підтвердили це як певне явище й привели до виявлення міжсезонних змін у русі цього т.зв. сателіт-диска.

9. Вперше проведене визначення хімічного складу в системі RY Щита, а також дослідження визначуваності хімічного складу й особливостей будови атмосфери яскравого компонента β Ліри, який водночас втрачає масу. Основний висновок зводиться до того, що яскравим компонентам обох систем притаманна продвинута стадія еволюції, коли в їх надрах пройшло вигорання водню в реакціях CNO-циклу. Це передусе етапові бурхливого обміну речовиною між компонентами системи і призводить до утворення розвинених навколосоряних структур подібної будови: системи газових потоків, дископодібних структур довкола акреціуючого компонента, оболонок, що покидають систему.

10. Результати вирішення комплексу завдань на базі всебічних спектральних досліджень дали узгоджену картину будови масивної

взаємодійної системи β Ліри і призвели до більш повного розуміння як її природи, так і інших тісних подвійних систем типу W Змії на еволюційній стадії першого обміну масою поміж їх компонентами.

1.3. Достовірність результатів та висновків.

Результати спостережень забезпечені високою внутрішньою точністю спектрофотометричних систем спектрографів та іншої апаратури 2.6-м та 6-м телескопів, як основних у наборі високоякісного спектрального матеріалу, використанням великих об'ємів інформації, отриманих впродовж багатьох сезонів спостережень. Аналіз результатів показав, що їх рівень істотно перевищує похибки спостережень, ряд результатів та висновків підтверджені іншими авторами. Деякі виявлені нами явища докорінним чином впливають на нове розуміння природи та будови системи β Ліри. В такому разі їх достовірність підтверджена циклом спостережень впродовж багатьох сезонів, внутрішнім їх узгодженням з іншими результатами, застосуванням більш досконалої апаратури і методики обробки. Перш за все це стосувалось проблеми виявлення в спектрі системи ліній вторинного компонента, а також відкриття магнітного поля яскравого компонента. Задача ототожнення ліній вторинного компонента, вперше виконана фотографічним способом, згодом успішно завершена при допомозі ПЗС-детектора, встановленого на 2.6-м телескопі. Прогностичні можливості запропонованого нами нового способу визначення мас обох компонентів (при наявності в спектрі подвійної системи ліній тільки одного із компонентів та певних ліній, утворених у навколосоряних газових структурах) був повністю підтверджений при ототожненні ліній вторинного компонента в системах β Ліри та RV Щита. Магнітне поле яскравого компонента, виявлене фотографічним способом за допомогою зеєманівських спектрограм, отриманих на 6-м телескопі, згодом підтверджене незалежно при спостереженнях β Ліри на 2.6-м телескопі з використанням системи стоксметр плюс ПЗС-детектор.

1.4. Вклад автора.

Автор впродовж чверті століття послідовно проводив всебічне спектральне вивчення перш за все взаємодійної системи β Ліри.

Більшість із 60 статей по темі дисертації автором виконані самостійно. Сюди входять дослідження, що стосуються виявлення ліній вторинного компонента й визначення мас компонентів подвійної системи β Ліри й κ Цита; розробки й апробації незалежного способу визначення мас компонентів у взаємодіючих системах із розвиненими навколосоряними структурами певної динаміки; дослідження й інтерпретації явища ліній-сателітів у спектрі системи; сформулювання задачі виявлення й вивчення магнітного поля яскравого компонента, вивчення його впливу на процеси переносу речовини в системі β Ліри.

У спільних працях автору належить формулювання завдань досліджень, їх аналіз та інтерпретація результатів, написання статей. Є праці, виконані співавторами як спеціалістами на стику певних галузей астрофізики. Тоді вони виконували притаманну їм частину роботи, що або відносилась до теоретичних розрахунків та моделювання певних процесів /В.В.Головатий, А.Г.Косовічев, Г.А.Топільська/, або визначалась забезпеченням спостережень на оригінальній апаратурі співавторів із специфічною методикою обробки даних, що переважно було пов'язано з нашими заявками у Комісію тематики крупних телескопів /Т.А.Алексеев, В.І.Бурнашев, Р.М.Вест, Ю.Ф.Мальков, І.Д.Найдьонов, С.І.Плачинда/. У цих статтях вклад автора і співавторів можна вважати рівноцінним.

1.5.Апробація роботи.

У процесі виконання роботи її поточні результати неодноразово доповідались та обговорювались на астрофізичних семінарах різних астрономічних та астрофізичних обсерваторій, зокрема, Львівської, Головної АН України (м.Київ), Кримської, Онджейовської (Чехія), Спеціальної, Шемахинської, Варшавського і Московського Астрономічних інститутів та інших. Результати роботи апробувались на багатьох всесоюзних та міжнародних нарадах. Зокрема, від 1981р. було зроблено 18 доповідей з їх публікацією в таких збірниках праць:

підкомісії "Магнітні зорі" багатостороннього співробітництва академії соціалістичних країн по проблемі "Фізика і еволюція зір" (Нижній Архиз, 1981; Рига, 1984);

підкомісії "Подвійні зорі" багатостороннього співробітництва академії соціалістичних країн по проблемі "Фізика та еволюція зір"

(Тбілісі, 1984);

колоквиума MAC N90 "Upper Main Sequence Stars With Anomalous Abundance" (Научний, Крим, 1985);

всесоюзної наради "Зорі типу Вольфа-Райє та споріднені їм об'єкти" (Ельва, Естонія, 1986);

XIX всесоюзної конференції дослідників змінних зір (Одеса, 1987);

всесоюзної наради "Нестационарні процеси в тісних подвійних системах" (Тиравере, Естонія, 1987);

міжнародної наради "Magnetic Stars" (Нижній Архиз, 1987);

міжнародної наради "Hot chemically peculiar and magnetic stars" (Потсдам-Бабельсберг, Німеччина, 1989);

міжнародної конференції "Physics and evolution of stars" (Татранська Ломніца, Словаччина, 1990);

міжнародної конференції "Stellar magnetism" (Нижній Архиз, 1990).

По темі дисертації є 60 наукових публікацій, 46 з них приведено у списку праць, в яких опубліковані основні результати.

1.6. На захист дисертації виносяться:

1. Результати абсолютної спектrophотометрії взаємодіючої системи β Ліри, проведеної в основних фазах орбітального періоду випродовж шести сезонів, що зводяться до трьох основних:

за допомогою теоретичного моделювання континууму встановлено, що композиційний спектр системи β Ліри в області 44300-74000 найбільш достовірно представляється випромінюванням зір типу B8III та A5III, а також газової оболонки з електронною температурою $T_e \leq 20000\text{K}$;

ототожено депресію в континуумі системи β Ліри на 452000 та виявлено чітку кореляцію зміни її еквівалентної ширини із зміною з фазою ефективної напруженості магнітного поля яскравого компонента;

виявлено змінність абсолютного потоку випромінювання в емісії лінії H α в її чіткій кореляції з характером змінності ефективної напруженості магнітного поля яскравого компонента.

2. Результати роботи по дослідженню композиційних спектрів взаємодіючих систем β Ліри та HV Щита з метою виявлення ліній вторинних компонентів, що привело до:

ототоження ліній вторинного за світністю, але масивнішого компонента й остаточного вирішення проблеми визначення мас обох

компонентів (3 та $13.4 M_{\odot}$) та абсолютних розмірів системи β Ліри;

вперше визначених мас обох компонентів (9 та $26 M_{\odot}$), а також параметрів орбіти системи RY Щита;

розробки й апробації нового способу визначення мас компонентів у взаємодіючій системі по спектру її розвинутих газових структур.

3. Відкриття та дослідження поверхневого магнітного поля яскравого компонента β Ліри та споріднених з цим явищ, проведене:

за допомогою зеєманівських спектрограм, отриманих на 6-м телескопі Спеціальної астрофізичної обсерваторії, та його незалежне підтвердження і дослідження в іншій ділянці спектра на більш досконалішій апаратурі (стоксметр плюс ПЗС-детектор), встановлених на 2,6-м телескопі Кримської астрофізичної обсерваторії.

4. Результати дослідження динаміки й енергетики емісійно-абсорбційних ліній спектра β Ліри й RY Щита, основними з яких є:

виявлення та докази впливу магнітного поля на процеси, які проходять на поверхні яскравого компонента β Ліри, а також на процеси втрати ним речовини та формування емісійних газових утворень в його околі, їх структуру та динаміку, з висновком про існування магнітосфери навколо нього та вірогідну магнітну взаємодію з акреційними структурами вторинного компонента;

виявлення та вивчення картини швидкісних процесів при обміні речовиною у системі β Ліри на основі спектроскопії високої часової роздільності, яка стверджує неізотропний і неламінарний характер витікання речовини та процесів її переносу;

результати вивчення феномена ліній-сателітів як ліній, що спостерігаються в спектрі β Ліри тільки у певних фазах до і після центра головного затемнення, та доказ їх виникнення в гіпотезі сателіт-диска певної форми, який обертається довкола акреціюючого компонента, з виявленням міжсезонних змін у русі сателіт-диска;

дослідження кінематичних та енергетичних характеристик навколосоряних газових структур в системі RY Щита в їх спорідненості та у відмінності з такими ж у взаємодіючій системі β Ліри.

5. Результати дослідження параметрів атмосфери яскравого компонента β Ліри, який втрачає масу, та хімічного вмісту елементів у системах β Ліри та RY Щита, основними з яких є такі:

виявлення та дослідження феномена циклічних змін еквівалентних

ширин ліній поглинання атмосфери яскравого компонента з фазою орбітального періоду з висновком про одночасний вплив на це явище магнітного та гравітаційного полів;

виявлення у системі β Ліри осциляцій і резонансів та можливості збудження нерадіальних коливань zdeформованого яскравого компонента;

дослідження хімічного складу систем β Ліри та γ У Кита з висновком про притаманність продвинутої стадії еволюції їх яскравим компонентам внаслідок вигорання водню в їх надрах в реакціях CNO-циклу, що спричинило сучасну активну стадію першого обміну мас у цих масивних системах із утворенням розвинених газових структур в околі обох компонентів.

6. Сучасна картина будови взаємодіючої подвійної системи β Ліри, отримана на основі виконання комплексу спектральних досліджень з метою вирішення давно назрілих завдань, також на основі відкриття і дослідження в ній нових явищ (схематичне уявлення про модель системи можна скласти з рис.1, який дається також як орієнтування при подальшому викладі результатів роботи).

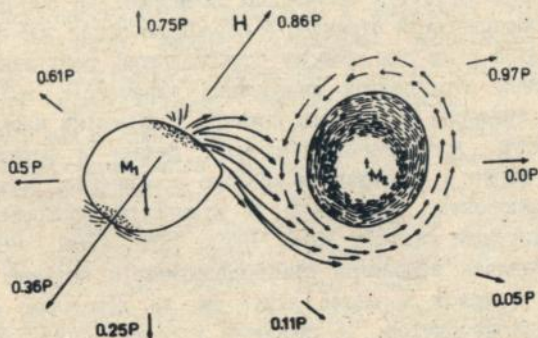


Рис.1. Схематична модель взаємодіючої системи β Ліри з картиною витоку речовини вздовж силових ліній магнітного поля яскравого компонента (M_1) із області полюса, зверненого до вторинного

компонента. В зоні гравітаційного впливу масивного акреційного супутника (M_2) утворюється віялоподібна система газових потоків і формується кільцеподібна структура з сателіт-диском в її зовнішній околі. Модель дається в масштабі, в якому одиницею є відстань між центрами зір; ϕ - центр мас подвійної системи. Виділені фази двох основних осей гравітаційної: 0.5-0.0P і магнітної: 0.36-0.86P та перпендикулярних до них напрямів, а також фаза 0.97P затемнення області магнітного полюса сателіт-диском і фаза 0.05P спостереження основного газового потоку в напрямі на яскравий компонент.

2. ОТРИМАННЯ СПЕКТРАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ: ТЕЛЕСКОПИ, АПАРАТУРА, МЕТОДИ.

Спектральний матеріал, який став основою нашого дослідження системи β Ліри та, врешті, дисертаційної роботи, отриманий при майже щосезонних спостереженнях впродовж 1966-1992 рр. на телескопах Кримської, Спеціальної та Шемахинської астрофізичних обсерваторій. Ми виділили тут основні напрямки спектральних спостережень та їх часові відтинки. Перший етап спостережень відноситься до 1966-1978 рр., коли на 1.22-м, 2.6-м телескопах Кримської та 2,0-м телескопі Шемахинської обсерваторій отримано й оброблено понад 700 спектрограм з дисперсією 4-35 Å/мм при кращому спектральному розділенні в 0,1Å. Основні завдання стосувалися визначення параметрів орбіти та їх вікових змін, вивчення емісійного спектру і динаміки навколосоряних газових структур, дослідження хімічного складу і пофазної зміни еквівалентних ширин в атмосфері яскравого компонента, пошуків ознак вторинного компонента. Паралельно в Кримській обсерваторії була розпочата і впродовж сезонів 1974, 1978, 1979, 1980, 1984 та 1985 років виконувалась абсолютна спектрофотометрія системи β Ліри в 3300-7500Å, а також в околі лінії H α за допомогою скануючого щілинного спектрофотометра, що працював у режимі фіксованих довжин хвиль із розділенням 30Å. Питання редукції багаторічних спостережень, абсолютної калібровки апаратури приведені в [16,17].

З 1980 по 1991 рр. майже щорічно проводились спостереження на основному зоряному спектрографі (ОЗСП) 6-м телескопа Спеціальної астрофізичної обсерваторії. Ставилось завдання виявлення, а потім набору матеріалу для достовірного вивчення поведінки магнітного поля

яскравого компонента β Ліри. Воно виконане на основі отримання близько 400 зееманівських спектрограм на 2-й камері ОЗСП (дисперсія 9 А/мм) при використанні ахроматичного аналізатора кругової поляризації з ромбом Френеля як фазозсувним елементом [18], а також фотоелектричного магнітометра з еталоном Фабрі - Перо [19] як альтернативної апаратури. Встановлений в 1-й камері ОЗСП, він дозволяв працювати з більш високим спектральним розділенням - 0.1А. В 1981 р. на 6-м телескопі була проведена також швидкісна спектроскопія з 5 та 10 секундними послідовними експозиціями на базі дисекторного спектрофотометра, спряженого з спектрографом СП-124. Обробка понад 600 спектрів дала уяву про картину швидкісної змінності спектра β Ліри в області лінії H α . Апаратура та статистичні методи обробки інформації описані в [20,21].

Хронологічно останній блок спостережень системи β Ліри знову виконаний у Кримській обсерваторії в 1985-1992 рр. (особливо інтенсивно в 1990-1992 рр.) за допомогою ПЗС камер CCD-2000 (фірма "Астромед", Кембрідж, Англія) та CCD-580 (фірма "Іста", Санкт-Петербург), встановлюваних у фокусі куде 2.6-м телескопа. Основні характеристики цих систем описані в [22,23]. Оброблено понад 300 ПЗС-спектрограм з дисперсією 0.05 та 0.1 А/піксел. Основні завдання цих спостережень полягали у виявленні ліній вторинного компонента, точному вимірі променевих швидкостей ліній обох компонентів, дослідженні динаміки, енергетики та просторової конфігурації навколосоряних газових структур. В 1991-1992 рр. здійснювалась також програма дослідження магнітного поля яскравого компонента на незалежній апаратурі (стоксметрі, спряженому з ПЗС-детектором), розроблений у Кримській обсерваторії [24].

У роботі використані результати нашого дослідження спектра взаємодіючої системи RY Щита як системи, спорідненої з β Ліри. Це становило самостійний інтерес і мало певний сенс при порівнянні їх характеристик. Воно проведене на основі спектрограм, отриманих нами спільно з групою спостерігачів по координованій програмі 1981 р. на 6-м телескопі [25], а також на базі наданих у наше розпорядження регістрограм спектрів RY Щита, отриманих Р.М.Вестом того ж 1981 р. на 1,5-м телескопі Південної Європейської обсерваторії (ESO).

3. АБСОЛЮТНА СПЕКТРОФОТОМЕТРІЯ І МОДЕЛЮВАННЯ КОНТИНУУМУ СИСТЕМИ β ЛІРИ.

Історично найбільшу кількість робіт, опублікованих стосовно системи β Ліри, складають фотометричні. Одначе, як з'ясувалось, не була проведена абсолютна фотометрія цієї системи. Потребу в ній ми вже мали при створенні атласу контурів найсильніших емісійних ліній в абсолютних одиницях [26], коли прийшлося вирішувати цю задачу наближено при допомозі шестиколірної фотометрії β Ліри [27] шляхом абсолютного калібрування останньої підбором зір близьких спектральних класів, для яких мались як аналогічна фотометрія так і абсолютна спектрофотометрія [28]. Враховуючи, зокрема, питання уточнення спектральних класів компонентів та інші, у комплексному дослідженні взаємодіючої системи задача визначення вкладу в її сумарний континуум випромінювання обох компонентів та можливого вкладу випромінювання навколосоряних газових структур мусить бути одною з пріоритетних. Вона могла бути вирішена тільки на основі даних про абсолютний розподіл енергії у неперервному спектрі в усіх основних фазах кривої блиску цієї затемнювано-подвійної зорі.

Абсолютна спектрофотометрія β Ліри виконана нами вперше 1974р. [29], завдяки створенню в Кримській обсерваторії апаратури на основі щільного скануючого спектрофотометра із виділенням спектральної смуги, рівної 27.5А [30,31]. В результаті цих спостережень для одинадцяти фаз кривої блиску через інтервал 25А в межах $\lambda\lambda 3300-7400\text{А}$ опублікована таблиця монохроматичних освітленостей на межі атмосфери Землі $\lg E(\lambda)$ в одиницях $\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1}$. Розробивши методику теоретичного моделювання абсолютного розподілу енергії в спектрі β Ліри (конспективно приведену нижче), ми виконали певні дослідження. Вдалось скоректувати, зокрема, дані вищезгаданого атласу контурів емісійних ліній водню і гелію [26] через отримання для кожної з них поправочних множників. Було досліджено також зміну з фазою бальмерівського скачка та певних показників кольору. Порівнюючи їх з аналогічними для зір різних спектральних класів каталога [32], отриманих на тій же апаратурі, приходимо до висновку, що варіації показників кольору $\lg E(\lambda 4225) - \lg E(\lambda 6370)$ у композиційному спектрі системи відповідають спектральним класам А3-А9, в той час як

бальмерівський скачок - класам зір типу В2-В4, вказуючи на значний надлишок випромінювання за бальмерівським скачком. Цей надлишок при наявності у спектрі системи сильних емісійних ліній підтверджував наше припущення про суттєвий вклад у континуум системи випромінювання іонізованого водню всередині системи та в її околі. Ми зробили спробу оцінити цей вклад шляхом розрахунку комбінацій спектрального розподілу випромінювання зір, близьких за характеристиками з очікуваними для обох компонентів, та неперервного випромінювання газової оболонки при різних значеннях її електронної температури. При цьому були враховані дані поляризаційних спостережень β Ліри [31,32], які визначають оптичну товщу газової оболонки приблизно рівною 0.1, так що в частотах неперервного спектру цей газ залишається практично тонким. Це дозволило використати розрахунки розподілу випромінювання іонізованого водню для різних значень електронної густини [35]. Оскільки за даними шестиколірної фотометрії [27] спектральні класи обох компонентів очікувались у межах В8-В9 та А0-А0, то цей діапазон був перекритий вибором зір із відповідним абсолютним розподілом енергії згідно каталогів [33] та [36]. При цьому враховано вплив поглинання міжзоряного середовища, його залежності від довжини хвилі, відстані до зір (за даними [37] для β Ліри міжзоряне поглинання на $\lambda 5500$ складає 0.19).

Таким чином, моделювання континууму у всіх основних фазах кривої блиску системи β Ліри звелось до вичислення розподілу енергії випромінювання системи з двох зір та газової оболонки згідно співвідношення: $K \cdot I_{\text{внч}}(\lambda) = I_1(\lambda) + \chi I_2 + \psi \cdot I_{\text{об}}(\lambda)$, де $I_{\text{внч}}(\lambda)$ - інтенсивність сумарного випромінювання системи, нормована до інтенсивності континууму на $\lambda 5500\text{А}$; $I_{\text{об}}(\lambda)$, $I_1(\lambda)$, $I_2(\lambda)$ - нормовані інтенсивності випромінювання газової оболонки, яскравого і вторинного компонентів; K - коефіцієнт, який не залежить від довжини хвилі і являє собою сумарну інтенсивність на $\lambda 5500\text{А}$ по відношенню до нормованої інтенсивності випромінювання яскравого компонента в даній фазі. Ці обчислення були проведені для певних значень множників χ та ψ , границі яких задавались перш за все глибинами мінімумів кривої блиску та надлишком випромінювання за бальмерівським скачком. Були розглянуті певні комбінації випромінювання зір, зокрема, В8III +

B8.5III, B8III + A5III, B9.5III + A5III, B9.5III + A9III, а також іонізованої водневої оболонки з електронною температурою $T_e = 10000, 20000$ та, інколи, 15000K.

Аналіз понад п'ятидесяти варіантів моделювання континууму показав, що неперервний спектр системи β Ліри найбільш достовірно відповідає комбінації випромінювання зір-компонентів класів B8III і A5III та рекомбінаційному випромінюванню водню, локалізованого в навколосоряних газових структурах з T_e близько 20000K. Встановлено, що в досліджуваній ділянці спектра останній чинник вносить суттєвий вклад у континуум системи, причому його величина значно змінюється з довжиною хвилі. Для прикладу на рис.2 показана комбінація $I_4(\lambda) + 0.27I_{12}(\lambda) + 0.35I_{08}(\lambda)$ для зір B8III, A5III та оболонки з $T_e = 20000K$ у її порівнянні зі спостереженнями. З рис.2 видно, що визначальним у

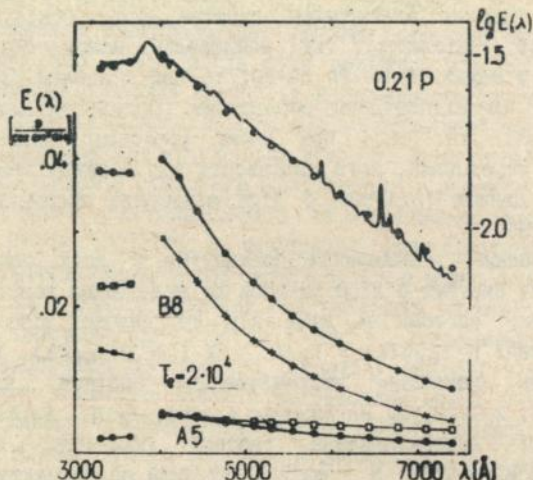


Рис.2. Приклад спостережуваного у фазі 0.21P континууму β Ліри і вчисленого (вгорі справа) з його трьома складовими (внизу зліва).

континуумі системи за бальмерівським скачком є випромінювання оболонки, а в червоній області спектру випромінювання всіх трьох

джерел зближаються за величиною. Ці результати цілком узгоджуються з поведінкою лінійчастого спектру поглинання в системі, ними пояснюються і результати ототожнення нечисленних ліній вторинного компонента. Задіявшись вкладом випромінювання та розмірами яскравого компонента, ми показали, що розподіл енергії випромінювання трьох джерел в усіх фазах узгоджується з фотометричною картиною системи згідно з її кривою блиску. Вклад газової оболонки у континуум системи на $\lambda 5500\text{Å}$ в елонгаціях, вторинному (яскравий компонент спереду) та головному (вторинний компонент спереду) мінімумах кривої блиску становить відповідно 22, 13 та 8%. Звідси ще один висновок: зменшення долі випромінювання газу в головному мінімумі пояснюється затемненням області основної локалізації випромінюючих структур, як області поміж компонентами. Таким чином, виконані в основних фазах кривої блиску спектrophотометричні спостереження β Ліри та моделювання абсолютного розподілу енергії привели до важливого результату у розумінні природи цієї системи: найбільш вірогідними складовими формування континууму взаємодіючої системи в області спектру $\lambda 3300\text{--}7400\text{Å}$ є три джерела - зорі типу A5III та B8III і рекомбінаційне випромінювання водневої оболонки з електронною температурою близько 20000K.

4. ВИЯВЛЕННЯ ЛІНІЙ ВТОРИННОГО КОМПОНЕНТА У СПЕКТРАХ

β ЛІРИ Й КУ ЩИТА І ВИЗНАЧЕННЯ МАС.

4.1. Дослідження спектру β Ліри та перші ототожнення ліній поглинання вторинного компонента.

Лінійчастий спектр системи β Ліри чітко представлений, як вважалося традиційно, лініями поглинання тільки яскравого компонента як зорі типу B8-B9. Через відсутність ліній вторинного компонента залишалися невизначеними основні характеристики цієї подвійної зорі: маси компонентів і абсолютні розміри системи. При відомій функції мас це призводило до появи моделей β Ліри з широким діапазоном відношень мас компонентів. І якщо до кінця 1950-х років, коли ще вважалося, що більш яскравий компонент є й більш масивним, відсутність ознак вторинного компонента у спектрі системи ще можна було якось пояснити, то згодом, на основі еволюційних сценаріїв

тісних подвійних систем сформувалась думка, що вторинний компонент мусить бути значно масивнішим за яскравий, і пошуки ліній вторинного компонента стали необхідними. Можливість позитивного вирішення цієї задавленої задачі підтверджується рішеннями кривих блиску системи, які в різних спектральних діапазонах показують вклад випромінювання вторинного компонента у сумарний континуум від 15 до 50%, приписуючи йому у видимім діапазоні спектральний клас у межах A2-F0 [27,37-41]. Рішення кривих блиску також формує уявлення, що вторинний компонент має бути замаскованим густим та масивним кільцеподібним диском [42]. Ця робота практично закрила дискусію про те, чи є невидимий компонент колапсаром.

Наші пошуки ознак вторинного компонента, базуючись на спектрограмах середньої дисперсії, спочатку не були вдалимими [43]. Однак, коли в 1972 р. нами було отримано понад 30 спектрограм β Ліри в $\lambda\lambda 3600-4900$ та 7 спектрограм в $\lambda\lambda 5400-6700$ високого спектрального розділення, відповідно 0.1 та 0.15A, то в околі сильних ліній SiII λ 3933, MgII λ 4481, SiII λ 6347,6371 яскравого компонента були виявлені ядра досить широких і неглибоких ліній поглинання із доплерівськими зміщеннями у протифазі лініям яскравого компонента та зроблено висновок [14,44] про те, що вони відображають орбітальний рух вторинного компонента. Отримані маси компонентів становили 3.6 та 14.8 $M_{\odot}$, а їх відношення $q \approx 4$. Ці результати іноді сприймалися критично [45]. Для остаточного вирішення цього питання потрібна була апаратура з детектором низького шуму.

Восени 1990 р. ми провели перші спостереження в діапазоні спектра $\lambda\lambda 30A$, центрованому на лінії SiII λ 6347, за допомогою ПЗС-камери, встановленої в спектрографі куде (дисперсія 3A/мм або 0.05 A/піксел) 2.6-м телескопа Кримської астрофізичної обсерваторії (опис апаратури дається в [22,23]). Поки-що нечисленні, але вдало експоновані в фазах обох елонгацій, вони принципово підтвердили присутність у спектрі β Ліри ліній вторинного за світністю, але більш масивного компонента [46]. Як видно з рис.3, профіль лінії SiII λ 6347 є складним, емісійно-абсорбційним, але в ньому чітко у протифазі зміщуються дві абсорбції. Глибша з них належить яскравому компоненту і має очікуване для нього доплерівське зміщення в межах ± 185 км/с відносно променевої швидкості центра мас подвійної

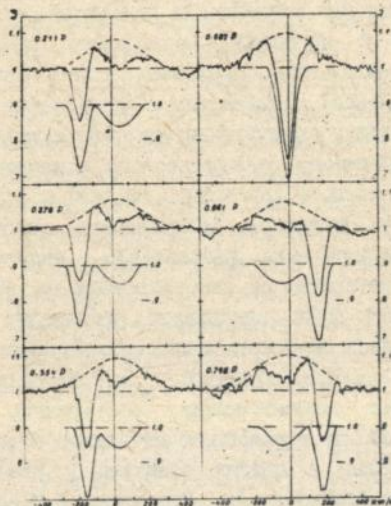


Рис.3. Спостережувані та реконструйовані (внизу) ділянки спектра β Ліри навколо лінії Si III 6347.

системи. Променеві швидкості другої абсорбції, яка інколи виглядає депресією на широкій емісії, значно менші. Їхнє зміщення краще видно на профілях ліній, нормованих по сгинаючим емісіям, оскільки така реконструкція рельєфніше вирізняє ці абсорбції. Осьова швидкість обертання яскравого і вторинного компонентів знаходиться відповідно в межах 41-43 та 80-90 км/с. Вимір доплерівських зміщень обох типів абсорбцій на отриманих ПЗС-спектрах дещо скоректував раніше визначене [44] відношення мас компонентів. Воно стало трохи більшим: $q \approx 4.3$, що при найбільш вірогідному нахилі орбіти $i = 80^\circ$ відповідало таким масам яскравого та вторинного компонентів: 3.2 та 13.6 $M_\odot$.

4.2. Розрахунок синтетичного спектру системи β Ліри:

підтвердження присутності ліній вторинного компонента

З метою оцінки достовірності ототожнення ліній вторинного компонента в спектрі системи та заодно правильності нашої інтерпретації її континууму на основі абсолютної спектрофотометрії [29] ми провели розрахунки [46] ділянок синтетичного спектру системи

Більшість із 60 статей по темі дисертації автором виконані самостійно. Сюди входять дослідження, що стосуються виявлення ліній вторинного компонента й визначення мас компонентів подвійної системи β Ліри й γ Шита; розробки й апробації незалежного способу визначення мас компонентів у взаємодіючих системах із розвиненими навколосоряними структурами певної динаміки; дослідження й інтерпретації явища ліній-сателітів у спектрі системи; сформулювання задачі виявлення й вивчення магнітного поля яскравого компонента, вивчення його впливу на процеси переносу речовини в системі β Ліри.

У спільних працях автору належить формулювання завдань досліджень, їх аналіз та інтерпретація результатів, написання статей. Є праці, виконані співавторами як спеціалістами на стику певних галузей астрофізики. Тоді вони виконували притаманну їм частину роботи, що або відносилась до теоретичних розрахунків та моделювання певних процесів /В.В.Головатий, А.Г.Косовічев, Г.А.Топільська/, або визначалась забезпеченням спостережень на оригінальній апаратурі співавторів із специфічною методикою обробки даних, що переважно було пов'язано з нашими заявками у Комісію тематики крупних телескопів /Г.А.Алексеев, В.І.Бурнашев, Р.М.Вест, Ю.Ф.Мальков, І.Д.Найдьонов, С.І.Плачинда/. У цих статтях вклад автора і співавторів можна вважати рівноцінним.

1.5.Апробація роботи.

У процесі виконання роботи її поточні результати неодноразово доповідались та обговорювались на астрофізичних семінарах різних астрономічних та астрофізичних обсерваторій, зокрема, Львівської, Головної АН України (м.Київ), Кримської, Онджейовської (Чехія), Спеціальної, Шемахинської, Варшавського і Московського Астрономічних інститутів та інших. Результати роботи апробувались на багатьох всесоюзних та міжнародних нарадах. Зокрема, від 1981р. було зроблено 18 доповідей з їх публікацією в таких збірниках праць:

підкомісії "Магнітні зорі" багатостороннього співробітництва академій соціалістичних країн по проблемі "Фізика і еволюція зір" (Нижній Архиз, 1981; Рига, 1984);

підкомісії "Подвійні зорі" багатостороннього співробітництва академій соціалістичних країн по проблемі "Фізика та еволюція зір"

(Tbilisi, 1984);

колоквіума МАС №90 "Upper Main Sequence Stars With Anomalous Abundance" (Научний, Крим, 1985);

всесоюзної наради "Зорі типу Вольфа-Райє та споріднені їм об'єкти" (Ельва, Естонія, 1986);

XIX всесоюзної конференції дослідників змінних зір (Одеса, 1987);

всесоюзної наради "Нестационарні процеси в тісних подвійних системах" (Тіравере, Естонія, 1987);

міжнародної наради "Magnetic Stars" (Нижній Архіз, 1987);

міжнародної наради "Hot chemically peculiar and magnetic stars" (Потсдам-Бабельсберг, Німеччина, 1989);

міжнародної конференції "Physics and evolution of stars" (Татранська Ломніца, Словаччина, 1990);

міжнародної конференції "Stellar magnetism" (Нижній Архіз, 1990).

По темі дисертації є 60 наукових публікацій, 46 з них приведено у списку праць, в яких опубліковані основні результати.

1.6. На захист дисертації виносяться:

1. Результати абсолютної спектрофотометрії взаємодіючої системи β Ліри, проведеної в основних фазах орбітального періоду впродовж шести сезонів, що зводяться до трьох основних:

за допомогою теоретичного моделювання континууму встановлено, що композиційний спектр системи β Ліри в області $\lambda\lambda 3300-7400\text{Å}$ найбільш достовірно представляється випромінюванням зір типу В8III та A5III, а також газової оболонки з електронною температурою $T_e \leq 20000\text{K}$;

ототожено депресію в континуумі системи β Ліри на $\lambda 5200\text{Å}$ та виявлено чітку кореляцію зміни її еквівалентної ширини із зміною з фазою ефективної напруженості магнітного поля яскравого компонента;

виявлено змінність абсолютного потоку випромінювання в емісії лінії H α в її чіткій кореляції з характером змінності ефективної напруженості магнітного поля яскравого компонента.

2. Результати роботи по дослідженню композиційних спектрів взаємодіючих систем β Ліри та RY Щита з метою виявлення ліній вторинних компонентів, що привело до:

ототоження ліній вторинного за світністю, але масивнішого компонента й остаточного вирішення проблеми визначення мас обох

чотирьох окремих сезонів 1966, 1969, 1972 та 1976 рр. У сукупності з даними інших авторів, зокрема [54-56], ми прийшли до висновку про високу вірогідність міжсезонної змінності променевої швидкості центра мас подвійної системи й можливості гіпотетичного третього тіла з періодом обертання довкола цього центра в 4.2 року [52]. Ми не вважаємо це питання вивченим, тим більше, що є підозра про можливу неточність виміру окремих ліній яскравого компонента у зв'язку з новим явищем циклічних змін їх еквівалентних ширин [58].

Основною метою подальших досліджень залишалось отримання параметрів орбіт обох компонентів, визначення їх мас і абсолютних розмірів системи. Вперше така робота була проведена при виявленні ліній вторинного компонента на спектрограмах, отриманих спектрофотографічно 1972 р. [44]. Більш точне визначення параметрів орбіт обох компонентів ми здійснили після серії ПЗС-спостережень системи β Ліри в 1990-1992 рр. в лініях дублету SiII λ 6347,6371. Результати виміру промєневих швидкостей всіх основних деталей

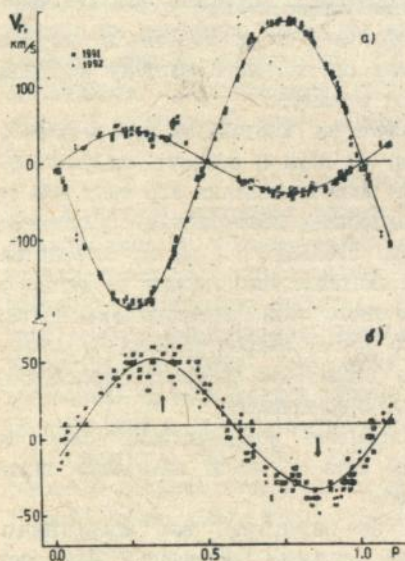


Рис.5. Криві промєневих швидкостей яскравого і вторинного (меншої амплітуди) компонентів системи β Ліри за два сезони ПЗС-спостережень у лініях SiII λ 6347,6371. Нуль-пункт співпадає з променевою швидкістю центра мас. Внизу показана крива промєневих швидкостей для SiII-емісії, екстремуми якої зміщені до фаз 0.36 та 0.86P напірму осі магнітного диполя (показаний стрілками).

неординарних профілів цих ліній затабульовані в [57,58]. Як видно з рис.5, кількість матеріалу для достовірного вичислення параметрів орбіт яскравого і вторинного компонентів (відповідно 150 та 100 визначень променевих швидкостей їх ліній) цілком достатня.

Уточнення параметрів орбіт компонентів проводилось як окремо для сезонів 1991 та 1992 рр., так і по всьому масиву даних. Добре узгодження значень променевої швидкості центра мас системи γ є певним підтвердженням правильності ототожнення й вимірів ліній вторинного компонента. Втім, широкі й неглибокі, спотворені емісії ліній вторинного компонента ставлять природні межі на точність визначення півамплітуди його кривої променевих швидкостей, а звідси, й на визначення мас компонентів у системі. Зважаючи на це, для підсумкового висновку про маси компонентів та розміри системи ми фіксуємо варіант вичислення параметрів орбіти обох компонентів по сукупному масиву даних за 1990-1992 рр., який і приводимо в таблиці.

Параметри орбіт обох компонентів системи β Ліри.

Елемент орбіти	: Яскравий компонент	: Вторинний компонент
P, доби	12.9375	12.9375
T (J.D.2440000+)	8398.7 ± 0.1	8395.7 ± 0.1
γ, км/с	-15.8 ± 0.7	-18.9 ± 0.5
K, км/с	188.0 ± 1.3	42.1 ± 0.6
ε	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.08
ω, град.	180 ± 1	273 ± 1
Asin i, 10 ⁶ км	33.42 ± 0.24	7.48 ± 0.11
f, M _⊙	8.91 ± 0.19	0.100 ± 0.004

Таким чином, абсолютні розміри системи β Ліри $A = 4.1 \cdot 10^7$ км, а відношення мас компонентів $q = K_1/K_2 = M_2/M_1 = 4.5 \pm 0.1$. Воно дає змогу з високою точністю визначити маси компонентів у системі. Однак, враховуючи спотворені емісії профілі ліній червоного дуолету іонізованого кремнію [59], робимо висновок, що слід надати перевагу значенням $K = 185$ км/с та $f = 8.6 M_{\odot}$, які більш точно визначаються за допомогою багатьох неспотворених ліній яскравого компонента у

синій ділянці спектра β Ліри [53]. При найбільш оптимальному значенні нахилу орбіти $i=80^\circ$ отримуємо такі остаточні значення мас: для яскравого компонента, який втрачає речовину, $M_1=(3.0\pm0.1)M_\odot$, а для вторинного, акреційного компонента $M_2=(13.4\pm0.2)M_\odot$.

Ці результати стають одним з найважливіших фрагментів нової моделі взаємодіючої системи β Ліри. Отримані маси компонентів надійно підтверджують сучасні уявлення про еволюційний стан системи β Ліри, як системи, що знаходиться наприкінці короткотривалої стадії першого обміну масою поміж її компонентами. Це підтверджено як теоретичним моделюванням сценарію еволюції системи [59], так і визначенням хімічного складу атмосфери яскравого компонента (реєстрація суттєвого надлишку гелію, дефіциту водню, екстремального співвідношення елементів C,N,O), які стверджують, що початковий хімічний склад цього компонента зазнав змін відповідно процесам CNO-циклу в його надрах [60,61].

4.4. Ототожнення ліній вторинного компонента в спектрі γ Щита і параметри орбіти системи.

Прикладом взаємодіючої системи, подібної до β Ліри за багатьма ознаками спектра, але більш масивної та гарячої, є γ Щита. Визначальною ознакою подібності була й відсутність у спектрі цієї системи ліній вторинного компонента. У координованій програмі вивчення природи цієї системи нам було доручено дослідити її пекулярний спектр і, при можливості, виявити лінії вторинного компонента. В наше розпорядження були надані реєстрограми спектрів γ Щита, отриманих на 1.5-м телескопі Південної Європейської обсерваторії (ESO) з досить високою дисперсією - 12 Å/мм. Повні результати дослідження спектра γ Щита опубліковані нами в [25,62], однак перші результати ототожнення ліній вторинного компонента приведені в [63].

Пошук ліній вторинного компонента проводився з врахуванням результатів фотоелектричних спостережень [64,65], які стверджували, що вторинний компонент повинен бути дещо холоднішим. Було достовірно підтверджено ототожнення ліній SiII та NIII яскравого компонента спектрального класу B0. Однак список його ліній розширився за рахунок високих членів балмерівської серії водню та деяких ліній

гелію, неспотворених вузькими емісіями, притаманими небулярній оболонці. До виявлених нами ліній вторинного компонента належать широкі й неглибокі, до 5-8% висоти континууму, лінії поглинання SiIII, OII, NII, тобто лінії більш низької іонізації, ніж лінії яскравого компонента. В сукупності з фотометричними даними це свідчить про те, що в цілому спектральний клас вторинного компонента більш пізній і може бути оцінений як B2-B3.

У спектрі системи RY Щита лінії вторинного компонента переміщуються у протифазі доплерівським зміщенням ліній яскравого компонента. На жаль, точність визначення променевих швидкостей при малому відношенні сигнал/шум через мале розширення спектрограм є невисокою. Оцінено швидкості обертання яскравого та вторинного компонентів, які становлять приблизно 90 і 150 км/с, не вносячи протиріччя у синхронність їх осьового та орбітального обертань. Променеві швидкості ліній поглинання обох компонентів і ліній поглинання, які виникають у газових структурах, нанесені на рис.6.

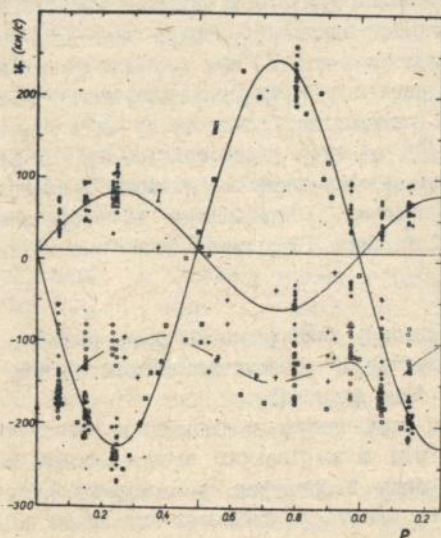


Рис.6. Променеві швидкості ліній поглинання в спектрі RY Щита (наші виміри ліній поглинання обох компонентів показані точками). Суцільні криві - теоретичні криві променевих швидкостей для вторинного (I) і яскравого (II) компонентів, згідно їх параметрів орбіти. Штрихова лінія показує хід променевих швидкостей групи ліній, що формуються в газових структурах всередині системи.

Уточнення елементів орбіти проведено за масивом даних, який складався із 110 визначень променевих швидкостей ліній яскравого і 90 визначень ліній вторинного компонентів. Аналіз вичислень параметрів еліптичної та кругової орбіт показав, що на даному етапі узгодження даних по обох компонентах є кращим для їх колових орбіт [25], тому в таблиці ми приводимо саме такі дані.

Таблиця параметрів колових орбіт обох компонентів γ Щита:

Елемент орбіти : Яскравий B0-компонент : Вторинний B2-компонент		
P, доби	11.1250	11.1250
γ , км/с	10.8 ± 2.4	13.9 ± 1.9
K, км/с	234.3.0	70.6 ± 2.3
$A \sin i$, 10^6 км	35.86 ± 0.46	10.80 ± 0.35
f , $M_{\odot}$	14.90 ± 0.58	0.41 ± 0.05

Таким чином, найважливішими робочими параметрами системи γ Щита можна вважати: променеву швидкість центра мас $\gamma=12$ км/с, відстань між центрами компонентів $A=4.7 \cdot 10^7$ км, а також відношення мас компонентів $q=3.3$ і маси яскравого $M_2=8M_{\odot}$ та вторинного $M_1=26M_{\odot}$ компонентів. Отже, повна маса взаємодіючої системи γ Щита суттєво зменшилась: від пропонованої 100 та $80M_{\odot}$ у роботах [66,67] до $34M_{\odot}$ за нашим визначенням. Це цілком узгоджується із сучасними уявленнями про еволюційний статус цієї системи, сформованими як теоретичним моделюванням сценарію еволюції γ Щита [68], так і нашим визначенням її хімічного складу [62].

4.5. Розробка незалежного способу визначення мас компонентів у взаємодіючій системі по спектру її розвинутих навколосоряних структур та його апробація.

Традиційне визначення мас компонентів подвійних систем просто здійснюється за допомогою вимірів доплерівських зміщень ліній, які викликані орбітальним рухом. Однак в спектрах взаємодіючих систем, як правило, присутні лінії лише одного з компонентів і маси їх не визначаються. Аналізуючи спектр навколосоряних газових структур у системі β Ліри, ми зауважили [69], що їх кінематично-просторова

поведінка відображається в наборі певних ліній, які можуть бути своєрідним тестом для визначення досить вузького діапазону відношень мас, а отже, і мас компонентів системи.

Суть нового, запропонованого нами способу полягає у визначенні променевих швидкостей ліній, які формуються в рухомих газових структурах у межах зовнішньої контактної порожнини Роша, та поза нею, тобто в оболонці, яка покидає систему, з подальшим їх порівнянням із розрахованими параболічними швидкостями пробних частинок обмеженої задачі трьох тіл. Найважливішою умовою застосування цього способу мусить бути присутність у спектрі системи (крім ліній одного із компонентів) ліній газових структур, критерії відбору яких задаються вищезазначеною ідеєю.

Теоретичні засади розробленого способу опубліковані в [25,69]. Використовується представлення стаціонарного гравітаційного поля подвійної системи сімейством еквівалентних поверхонь моделі Роша, але при умові, щоб незалежною змінною було відношення мас компонентів $q=M_2/M_1$, тобто щоб $C=f(q)$. Явна його залежність від q дала можливість розрахувати таблиці Роша [70], за допомогою яких можна побудувати три характерні поверхні з особливими точками Лагранжа на них L_1 , L_2 , L_3 і параметром C , який змінюється за законом $C_1 > C_2 > C_3$. З другого боку, оскільки поверхні Роша ідентичні поверхням Якобі нульової швидкості обмеженої задачі трьох тіл, то рівняння руху пробної частинки з масою $m \rightarrow 0$ в полі тяжіння обох компонентів із масами M_1 та M_2 показує, що $C=f(v)$ або $v=f(q)$, де v - повна швидкість рухомої частинки. Це важливо, якщо усвідомити, що частинка покине систему (природно найлегше поблизу точки L_2), якщо її швидкість буде більшою за параболічну $v_{\text{параб}}=v_{2,\text{відн}}=(C_1-C_2)^{1/2}$, де $v_{2,\text{відн}}$ - безрозмірна відносна швидкість частинки, яка досягне зовнішньої контактної порожнини Роша. Якщо частинка насуде швидкості $v_{\text{параб}}=v_{3,\text{відн}}=(C_1-C_3)^{1/2}$, то вона зможе покинути систему і в околі точки L_3 за більш масивним компонентом.

Щоб перейти до конкретної подвійної системи з її швидкостями в км/с, необхідно ввести абсолютні розміри системи. Для цього, задаючи одиницю часу через $P/2\pi$, де P - орбітальний період, вводиться одиниця орбітальної швидкості $v_{\text{орб}}=2\pi A/P=[G(M_1+M_2)/A]^{1/2}$, де A -

відстань поміж центрами компонентів. Тоді трансформацію швидкостей із відносної системи в абсолютну можна здійснити за допомогою співвідношення типу: $v_{2,abs} = v_{орб} \cdot v_{2,відн} = v_{орб} (C_1 - C_2)^{1/2}$. Таким чином, отримавши в км/с розрахункові значення параболічних швидкостей в діапазоні значень q , очікуваних для досліджуваної системи, можна провести їх порівняння із вимірними швидкостями рухомих газових структур всередині і поза системою. Інакше кажучи, можна розв'язати зворотню задачу визначення найвірогіднішого діапазону значень q для конкретної системи тобто оцінити маси компонентів. Це можливо, якщо для одного із компонентів системи визначена крива променевих швидкостей, наприклад, з півамплітудою K для компонента масою M_2 , а отже, і функція мас $f_2(M_\odot)$, так що $M_1 = (1+q)^2 \cdot f_2(M_\odot) \sin^{-3} i$. Тоді при нахилі орбіти i для різних значень q можна розрахувати параметри $A, M_\odot, M_\odot, v_{орб}, v_{2,abs}, v_{3,abs}$, що й було зроблено для систем β Ліри й γ Щита в інтервалі $0.1 \leq (\alpha = 1/q) \leq 0.6$ [25]. Всі інші параметри для цих систем були відомі. Розрахункові параболічні швидкості в їх залежності від α показані на рис. 7. Вони обчислені при $i=80^\circ$ для β Ліри та $i=84^\circ$ для γ Щита і можна вважати, що при таких нахилах орбіт повна швидкість рухомих частинок газу співпадає з променевою.

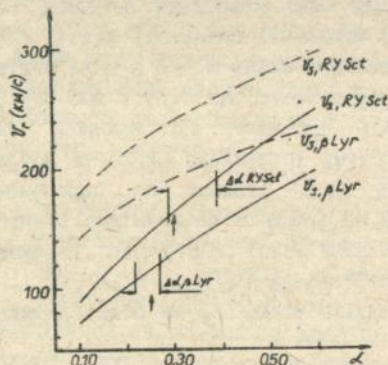


Рис. 7. Вичислені параболічні швидкості $v_{2,abs}$, $v_{3,abs}$, як функції α . Виділені найбільш вірогідні межі відношень мас A для систем β Ліри й γ Щита. Вертикальними стрілками вказано положення спостережуваного відношення мас, визначеного звичайним способом.

Критерієм застосування цього способу має бути констатація у спектрі взаємодіючої системи двох різних систем ліній поглинання, утворених у навколосоряних структурах зі швидкостями меншими та більшими за v . У спектрах β Ліри й γ Щита перша з цих систем ліній формується в газових потоках при переносі речовини поміж компонентами. Максимального зміщення вони досягають у фазах навколо 0.07P, коли найпотужніший потік газу видно в проекції на яскравий компонент в основному за границею внутрішньої порожнини Роша вторинного компонента, з його тилового боку. Максимальні швидкості в цих потоках у напрямі на спостерігача рівні -110 км/с для β Ліри та -165 км/с для γ Щита. Увійшовши з цими значеннями в рис.7, отримуємо нижню границю для α .

Друга система ліній поглинання спектру навколосоряних структур пов'язана з вузькими лініями гелію, які мають нижній метастабільний рівень, наприклад, 2^3S . Для цього рівня визначальними є ефекти зіткнення, оскільки спонтанний перехід здійснюється шляхом двоквантового переходу на рівень 1^4S . Рівень 2^3S має високу заселеність, тому в розріджених середовищах поглинання в лініях, які виникають з цього рівня, можуть бути вельми суттєвими. Форма ліній буде залежати й від присутності рухомих розріджених оболонкових структур в околі системи.

Системи β Ліри й γ Щита є рідкісними об'єктами. в спектрах яких спостерігаються такі вузькі лінії гелію. В системі β Ліри нами детальніше досліджені лінії HeI λ 3888,10830, а в спектрі γ Щита ми виявили та дослідили лінію HeI λ 3888 (це друга після HeI λ 10830 лінія серії при переході з рівня 2^3S вверх). Всі ці лінії виявляють від'ємну променеву швидкість, незалежно від позиційного кута спостереження обох систем. Інтерпретація їх поведінки з фазою орбітального періоду зводиться до того, що ці лінії утворюються в розрідженій, але достатньо близькій до системи оболонці поза межами зовнішньої контактної порожнини Роша, яка віддаляється від системи зі швидкістю -120 та -195 км/с відповідно у випадку β Ліри й γ Щита [25,71,72]. Увійшовши з цими даними у розрахункову криву параболічної швидкості на рис.7, визначаємо верхню межу можливих відношень мас α . Таким чином отримані межі можливих відношень мас становлять $0.29 \leq \alpha \leq 0.39$ для γ Щита і $0.22 \leq \alpha \leq 0.27$ для β Ліри.

Цей результат на диво добре узгоджується з прямими визначеннями мас компонентів за вимірами доплерівських зміщень ліній поглинання обох компонентів: відповідно $\alpha=0.23$ для β Ліри [57] і $\alpha=0.30$ для γ Щита. Отже, не дивлячись на певне математичне спрощення задачі, порівняння з традиційним визначенням мас компонентів у реальних взаємодіючих системах виявляє хорошу прогностичну здатність запропонованого нами способу. Успішна апробація цього способу на обох системах подає надію на його подальше практичне застосування.

5. ВІДКРИТТЯ ТА ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В СИСТЕМІ β ЛІРИ.

5.1. Отримання зееманівських спектрограм на 6-м телескопі та виявлення магнітного поля в атмосфері яскравого компонента.

Неоднозначність у розумінні природи системи β Ліри початку 1970-х років пов'язана була, передусім, з невиявленням ліній вторинного компонента в її спектрі. На цей час ми зрозуміли також, що певна неясність у будові навколосоряних структур (рух газових потоків, зокрема, не вкладався в класичну газодинамічну схему [71]) може мати нетрадиційне тлумачення на основі ще невиявлених явищ.

В 1972 р., при виконанні основної програми отримання спектрограм високої дисперсії з метою ототожнення ліній вторинного компонента на 2-м телескопі Шемахинської астрофізичної обсерваторії, ми водночас отримали кілька зееманівських спектрограм, обробка яких показала достатньо високу вірогідність магнітного поля яскравого компонента. Втім, задача цілеспрямованого пошуку магнітного поля у взаємодіючій системі β Ліри почала здійснюватись лише при сприянні Комісії тематики шестиметрового телескопа у вересні-жовтні 1980 та у серпні 1981 рр., коли нами було отримано понад 100 зееманівських спектрограм в $\lambda\lambda 3800-4900\text{\AA}$. Цьому сприяла розробка в Спеціальній астрофізичній обсерваторії аналізатора кругової поляризації з ромбом Френеля як із фазозсуваючим елементом [18], ахроматичність якого була дуже важливою характеристикою, якщо врахувати обмежене число ліній в спектрі β Ліри, придатних для вимірювання. Там також була розроблена спеціальна апаратура і для більш точного вимірювання зееманівських розщеплень в лініях [73].

Досить велика ширина ліній (півширина коло 0.6Å, $v_{\text{шир}}=43$ км/с) та їх мала глибина (15-20% континуума) змусили користуватись набором ліній іонізованих металів; в основному, це були: FeII $\lambda\lambda$ 4233, 4351, 4508, 4515, 4549, SiII $\lambda\lambda$ 3853, 3856, 3862, 4128, 4131, CaII $\lambda\lambda$ 3933, MgII λ 4481, CrII λ 4589, а також вільні від емісії лінії HeII λ 3872, 3926, 4120 та деякі інші (через обмежену кількість ліній спектрограми експонувались згодом підряд: по 10-15 впродовж ночі). Вимірювання спектрограм та вичислення магнітного поля проводилось за методикою, розробленою та впровадженою у Спеціальній астрофізичній обсерваторії [74]. Величина ефективної напруженості магнітного поля для кожної лінії довжиною λ визначалась за відомою формулою: $H_e(\text{Гс})=52.7 \cdot \lambda \cdot (4500/\lambda)^2 \cdot \Delta\lambda/Z$, де $\Delta\lambda$ - величина розщеплення лінії в мікронах на фотопластинці з дисперсією D , що була рівною 9Å/мм, а Z - величина зміщення лінії в одиницях нормального зееманівського розщеплення (фактор Ланде). По лініям, виміряним за допомогою спектрограм, отриманим у конкретну дату, визначалось середнє арифметичне значення величини H_e з її середньою похибкою середнього арифметичного σ .

Аналіз отриманих результатів привів до таких висновків [15]: в атмосфері яскравого компонента β Ліри виявлено магнітне поле з середньою за орбітальний цикл ефективною напруженістю в 1-1.5 кГс і амплітудою його зміни в межах ± 500 Гс; поверхнєве магнітне поле має складну структуру, будучи приблизно в два рази більшим на тім боці компонента, який звернений до масивного супутника, та розташованим несиметрично відносно лінії центрів компонентів; зафіксовані різкі перепади магнітного поля, особливо в зоні його абсолютного максимуму, що могло свідчити про крупномасштабну структуру поля на поверхні яскравого компонента або про його змінність.

5.2. Результати вивчення магнітного поля фотографічним способом.

Дослідження магнітного поля яскравого компонента проводилось нами майже щосезону включно до 1988 р. на тій же апаратурі 6-м телескопа [75-77]. Вимірювався той же набір ліній атмосфери яскравого компонента, тою ж залишалась методика визначення ефективної напруженості магнітного поля. Середня фаза спостережень, при їх середній тривалості за ніч в 30-40 хвилин, на підряд

експонованих спектрограмах, як завжди, вичислялась за ефемеридою [78].

Перший матеріал для аналізу зміни з фазою магнітного поля було отримано по масиву даних за 1980-1984 рр. [75]. Залежність $H_e = f(P)$ показала добре узгодження всіх спостережень, що свідчило про синхронність періодів орбітального та осевого обертань. Ця залежність виявилась квазісинусоїдальною. По абсолютній величині поле є максимальним перед фазою 0.9P, тобто, будучи здецентрованим відносно осі центрів компонентів, відповідає тій стороні яскравого компонента, що звернена до масивного супутника. Це наводить на думку, що супутник впливає на конфігурацію магнітного поля яскравого компонента.

З метою перевірки цього припущення проведені модельні розрахунки за методом, описаним у [79]. Вони підтвердили таку можливість. При цім вважалось, що магнітне поле є дипольним, а ширина профіля вимірюваних ліній задавалась величиною осевого обертання, синхронного орбітальному; параметри системи, зокрема, маси компонентів приймалися згідно даних [44]. Узгодження теоретичної та спостережуваних кривих змін з фазою магнітного поля отримано при таких значеннях його параметрів [75]: а) вісь диполя магнітного поля нахилена до площини орбіти подвійної системи на кут 28° та на 41° до променя зору спостерігача (приймалось, що вісь обертання перпендикулярна площині орбіти, нахил якої $i=77^\circ$, а довгота магнітного полюса, тобто кут між лінією центрів компонентів і проекцією осі диполя на площину орбіти, становить, згідно спостережень, 40°); б) центр магнітного диполя зміщений від гравітаційного центра яскравого компонента в напрямі масивного супутника на 0.08a, де a - відстань між центром яскравого компонента і центром маси подвійної системи. Отже, таке теоретичне моделювання передбачає можливість присутності магнітного поля зі зміщеним диполем, що може бути наслідком впливу масивного супутника на формування структури магнітного поля яскравого компонента.

Значення ефективних напруженостей магнітного поля яскравого компонента для 33 дат його спостережень впродовж 1980-1988 рр., їх аналіз та основні висновки опубліковані в [76,77]. На основі наших вимірів близько 400 зеєманівських спектрограм сформована досить впевнена залежність H від фази орбітального періоду - рис.8. 11

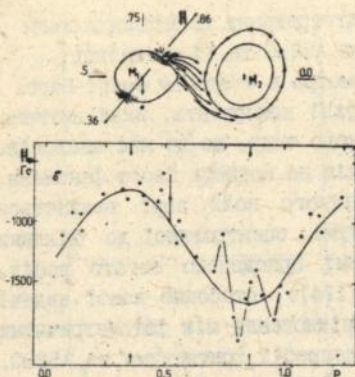


Рис.8. Спектрофотографічна крива $H_e = f(P)$ за даними [77]. Похибка окремого виміру дається вертикальною рискою, рівно 20. Синусоїдальна середня крива може свідчити про дипольне поле з полюсами вздовж фаз 0.35-0.86P (вказані стрілками). У фазах довкола полюса, який звернений до акреційного супутника, видно квазіперіодичність. Для кращого усвідомлення явища магнетизму вгорі показана схематична модель системи β Ліри (див.рис.1,п.1.6).

рішення з використанням програми апроксимації даних спостережень тригонометричними функціями при врахуванні похибки кожного спостереження показують, що величина середнього по орбітальному циклу магнітного поля $H_e (-1198 \pm 32) \text{ Гс}$ з амплітудою $A = (475 \pm 51) \text{ Гс}$. Отримана крива та середнє значення H_e є кінцевими для наших спостережень спектрофотографічним способом на 6-м телескопі.

Розглядаючи залежність $H_e = f(P)$, зауважимо, що вона добре апроксимується синусоїдою (суцільна крива), що може свідчити про дипольний характер магнітного поля. Абсолютне максимальне значення поля відповідає фазі 0.855P, а мінімальне - фазі 0.355P. Отже лінія 0.36-0.86P, як проекція осі диполя магнітного поля на площину орбіти, відхилена вздовж позиційного кута спостереження від лінії центрів подвійної зорі 0.0-0.5P на $1/7 P$ (орбітальний період $P = 12.937$ доби). Приблизно з таким же за тривалістю підперіодом на кривій $H_e = f(P)$ присутні вторинні варіації магнітного поля в фазах його абсолютного максимуму, які виділені штриховою лінією на рис.8. Їх, як виявилось - [80], ігнорувати не можна, позаяк, враховуючи результати абсолютної спектрофотометрії [17], вони можуть бути значущими.

5.3. Пошуки незалежних аргументів підтвердження магнітного поля:

- а) виявлення депресії континуума на $\lambda 5200$ та її змінність;
- б) спостереження за допомогою магнітометра з еталоном Фабрі-Перо.

Виявлення магнітного поля на поверхні компонента, який активно втрачає масу у взаємодіючій системі такого типу, ще не має аналогів. Безумовно, це вимагало пошуків аргументів на користь цього феномена. Незалежним аргументом існування магнітного поля зорі вважається наявність широкої депресії в її континуумі, зцентрованої до ділянки спектру на $\lambda 5200$ [81,82]. Цій проблемі присвячено багато робіт, аналіз яких (зроблений також нами в [II4]) стосовно нашої задачі зводиться до висновків, що: існує співвідношення між фотометричними індексами, чутливими до інтенсивності депресії континуума на $\lambda 5200$, і напруженістю магнітного поля, яке найбільш надійне для величин поля ≤ 5 кГс; величина депресії змінюється впродовж періоду обертання магнітної зорі так, що її максимум досягається тоді, коли максимум магнітного поля по позиційному куту спостережень проходить через центральний меридіан; для багатьох зір існує впевнений зв'язок між величиною магнітного поля та інтенсивністю депресії в континуумі.

Вже в роботі [75] за даними абсолютної спектрофотометрії β Ліри 1974 р. [29] ми звернули увагу на те, що в континуумі β Ліри присутня депресія на $\lambda 5200$, зміна глибини якої корелює з пофазною зміною магнітного поля, причому найбільша глибина депресії відповідає екстремумам магнітного поля. З метою вивчення цього явища в 1984 р. в усіх основних фазах орбітального циклу ми повторили абсолютну спектрофотометрію β Ліри знову на тім же скануючій спектрофотометрі із кроком 14А та шириною щілини 27.5А. Перевага нашого методу порівняно з фотоелектричним [82-84] у тому, що ми безпосередньо визначали еквівалентну ширину депресії на $\lambda 5200$, як більш адекватного параметра її поведінки. Результати спостережень та визначення $W_{\lambda}(5200)$ для обох сезонів спостережень 1974 і 1984 рр. можна охарактеризувати за допомогою рис.9. Видно, що обидва максимуми еквівалентних ширин депресії досягаються тоді, коли зони полюсів дипольного магнітного поля проходять через центральний меридіан. Така синхронність цих явищ приводить до висновку про те [75,85], що присутність депресії на $\lambda 5200$ в спектрі β Ліри (з визначальним

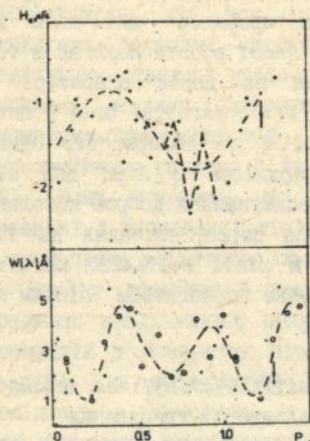


Рис.9. Змінність кривої $H_e = f(P)$ (показана вгорі, див. підпис для рис.8) в її порівнянні з ходом зміни з фазою еквівалентної ширини на $\lambda 5200$ за даними абсолютної спектрофотометрії 1974 (точки) та 1984 (кружки) років. Типова похибка окремого виміру дається вертикальною рискою (2σ).

внеском у нього випромінювання яскравого компонента [29]) та кореляція її змінності зі структурою поверхневого магнітного поля яскравого компонента згідно з сучасними дослідженнями феномена депресії у магнітних зір є достовірним підтвердженням виявлення магнітного поля у системі β Ліри.

У дослідженні феномену магнетизму виникає також необхідність спостережень на іншому типі апаратури. Спектрофотографічний метод не є достатньо точним, тим більше у випадку спектра системи β Ліри, коли наявні широкі і не вельми глибокі й контрастні лінії поглинання при обмеженому їх числі на спектрограмі. Тому ми зробили спробу використати як альтернативну апаратуру фотоелектричний магнітометр з еталоном Фабрі-Перо. Розроблена у Спеціальній астрофізичній обсерваторії [19,86] і встановлена у першій камері ОЗСП 6-м телескопа, ця апаратура дає високе спектральне розділення – близько $0.12 \text{ \AA/мм}$. У робочому спектральному діапазоні магнітометра $44000\text{--}4500$ з даним еталоном Фабрі-Перо для вимірів потоків та інших параметрів краще підходила сильна одиночна лінія $\text{FeII}\lambda 4233$ з фактором Ланде $Z=1.214$. Розрахунки синтетичного спектру в цій області, проведені за методиком, описаною нами в [46], не виявили істотних бленд цієї лінії. Як стандарт без поля спостерігалась

Ліри, а як зоря-стандарт з магнітним полем - β Північної Корони у певних фазах, розрахованих згідно [87], для яких отримано очікувані результати. Спостереження β Ліри були проведені для п'яти дат впродовж 1990-1991 рр. Основний висновок нашої роботи полягає в тому [88], що визначення магнітного поля на даній апаратурі не протирічить фотографічним спостереженням [77]. Магнітне поле у певні фази зафіксоване очікуванням по величині і по полярності, однак точність його визначення невисока (яскравість β Ліри для цієї апаратури низька; спостереження не супроводжувалися доброю погодою). На жаль, в подальшому ця апаратура була переорієнтована на інші задачі. І все ж склалось враження, що в лінії FeII λ 4233 магнітне поле веде себе дещо інакше, ніж усереднене по багатьом лініям при визначенні спектрофотографічним способом.

5.4. Вивчення магнітного поля в лініях SiII λ 6347,6371 за допомогою зеєманівських ПЗС-спектрограм: незалежне підтвердження її особливості поведінки поля яскравого компонента і перше його виявлення у вторинного.

Програма незалежного експериментального підтвердження та вивчення виявленого раніше феномена магнетизму у взаємодіючій системі β Ліри за допомогою більш досконалої апаратури зреалізована нами тільки в 1991-1992 рр. Вимірювання поперемінної складової ефективного магнітного поля на основі ефекта Зеємана проводилось у лініях поглинання SiII λ 6347,6371 [90,91]. Для вимірювання величини розщеплення поляризованих компонент спектральних ліній використовувався стоксметр у режимі аналізатора кругової поляризації та ПЗС-детектор. Робоча область довжин хвиль стоксметра - $\lambda\lambda$ 5800-6400. Він встановлений перед щілиною спектрографа у фокусі куди 2.6-м телескопа Кримської астрофізичної обсерваторії. Опис роботи стоксметра та методика обробки спостережень приведені в [90,91]. Точність метода складає 3-4% від величини зареєстрованого сигналу, тобто при величині поля в 100 Гс відхилення у вимірах його абсолютного значення може досягти 3-4 Гс.

Вибір ліній дослідження диктувався робочою областю стоксметра і характеристиками спектра β Ліри в цій області. Тут лише дві лінії іонізованого кремнію є досить сильними і водночас вкладаються на

одну експоновану ПЗС-спектрограму в межах 58А при робочій дисперсії 0.105А/піксел. За час спостережень в певну дату відношення сигнал/шум досягало високих значень - 400-800. Цього вимагало дослідження складних профілів ліній кремнію з емісійною складовою і слабкими лініями вторинного компонента. Похибка проведення континууму становила $\approx 1\%$. Були проведені розрахунки синтетичного композиційного спектру β Ліри в $\lambda\lambda 6330-6390$ по методиці, описаній в [46]. Вони показали, що слабенькі бленди цих ліній, а також слабенькі і нечисленні лінії атмосферної води не спроможні впливати на визначення магнітного поля.

Виміри ефективної напруженості магнітного поля H_e із її середньою квадратичною похибкою σ , які були визначені за серіями експозицій в конкретну ніч, представлені на рис.10 як залежності $H_e = f(P)$ для обох ліній кремнію. Найважливішим результатом цих досліджень є незалежне, з високою точністю визначення магнітного поля яскравого компонента, що змінюється у межах від -190 до +150 Гс. Це є підтвердженням факту присутності магнітного поля на

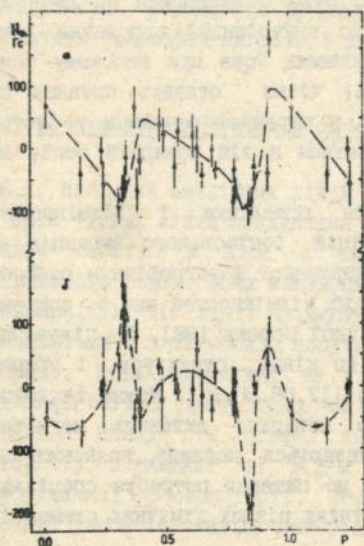


Рис.10. Результати визначення величини ефективної напруженості повздовжньої складової магнітного поля в лініях поглинання Si III 6347 (а) та Si III 6371 (б) яскравого компонента β Ліри на основі вивчення зееманівських ПЗС-спектрограм за даними 1991р. (о) та 1992р. (□, Δ). Штрихові лінії проведені "на око", згідно передбачуваного ходу зміни поля.

поверхні компонента, з якого проходить інтенсивна втрата речовини в процесі еволюції у взаємодійчій подвійній системі.

Другим результатом слід вважати падіння магнітного поля з висотою у витікаючій атмосфері - поле в лініях кремнію має значно меншу величину, ніж усереднене магнітне поле, визначене по багатьом лініям синьої ділянки спектра фотографічним способом [77] (лінії SiII λ 6347,6371 з емісійною складовою їх профілів формуються у найзовнішніших шарах атмосфери яскравого компонента; ці лінії з емісією інколи спостерігаються також в об'єктах із витіканням речовини, зокрема, у зір типів Вольфа-Райє, Р Лебеда, Ве-зір - [92,93]). Це є певним підтвердженням реальності утворення магнітосфери поблизу поверхні яскравого компонента, що є важливим висновком вивчення динаміки навколосоряних газових структур [94,95].

Третій результат полягає у синхронності осевого обертання яскравого компонента з орбітальним, оскільки виміри магнітного поля різними методами впродовж 12 років забезпечують достатньо добру узгодженість між собою. У такому разі це також стосується характеру переносу речовини у цій подвійній системі, оскільки спостережуване значення $u \cdot \sin i = 43$ км/с, а повинно було б становити 55 км/с при заповненні яскравим компонентом його внутрішньої порожнини Роша. 20%-е недозаповнення по радіусу порожнини Роша при високому темпі переносу маси в $3 \cdot 10^{-5} M_{\odot}$ /рік [96] чітко ставить питання про каналізуючу роль магнітного поля в переносі речовини у системі β Ліри [94,97], що особливо відчувається в тій полярній зоні, яка звернена до масивного супутника.

Четвертий результат стосується поведінки і відмінностей індивідуальних кривих $H_e = f(P)$ ліній іонізованого кремнію та усередненої кривої багатьох ліній, отриманої фотографічним способом (див. рис.8, п.5.2.). Прецеденти таких відмінностей вже є, зокрема, це стосується магнітної зорі β Північної Корони [98]. Це підтвержує уявлення про складну і не вияснену до кінця структуру і природу магнітного поля яскравого компонента [17,58,80,97]. Можна висловити припущення про наявність на його поверхні активних магнітних областей, які особливо чітко проявляються поблизу полярних зон глобального магнітного поля. Втім, це питання потребує спеціально поставлених спостережень в окремих лініях різних хімічних елементів,

перш за все у багатій на них синій ділянці спектра системи β Ліри.

Використавши той же спектральний матеріал та методику його обробки, ми провели вимірювання магнітного поля в лініях Si III $\lambda\lambda 6347,6371$ вторинного компонента [90]. Це здійснено для п'яти дат спостережень у фазах елонгацій, тобто при найбільших розділенні ліній обох компонентів, їх яскравості і кількості експозицій. Результати обробки дозволяють впевнено говорити про виявлення магнітного поля у фазі 0.236P, в якій виміри зеєманівських зміщень у двох лініях кремнію показали таке середнє значення його ефективною напруженості: $H_e = (-349 \pm 89) \text{ Гс}$. Це складає 3.9%, тобто вірогідність результату за критерієм Фішера є 0.999. Є ще кілька значень H_e з похибкою $\geq 3\sigma$, наприклад, $H_e = (457 \pm 158) \text{ Гс}$ у фазі 0.324P для лінії Si III $\lambda 6347$ і $H_e = -(509 \pm 141) \text{ Гс}$ у фазі 0.857P. Це свідчить про змінність магнітного поля вторинного компонента з фазою. Однак для такої залежності даних ще мало. І все ж робимо висновок про те, що спостереженнями за допомогою стоксметра та ПЗС-детектора зафіксоване магнітне поле і у вторинного за світністю, але більш масивного акреційного компонента взаємодіючої системи β Ліри. Це дозволяє припустити існування магнітної взаємодії між компонентами системи.

6. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕМІСІЙНОГО СПЕКТРУ СИСТЕМИ β ЛІРИ.

6.1. Вивчення емісійних ліній спектродографічним способом.

Крім чітких ліній поглинання яскравого компонента, характерною ознакою спектра β Ліри є численні емісійні лінії водню і нейтрального гелію. Вони мають змінну з фазою структуру профіля та інтенсивність. Ці лінії формуються у газовому середовищі між компонентами і в їх околі, несучи інформацію про структуру газових утворень, їхню кінематику та енергетику. Тому їх вивченню ми приділяли багато уваги впродовж багатьох сезонів в 1966-1979 рр., обробивши понад сім сотень спектрограм високої та середньої дисперсії, отриманих на 1.2-м та 2.6-м телескопах Кримської астрофізичної обсерваторії. Необхідність масових спостережень витікала також із аналізу попереднього вивчення емісійного спектру β Ліри [99-101]. Першим етапом дослідження було створення атласу

контурів найсильніших емісійно-абсорбційних ліній H β , H γ , H δ , H ϵ та HeI λ 3888, 4471, 5875 [26]. Ці контури були представлені в абсолютних одиницях з метою отримання потоку випромінювання в лініях у кожній фазі. Оскільки на той час абсолютна спектрофотометрія в ліри ще не проводилась, була розроблена методика прив'язки відносного розподілу енергії в континуумі (отриманої на підставі її шестиколірної фотометрії [27] у системі [102] за допомогою стандартів, для яких малися як шестиколірна фотометрія, так і абсолютна спектрофотометрія [28]). Важливим результатом цієї роботи, крім отримання загальних закономірностей у поведінці емісійних ліній, було виявлення чітких відмінностей в певних фазах у різних орбітальних циклах і сезонах спостережень.

Подальше дослідження змінності контурів емісійних ліній H β , H γ , HeI λ 5875, 6678 у найбільш статистично забезпечених спостереженнях сезонах 1969, 1976, 1977 і 1979 рр. і їх аналіз привели до висновків [103,104] про те, що: чітко прослідковується залежність потоку випромінювання в емісійних лініях од позиційного кута спостереження системи; наявні різкі перепади еквівалентних ширин емісійних ліній з фазою квазіперіодичної природи, особливо в фазах, що передують головному затемненню; є суттєві відмінності в характері залежності $W_{\lambda} = f(P)$ для всіх чотирьох сезонів (у деяких фазах прослідковується міжсезонний фазовий зсув на постійну величину, що свідчить про зміни у конфігурації чи у локалізації випромінюючих газових утворень); присутні короткотривалі зміни W_{λ} емісійних ліній як у певній фазі при спостереженнях у різних циклах для даного сезону, так і їх флуктуації (до 30-40%) при послідовному експонуванні спектрограм (тривалістю 10-20 хвилин кожна) впродовж однієї ночі.

Останній результат спричинився до проведення кількох серій спостережень з експозиціями в 1-2 хвилини й таким же інтервалом псмїж ними, виконаних на 2.6-м телескопі Кримської обсерваторії в 1978 і 1979рр. [105,106]. В результаті обробки цих спектрограм були виявлені: систематичні зміни до 25% еквівалентних ширин емісійних ліній впродовж 60 хвилин; випадки синхронного спаду W_{λ} різних емісійних ліній в межах 40-100% та подальшого їх підйому до початкового значення тривалістю в 15 хвилин; значні відмінності у

формі, інтенсивності емісійних ліній та їх еквівалентних ширин на послідовно експонованих спектрограмах у межах 5 хвилин.

Основний висновок із цих багаторічних спостережень емісійного спектру β Ліри полягає у ствердженні виявлення нестационарних процесів різної тривалості у навколосоряних газових структурах: від міжсезонних вікових змін, що могли характеризувати зміни в формі, локалізації і русі крупномаштабних навколосоряних структур, до швидкісних збурень їхніх локальних складових вірогідно еруптивного характеру. Для подальшого дослідження цих явищ необхідно було перейти до спостережень за допомогою якісно нової апаратури.

6.2. Спектроскопія високої часової роздільності в околі лінії $\text{H}\alpha$.

Спроба виявлення швидкісних процесів в околі компонентів, визначення характеру та рівня цієї змінності з фазою орбітального циклу як можливих флуктуацій потоку випромінювання газових структур, була нами зроблена в лінії $\text{H}\alpha$, - найсильнішій емісійній лінії видимої області спектра β Ліри. Спостереження були проведені 1981 р. за допомогою дисекторного спектрофотометра, спряженого з спектрографом СП-14 у фокусі Несміта 6-м телескопа [107,108]. Досліджуваний діапазон спектра, центрований на $\text{H}\alpha$, для двох дисперсій становив 150 та 450Å. Більшість матеріалу отримана у першому варіанті при дисперсії 0.6 Å/канал при 256 діючих каналах з часом експозиції окремої спектрограми в 10.48 с. За вісім дат 13-денного періоду системи отримано і потім оброблено понад 700 спектрограм. У кожному з цих дат проводились також спостереження $\text{He-}\alpha$ та зорі порівняння. Більш детально апаратура, методика реєстрації спектрів та математична обробка результатів приводиться в [109-III], а також нами в [108].

Результати цього дослідження зводяться до двох основних. Перший стосується форми емісійного профіля лінії $\text{H}\alpha$, усередненого по серіях спектрограм у кожному окрему дату спостережень. Виділено дві нові характерні особливості. По-перше, в околі центральної емісії виявлені чіткі абсорбції, що проявляються тільки в певних фазах. Одна з них із доплерівським зміщенням у -1000 км/с спостерігається у фазовому інтервалі 0.34 - 0.49P і може свідчити про високошвидкісний зоряний вітер із області точки Лагранжа 1,2, з

також із зони магнітного полюса поблизу неї на поверхні яскравого компонента. Останній варіант може пояснити і появу іншої абсорбції у фазі 0.73P в зоні спостереження другого магнітного полюса. По-друге, в емісії лінії Na виявлені дуже широкі крила; в фазі 0.73P, наприклад, вони сягають $\pm 70\text{\AA}$. Це набагато більше, ніж давали фотографічні спостереження ($\pm 10\text{\AA}$ - [101]). Інтенсивність крил зростає в елонгаціях, коли проглядається наскрізь зона поміж компонентами та спостерігається спрямування газових потоків до поверхні вторинного компонента. Високі швидкості випромінюючих частинок свідчать про те, що саме тут розташована зона підвищеного збудження та іонізації водню. По аналогії із об'єктами типу Р Лебеда, в спектрах яких теж присутні широкі крила емісії в лінії Na [112], найбільш вірогідним механізмом походження цих крил можна вважати томсонівське розсіяння світла на вільних електронах. З цим узгоджується оцінка електронної температури в області удару газових потоків, яка становить $4 \cdot 10^4 \text{K}$ - [13], і виявлення ліній високого збудження та іонізації, скажімо, CIV, NV у далекому ультрафіолеті [113].

Другий результат полягає у виявленні швидкісних процесів у системі β Ліри з характерними часовими відтинками в

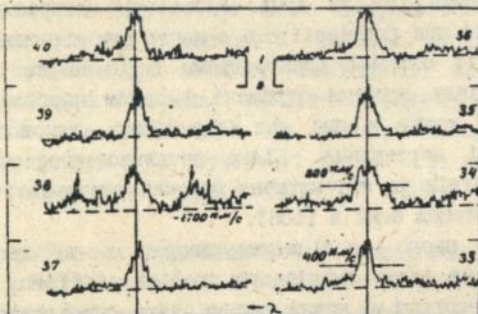


Рис.11. Приклад інтенсивних флуктуацій Na-емісії у фазі 0.49P і їх можливих кількісних оцінок на спектрограмах від N33 до N40, експонованих з 10-секундним часовим розділенням.

секунди-хвилини. Активність змінності оптичних спектрів у часі суттєво залежить від того, в якій фазі орбітального циклу проводяться спостереження в лінії $\text{H}\alpha$. Швидка змінність як у крилах, так і в центрі емісії практично відсутня в околі фаз головного затемнення ($0.0P \pm 0.1P$), коли вторинним компонентом закрита область стоку речовини з яскравого компонента та її висвічування в результаті ударних процесів. При виході яскравого компонента з головного затемнення флукутації емісії зростають. Надзвичайно інтенсивною спостерігається змінність потоку випромінювання в усій ділянці спектра навколо і в центрі емісії в фазах $0.34 - 0.49P$. Зокрема, в фазі $0.49P$ подибуємо випадки майже двократного звуження-розширення профілю центральної емісії і зміни її еквівалентної ширини на послідовних 10-секундних експозиціях, причому "палахкоче" і вся область емісійних крил - рис.11.

Інтерпретація цього явища зводиться до спостереження основної області удару газових струменів у диск, який охоплює вторинний компонент [108]. Діапазон видимості цієї області становить приблизно $0.15P$. Ця область локалізована також за допомогою абсолютної спектрофотометрії в Ліри [17], - в ній виявлено зростання потоку випромінювання в лінії $\text{H}\alpha$ на 11%. Після серії ПЗС-спостережень з'явилась також можливість додаткового пояснення цього явища на основі магнітогідродинамічних ефектів у районі полюса магнітного поля [58,97], який в цих фазах проходить через меридіан.

6.3. Абсолютна спектрофотометрія в області емісійної лінії $\text{H}\alpha$:

- а) квазіперіодичні процеси за спостереженнями 1978-1979 рр.;
- б) пофазна кореляція змінності в абсолютному потоці випромінювання в $\text{H}\alpha$ -емісії та у магнітному полі.

Різкі зміни еквівалентних ширин емісійних ліній вказували на можливі циклічні осциляції впродовж орбітального періоду [103-106]. З метою вивчення цього ефекту для 35 дат у 1978-1979 рр. була проведена абсолютна спектрофотометрія в Ліри в області $\text{H}\alpha$ [114] (за допомогою скануючого спектрофотометра - див. п.3.) Для цього була розроблена методика спостережень у режимі фіксованих довжин хвиль як в центрі лінії, так і симетрично відносно нього. Реєстрований сигнал, коли щілина (нею вирізався спектральний інтервал в $27.5\text{\AA}$)

центрувалась на емісію, можна представити як: $n_{em+c} = n_{em} + n_c$, де: n_{em} - частина сигналу, що відповідає випромінюванню в лінії, а n_c - значення сигналу в континуумі, центрованому на емісійну лінію в інтервалі довжин хвиль, виділеному монохроматором (отримується інтерполяцією спостережень в ділянках спектру, симетрично вибраних відносно λ_0 на відстанях приблизно 75Å). Освітленість, створена інтегральним випромінюванням зорі тільки в емісійній лінії, задавалась виразом: $E_{em} = E_c(\lambda_0) \cdot \Delta\lambda \cdot n_{em} / n_c$, де $\Delta\lambda$ - ширина щілини монохроматора в Å. Інтерпольоване значення освітленості для континуума під лінією $E_c(\lambda_0)$ вираховувалось шляхом прив'язки відліків у сусідніх ділянках неперервного спектру, отриманих для досліджуваної зорі та стандарту:

$$\lg E_{zop}(\lambda) = \lg E_{ct}(\lambda) + \lg n_{zop}(\lambda) / n_{ct}(\lambda) + \alpha(\lambda) [F_{zop}(Z) - F_{ct}(Z)].$$

Тут $\alpha(\lambda)$ - середнє значення монохроматичного коефіцієнта екстинції, $[F_{zop}(Z) - F_{ct}(Z)]$ - різниця повітряних мас для цих зір. Первинним стандартом служила зоря α Ліри. Таким чином, використовуючи реєстровані відліки n_{em} та n_c , а також значення $E_c(\lambda_0)$ у відповідних фазах, були отримані значення потоку випромінювання в емісії лінії λ_0 , вкотре, шукана залежність $\lg E_{em}(\lambda_0) = \lg E(\lambda_0) = f(P)$.

Найважливішим результатом цих дворічних спостережень було виявлення квазіперіодичності абсолютного потоку випромінювання в емісії лінії λ_0 . Амплітуда цих варіацій складає 0.14 у величинах $\lg E_{em}(\lambda_0)$ при похибці окремого виміру, меншій за 0.004. Вперше було отримано такий результат: впродовж дворічних спостережень потік в λ_0 -емісії формує всередині орбітального циклу тривалість в 12.94 доби стійку картину осциляцій (особливо в фазах вторинної елонгації) з підперіодом в 1/7 P, тобто кратним орбітальному і прилизно рівним 1.85 доби. Ці спектrophотометричні спостереження незалежно виявили газовий диск, що оточує вторинний компонент, і дозволили оцінити його радіус в 1/3 відстані між центрами компонентів взаємодіючої системи [114].

Незабаром, із відкриттям і дослідженням магнітного поля яскравого компонента [15,75] подібної тривалості осциляції були виявлені в тих же фазах вторинної елонгації, що відповідали тепер зоні магнітного полюса, зверненого до вторинного компонента. Ця причина змусила нас у 1984-1985 рр. продовжити абсолютну

спектрофотометрію в лінії $\text{H}\alpha$ з метою пошуку зв'язку між цими явищами. В подальшому, спектрофотометричні спостереження та щільність $\text{H}\alpha$ -фотометрія β Ліри, виконані нами в 1974, 1978-1980, 1984 і 1985 рр., були редуковані в єдину систему і опубліковані в [17]. Абсолютна калібровка β Ліри при цьому виконувалась за допомогою даних про розподіл енергії в спектрі α Ліри і являла собою середнє із результатів калібровок [115-118].

Крім підтвердження деяких результатів, отриманих нами раніше, доповнені й добре статистично забезпечені залежності від фази монохроматичних освітленостей та потоків випромінювання в лінії $\text{H}\alpha$ виявили зовсім новий і важливий для розуміння природи цієї системи результат: чітку кореляцію змінності з фазою абсолютного потоку випромінювання в $\text{H}\alpha$ -емісії із змінністю з фазою ефективної напруженості магнітного поля яскравого компонента. Максимум та мінімум залежності $E(\text{H}\alpha) = f(P)$, будучи зсунутими відносно мінімумів та максимумів кривої блиску, співпадають по фазі з екстремальними значеннями залежності $H_e = f(P)$ - рис.13, що була отримана на основі вивчення магнітного поля в 1980-1988 рр. на 6-м телескопі [76,77].

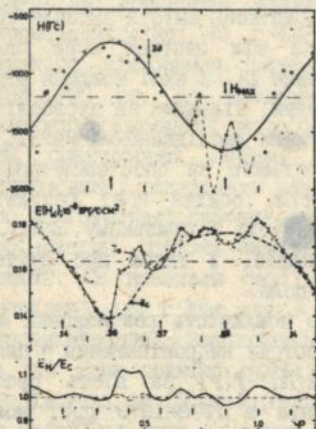


Рис.12. Вгорі: зміна ефективної напруженості магнітного поля H_e з фазою орбітального періода; в центрі: потік випромінювання в емісії $\text{H}\alpha$, усереднений методом ковзачого середнього (точки і крива E_H) та його зглажена E_c -крива; внизу - змінність із фазою відношення E_H/E_c .

Оскільки крива змінності магнітного поля синусоїдальна і поле може вважатися дипольним, видно, що максимум випромінювання в емісії лінії $\text{H}\alpha$ відповідає тій зоні магнітного полюса (зцентрованій до

фази 0.86P, - див. рис.8, п.5.2.) на поверхні яскравого компонента, яка звернена до акреційного вторинного компонента. В цій зоні поблизу поверхні яскравого компонента енерговіддача газових утворень є збільшеною: потік випромінювання в лінії $\text{H}\alpha$ у ній в 1.3 рази більший, ніж у зоні другого магнітного полюса, зцентрованого до фази 0.36P. Звідси робимо висновок, що формування випромінюючих газових структур всередині системи зорієнтоване магнітним полем яскравого компонента, який на даному етапі еволюції системи в Ліри активно втрачає масу.

Другий цікавий результат пов'язується з локальним максимумом на кривій $E(\text{H}\alpha)=f(P)$ у фазах 0.37-0.51P. Враховуючи, що в фазах 0.34-0.49P зафіксовані бурхливі флуктуації $\text{H}\alpha$ -емісії (див.п.6.2.) та інші фактори, скажімо, мінімум поляризації [34], можна це інтерпретувати в рамках локалізації області ударних процесів поблизу поверхні вторинного компонента при перетіканні до нього газових струменів [17]. Надлишок випромінювання в $\text{H}\alpha$ -емісії від цієї гарячої області становить 11%. Однак є й інший варіант інтерпретації, якщо звернути увагу на те, що ця гаряча область, принаймні, в фазах 0.48-0.51P повинна бути закрита яскравим компонентом. Це дозволяє вважати, що додаткова емісія виникає також поблизу поверхні яскравого компонента між центром зони полюса магнітного поля (0.36P) і точкою Лагранжа L_2 , з якої можлива втрата речовини поза межі системи зі швидкостями, більшими за параболічну. Цей варіант краще узгоджується з сучасними дослідженнями магнітного поля яскравого компонента в лініях кремнію за спостереженнями з використанням ПЗС-детектора [58]. Втім, обидва нові результати свідчать про переважне формування $\text{H}\alpha$ -емісії в близькому околі, чи впритул до поверхні яскравого компонента, а також про суттєвий вплив на ці процеси його ж магнітного поля.

Третім результатом є висновок про можливість резонансних явищ у системі в Ліри. Квазіперіодичність потоку випромінювання з циклом $1/7P$ є і на усередненій кривій $E(\text{H}\alpha)=f(P)$ за шість сезонів спостережень. Оскільки зона менша, ніж в 1978-1979 рр., можемо припустити вікові квазіперіодичні зміни у потоці $\text{H}\alpha$ -емісії: це можна пов'язати із відкриттям прецесії руху видовженого диска довкола вторинного компонента тривалістю у кілька років [119].

Резюмуючи, відзначимо основний результат багаторічних спостережень абсолютного потоку випромінювання в емісії лінії $\text{H}\alpha$: виявлення чіткої кореляції пофазної змінності цього потоку із такою ж змінністю ефективної напруженості магнітного поля яскравого компонента. Це повинно мати пряме відношення до побудови нової моделі газових структур у системі β Ліри, формування яких може здійснюватися під дією магнітного поля яскравого компонента при постійній втраті маси з його поверхні.

6.4. Спектроскопія в околі емісійних ліній із ПЗС-детектором:

а) каталог $\text{H}\alpha$ -емісій, їхня енергетика та динаміка, кореляція зі змінністю магнітного поля;

б) змінність емісії ліній $\text{HeI}\lambda 6678,7065$, $\text{SiII}\lambda 6347,6371$.

Вивчення структурних особливостей навколосоряних утворень, як виявилось в результаті тривалих спектрофотографічних спостережень [26,103-106], вимагало більш точної реєстрації профілів емісійних ліній за допомогою лінійного детектора низького шуму. Перші високодисперсійні (3 і 6 Å/мм) спектральні спостереження β Ліри високого відношення сигнал/шум в області $\text{H}\alpha$ виконані впродовж 1985-1990 рр. за допомогою ПЗС-камери, встановленої на 2.6-м телескопі Кримської астрофізичної обсерваторії [94]. Дослідження цих спектрограм носило комплексний характер. Зокрема, були підтверджені результати абсолютної спектрофотометрії 1974-1985 рр. про довготривалі сезонні зміни. Підтвердились наші спостереження і про раптові сплески випромінювання на часових відтинках у кілька хвилин. Це показали серії п'ятихвилинних послідовних експозицій, проведені для п'яти дат з метою пошуку швидкої змінності потоку випромінювання. Зафіксовано, зокрема, факт змінності цього потоку на 10% (при похибці $\sim 2\%$) та зміни профіля $\text{H}\alpha$ -емісії на кількох послідовних із 15 спектрограм, експонованих у фазі 0.443P - рис.13. Ця змінність корелює також із флуктуаціями потоку випромінювання у часових відтинках секунди-хвилина, отриманих при спостереженнях з дисекторним спектрофотометром [108], співпадаючи по фазі з ударом основного газового потоку в диск вторинного компонента. Отже, маємо незалежний факт на користь того, що витікання матерії яскравого

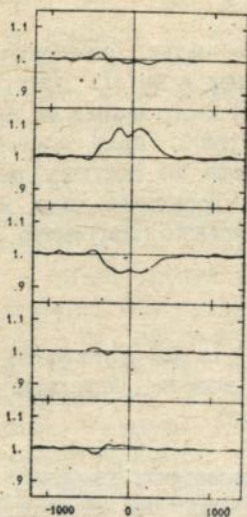


Рис.13. Приклад значимих флуктуацій потоку випромінювання в Na-емісії у фазі 0.443R. Показаний результат ділення п'яти індивідуальних (перші чотири і останній) спектрів на середній спектр із серії 15 п'ятихвилинних ПЗС-спектрограм.

компонента, яке вірогідно здійснюється у формі зоряного вітру, носить нестационарний характер з елементами еруптивності. Характерні часові зміни величини потоку випромінювання свідчать про те, що ці зміни проходять у локальних просторових утвореннях, які є меншими за розміри системи.

Принципово новий результат стосується взаємозв'язку динамічних змін в Na-емісії зі структурою магнітного поля яскравого компонента. Для прикладу на рис.14 показано сім профілів лінії Na, отриманих впродовж орбітального циклу. Суттєво перевищуючи континуум та змінюючись з фазою, емісія в вузьких діапазонах фаз добре відтворюється, зберігаючи два емісійні піки та абсорбцію поміж ними. Виміри доплерівських зміщень саме цих деталей та центра емісії (по бісектору її гаусівського профілю) уможливили подальший аналіз результатів у кількох моделях. Основними з них були модель незалежного формування піків та модель єдиної емісії з абсорбцією, що прорізає емісію в результаті самопоглинання в навколосоряних газових утворах. Вирішення такої неоднозначності здійснене завдяки точним позиційним вимірам при комп'ютерній обробці ПЗС-спектрограм

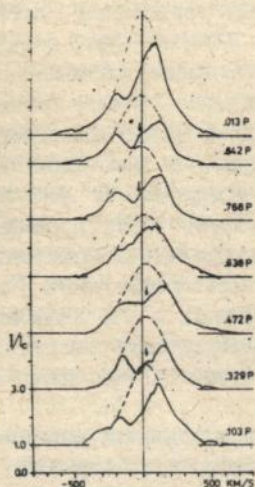


Рис.14. Приклад характерних профілів лінії Na. Вертикальна стрілка дана як бісектор гаусівського профілю, побудованого штриховою лінією. Нуль-пункт променевої швидкості співпадає зі швидкістю центра мас подвійної системи. Оцифровка по ординаті співвідноситься з кожним із приведених профілів.

з виводом їх через принтер у координатах інтенсивність - променева швидкість. Тому самостійний інтерес має опублікований нами каталог характерних профілів Na-емісії впродовж основних фаз орбітального періоду, який досить детально табульовано із змінним кроком для можливого відтворення [94]. Він є надійним матеріалом для теоретичних розрахунків утворення емісійного спектру в рухомих газових структурах як самої β Ліри, так і подібних систем.

Результати виміріє променевих швидкостей всіх чотирьох деталей профілю Na-емісії показав, що жодна з пропонованих моделей не працює "чисто", оскільки домінуючим став фактор магнітного поля. Виявлена чітка кореляція доплерівського зміщення центра Na-емісії із зміною з фазою ефективною напруженості магнітного поля яскравого компонента: екстремуми v_r -кривої центра емісії співпали з екстремумами залежності $H_e = f(P)$, відстежуючи орієнтацію осі магнітного поля, тобто його структуру.

Ці важливі результати потребували підтвердження. Можна відзначити, зокрема, що спостереження в лінії Na були розпорешені впродовж шести сезонів і могли зазнавати міжсезонних змін. Тому ми

провели додаткові спостереження в усіх основних фазах випродовж одного сезону 1991р.[97]. На рис.15 показані результати вимірів променевих швидкостей для всіх чотирьох характерних деталей $\text{H}\alpha$ -емісії окремо в інтервалах 1985-1989 та 1990-1991 рр., оскільки восени 1990р. вже малися певні відмінності в променевих швидкостях короткохвильового піка емісії. Вони підтверджені спостереженнями 1991 р. для фаз 0.5-0.7P, що є ще одним свідченням про довготривалі міжсезонні зміни в навколосоряних структурах, в яких формується $\text{H}\alpha$ -емісія. Важливіше, що отримано чітке підтвердження основного результату попередніх шестирічних спостережень: зміна променевих швидкостей всіх характерних деталей профілю $\text{H}\alpha$ -емісії проходить у кореляції з кривою ефективною напруженості магнітного поля яскравого компонента - рис.12. Порівнюючи рис.12 і 15, зазначимо, що v_r -криві всіх деталей мають екстремуми поблизу певних фаз орбітального періоду: 0.0 та 0.5P, а також 0.36 та 0.86P. Перші з

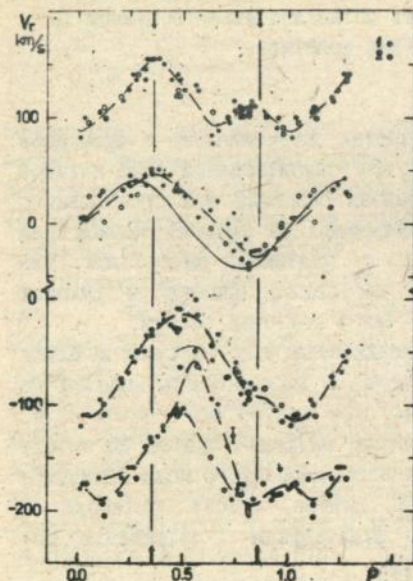


Рис.15. Криві $v_r=f(P)$ деталей профілю $\text{H}\alpha$ -емісії, отриманих за ІЗС-спостереженнями 1990 - 1991 (1) та 1985-1989 (2) рр. Зверху вниз: довгохвильового піка; центра $\text{H}\alpha$ -емісії (суцільна крива - v_r -крива вторинного компонента); абсорбції, що прорізає емісію і короткохвильового піка (вертикальна риска показує середню похибку окремого виміру 2σ). Отрілки у фазах 0.36 і 0.86P відповідають осі магнітного диполя. Нуль-пункт по ординаті виведено на променеву швидкість центра мас подвійної системи β Ліри.

них лежать на лінії центрів обох компонентів, а другі співпадають з напрямом осі диполя магнітного поля яскравого компонента. До перших з них більш чітко відноситься u_r -крива абсорбції, а до других - u_r -крива центру емісії.

Отримані результати суттєво міняли уяву про формування емісійних газових структур і їхню динаміку в системі β Ліри. Вони свідчили про те, що перенос речовини регулюється певним чином зорієнтованим у просторі магнітним полем яскравого компонента, а також про те, що $\text{H}\alpha$ -емісія в значній мірі утворюється в околі яскравого компонента й, вірогідно, в близькій магнітосфері з твердотільним обертанням [94,95].

З метою перевірки цієї точки зору й отримання загальних закономірностей у змінності параметрів емісійних ліній того ж 1991r. з використанням ПСД-детектора проведені спостереження інших ліній червоної ділянки спектра β Ліри: сильних емісійних ліній $\text{HeI}\lambda 6678, 7065$ та ліній $\text{SiII}\lambda 6347, 6371$ з відносно слабкою емісією. Інформативною виявилась лінія $\text{HeI}\lambda 7065$, емісія якої, як і в лінії $\text{H}\alpha$, знаходиться повністю над континуумом, але більш надійно апроксимується гаусіаном, оскільки червоний та фіолетовий піки її емісії співмірні. Слід наголосити, що динамічні характеристики

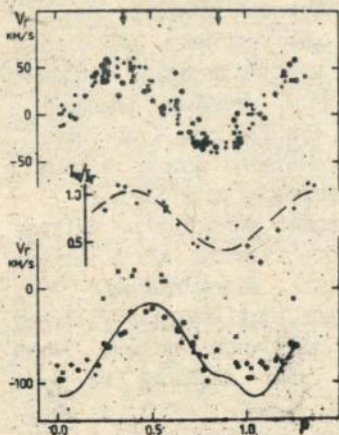


Рис.16. u_r -криві центра емісії в лініях $\text{SiII}\lambda 6347, 6371$ (точки) і в $\text{HeI}\lambda 6678$ (кружки), $\text{HeI}\lambda 7065$ (косі хрестики) - вгорі, та їх же абсорбції і лінії $\text{HeI}\lambda 5875$ (точки) - внизу (суцільна лінія відповідає u_r -кривій абсорбції на $\text{H}\alpha$ -емісії із рис.15). В центрі: крива $I_V/I_r = f(P)$ для піків емісії $\text{HeI}\lambda 7065$.

всіх емісійних ліній виявились практично ідентичними. Це частково відтворює рис.16. Порівнюючи його з рис.15, звернем увагу на співпадання залежностей $v_r = f(P)$ для центрів $\text{H}\alpha$ -емісій та емісій інших ліній. Екстремуми цих кривих відповідають фазам спостережень обох магнітних полюсів яскравого компонента, тобто ці криві симетричні відносно осі магнітного диполя. Відмітимо, що на v_r -кривій довгохвильового піка емісії теж присутні два максимуми - рис.15, що відповідають фазам магнітних полюсів. Причому менший по висоті у фазі $0.86P$ максимум стане домінуючим, якщо побудувати залежність $\Delta v_r = f(P)$, де Δv_r - різниця між променевими швидкостями довгохвильового піка та центру $\text{H}\alpha$ -емісії, і тоді симетрія відносно осі магнітного диполя проявиться ще чіткіше [94].

Енергетичні характеристики емісійних ліній промодульовані також поверхневою структурою магнітного поля. На рис.16 ми для прикладу показуємо відношення інтенсивностей коротко- та довгохвильових піків емісії у лінії $\text{HeI}\lambda 7065$ в залежності від фази. Максимум залежності $I_v/I_r = f(P)$ співпадає з фазою $0.36P$, а її мінімум з фазою $0.86P$ (отже, в цій фазі швидкість руху емітуючих частинок в сторону спостерігача є максимальною), тобто ці екстремуми теж відповідають зонам магнітних полюсів поверхні яскравого компонента [97]. Маємо ще один аргумент на користь висновку про те, що емісія локалізується поблизу поверхні яскравого компонента, який втрачає масу. Аналогічні висновки отримано з вивчення емісій в лініях $\text{SiII}\lambda\lambda 6347, 6371$ [58,89,119], - див. рис.5, п.4.3., а також вивчення змінності абсолютного потоку в емісії лінії $\text{H}\alpha$ в їх кореляції зі структурою магнітного поля [17].

Акцентуємо увагу на те, що всі v_r -криві абсорбції на емісіях показують практично синусоїдальну симетрію відносно лінії центрів компонентів, тобто є більш орбітально модульованими. Але, наприклад, для лінії $\text{HeI}\lambda 7065$ v_r -крива абсорбції зміщена у своєму максимумі дещо вліво до зони першого магнітного полюса. Вплив магнітного поля спостерігається через явну депресію на всіх v_r -кривих абсорбції в фазах довкола $0.86P$, тобто в фазах проходження через меридіан того полюса магнітного поля, який звернений до масивного акреційного супутника. В цих фазах, отже, зростає швидкість руху газу на спостерігача.

Виходячи з цих та інших результатів дослідження профілів емісійних ліній, зроблено основний висновок [94,97]: формування всіх емісійних ліній проходить у навколосоряних газових структурах з практично однаковою динамікою, скорельовано з поверхневою структурою магнітного поля яскравого компонента із втратою маси. Емісія як ціле має єдину природу, вона формується в околі яскравого компонента, а абсорбція, що її прорізає, виникає в результаті поглинання в газових структурах на промені зору до спостерігача, відображаючи динаміку витікаючої матерії та її рух у просторі поміж компонентами.

6.5. Особливості емісійного спектру системи γ Щита (небулярні лінії) та його подібність зі спектром β Ліри.

Своїми розвинутими навколосоряними структурами взаємодіючи системи β Ліри й γ Щита сильно виділяються серед тісних подвійних типу W Змії і можуть бути об'єднані в окремий підклас як об'єкти на швидкоплинній стадії першого обміну масою поміж їх компонентами [122]. Вивчення емісійного спектру γ Щита ми провели в рамках координованої програми за спостереженнями на 1.5-м та 6-м телескопах Південної європейської (ESO) та Спеціальної астрофізичної обсерваторії [25]. Було виділено дві характерні системи емісійних ліній, які утворюються в газових структурах всередині системи, а також у віддаленій від системи небулярній оболонці. Досліджувалась змінність з фазою еквівалентних ширин, інтенсивностей і променевих швидкостей емісійних ліній обох типів, яка проілюстрована на рис.17.

Широкі емісії ліній H β і H α (видно, що остання в деяких фазах поширюється поза заборонені лінії [NII]) нагадують емісійні лінії в спектрах β Ліри та Be-zp. Цю систему ліній ми іменуємо "Be-емісіями". На відміну від β Ліри, в спектрі якої спостерігаються більш інтенсивні емісії цього типу, бальмерівський декремент Be-емісії крутіший: в лінії H γ , крім фаз головного мінімуму, вона вже не спостерігається. Червоний інтенсивніший пік Be-емісії спостерігається також в лініях гелію $\lambda\lambda 4471, 5875, 6678$, створюючи із притаманною їй абсорбцією профіль типу P Лебеда. Наше вивчення Be-емісії проводилось за її виявом у перелічених лініях

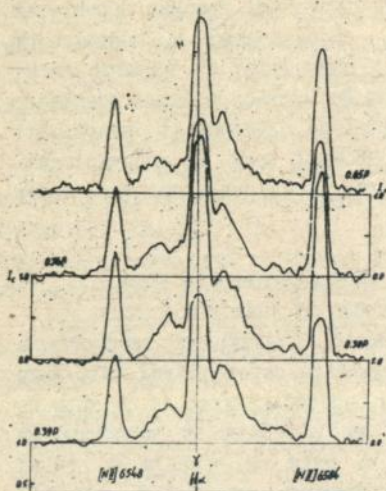


Рис.17. Спектр системи RV Щита в долях континуума для чотирьох фаз довкола Na та заборонених ліній [NII], центрований до променевої швидкості центра мас системи в лінії Na.

(що стосується вивчення лінії Na, то в загальних рисах воно співпадає з результатами робіт [123,124]). Інтенсивність емісії змінна з фазою, але двогорба структура її завжди зберігається. Півширина Be-емісії на піввисоті гаусівського профілю в лінії Na знаходиться в межах 600 км/с, тобто на 20% ширша за таку у спектрі β Ліри. На рівні континуума ширина крил сягає 2000 км/с. Як у випадку β Ліри, Р Лебеда та гарячих надгігантів [127,128] доплерівська природа та томсонівське розсіяння на вільних електронах є найбільш сприятливими механізмами походження широких крил [108,112]. Виміри доплерівських зміщень центра Be-емісії лінії Na показали, що промєневі швидкості грубо відповідають орбітальному рухові вторинного компонента, але з удвоє меншою амплітудою та із зміщенням v_r -кривої на +20 км/с відносно промєневої швидкості центра мас системи RV Щита. Аналогічний результат отриманий при вивченні динаміки емісії лінії HeII4686 (така лінія відсутня у спектрі β Ліри), однак відповідне зміщення тут вже рівне 30 км/с. Враховуючи, що такі зміщення співмірні з тепловою швидкістю на

поверхні яскравого компоненту, який втрачає масу, цей результат не слід однозначно тлумачити як виникнення Ве-емісії навколо вторинного масивного акреціючого компонента. Наголосимо також, що аналогічна ситуація складалась і в тлумаченні динаміки Ве-емісії і в системі β Ліри [129], аж поки в результаті більш точних ПЗС-спостережень не виявилось [94,97], що такий хід v -кривих Ве-емісії є відображенням структури магнітного поля яскравого компонента. Аналіз всіх динамічних і енергетичних параметрів Ве-емісії та HeII-емісії системи RY Щита краще узгоджується в моделі їх формування у газових потоках, спрямованих в область поміж компонентами до акреціючого супутника, правда, з дещо вищою ніж у β Ліри початковою швидкістю.

Некулярність спектру RY Щита визначається незвичними для системи β Ліри та інших взаємодіючих систем типу W змії забороненими лініями [NII], [OIII], [SIII], [FeIII] та тотожними їм за формою вузькими емісіями в лініях водню та гелію: променеві швидкості та півширини всіх цих ліній однакові. Передбачаючи умови їх виникнення та локалізації приблизно тими ж, всі ці лінії для зручності опису як певного явища ми іменуємо небулярними [25,62]. Непередбаченим результатом отримання спектрограм RY Щита високої дисперсії стало виявлення незвичного для заборонених ліній явища їх роздвоєння на вузькі емісійні піки, зміщені між собою на 45 км/с - [63]. При розгляді профілів небулярних ліній стала очевидною змінність їх форми впродовж орбітального періоду - рис.18. В зв'язку з цим нами проведено детальне вивчення характеру змінності з фазою параметрів небулярних ліній: еквівалентних ширин, абсолютних потоків випромінювання, променевих швидкостей центрів ліній, а також відносних інтенсивностей і доплерівських зміщень обох їх піків. При вивченні w_λ було враховано, що небулярні лінії формуються у віддалених структурах за межами затемнювано-подвійної системи, тобто істинні еквівалентні ширини ліній були виправлені за змінність висоти континуума під небулярною емісією впродовж фази орбітального періоду та приведені до фази максимуму подвійної системи. Така ж корекція здійснена й для відносних інтенсивностей небулярних ліній. Залежності $w_\lambda = f(P)$, $I = f(P)$ та $v_r = f(P)$ показали синхронну змінність з фазою енергетичних і динамічних параметрів

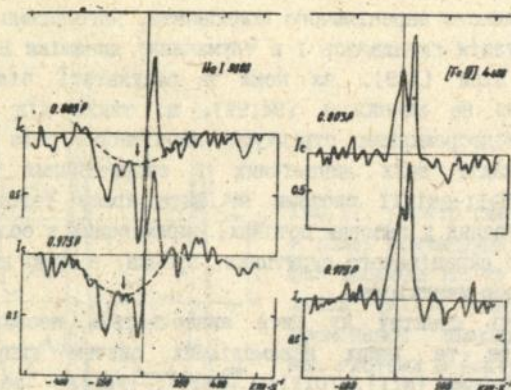


Рис.18. Ліворуч: лінія $\text{He I } 3888$ з широкою та двома вузькими абсорбціями та емісією; праворуч: лінія $[\text{Fe III}] 4468$ як онаочнення змінності заборонених ліній з фазою орбітального періоду.

всіх небулярних ліній, незважаючи на врахування для двох перших з них змінного континууму. Це свідчить про те, що області свічення небулярної оболонки відкликаються на змінний потік випромінювання від центрального джерела. Ці залежності показали також певний фазовий зсув мінімумів на цих кривих відносно фази головного мінімуму кривої блиску [62,125]. Інтерпретація цього явища зводиться до певного запізнення світлового сигналу центрального джерела. При цьому запідозрена деяка стратифікація цих структур, принаймні, двокомпонентність небулярної оболонки. Близька до подвійної системи та щільніша її частина є місцем формування багатьох ліній $[\text{Fe III}]$ і небулярних структур ліній водню. Фазовий зсув для цих ліній найменший, з подвійні піки емісії найбільш змінні. У більш віддаленій частині оболонки виникають власне небулярні лінії $[\text{N II}]$, $[\text{O III}]$, $[\text{S III}]$.

Для вивчення розмірів і структури небулярної оболонки, її фізичних характеристик еквівалентні ширини небулярних ліній за певною методикою [62] були перетворені в абсолютні потоки

випромінювання на межі земної атмосфери. Це дало змогу визначити температуру і радіус центральної зорі, яка збуджує небулярну оболонку, а також електронну густину, температуру і розміри оболонки. Основний висновок щодо її структури полягає в тому, що вона кільцеподібна й розташована в орбітальній площині подвійної системи. При нахиленні орбіти $i=85^\circ$ [126] ця оболонка бачиться "з ребра". Геометричні параметри оболонки узгоджуються з даними вивчення γ Шита в радіодіапазоні [127, 128]. Враховуючи дослідження хімічного складу (що відповідає наслідкам горіння водню в реакціях СНО-циклу) та фізичних характеристик небулярних структур, ми прийшли до висновку [62], що кінематика та фізика небулярних структур поблизу масивної і гарячої взаємодіючої системи γ Шита не є ідентичною структурі планетарних туманностей. Найбільш правдоподібно, що вона утворена в результаті активної втрати із поверхні яскравого компонента речовини з еволюційно просунутим хімічним вмістом при явно неконсервативному переносі цієї речовини у взаємодіючу систему γ Шита.

7. ХАРАКТЕРНІ ОСОБЛИВОСТІ АБСОРБЦІЙНОГО СПЕКТРУ РОЗВИНЕНИХ НАВКОЛОЗОРИНИХ ГАЗОВИХ СТРУКТУР У СИСТЕМАХ β ЛІРИ Й γ ШИТА.

7.1. Створення віялоподібної системи газових потоків під впливом магнітного поля яскравого компонента β Ліри.

Спектрам β Ліри притаманні емісійно-абсорбційні лінії водню та гелію, які відображають крупномасштабну взаємодію між компонентами системи. Емісійні складові цих ліній спектра γ Шита значно слабші, ніж у β Ліри, а абсорбційні, навпаки, сильніші, відображаючи ще більш явно явище переносу маси поміж компонентами. В результаті загаторічного вивчення цих абсорбцій ми прийшли до висновку [122], що в обох системах маємо справу з двома основними їх групами, які визначаються відмінною між собою формою профілів та їх кінематикой. Перша, більш численна група ліній утворюється в рухомих газових структурах всередині систем, відображаючи явище втрати речовини яскравим компонентом і її акреції на супутник. Друга, менш численна

група ліній з променевими швидкостями, більшими за параболічну, виникає в загальних оболонках, що оточують системи в цілому і рухаються від них, вносячи речовину поза їх межі.

Розглянемо специфіку першої групи ліній, спершу для β Ліри. Перше наше дослідження цих ліній за допомогою спектрів високої дисперсії [71] показало, що ця, названа нами А-абсорбція, є змінною в широких межах від -10 до -110 км/с відносно центра мас подвійної системи. Таким чином, це поглинання впродовж орбітального періоду відображає рух певних утворень на спостерігача. І, якщо в мінімумі променевих швидкостей (приблизно в фазі 0.6P) А-абсорбція може відображати стартову швидкість витікаючої речовини з поверхні яскравого компонента, то в їх максимумі - досить високу швидкість рухомого газу в 110 км/с, яка спостерігається в фазі 0.07P, коли при виході із затемнення відкривається яскравий компонент (див. рис.1, п.1.6.). Інтерпретація поведінки цих ліній звелась до руху газових потоків від яскравого компонента в напрямі до вторинного з основним потоком в фазі 0.07P. Цей потік з тилового боку акреціюючого супутника виникає згідно дії сил Коріоліса. Втім, в цій чисто гідродинамічній схемі не можна було передбачити високі швидкості А-абсорбції, які наявні перед центром затемнення: газові потоки мовби віялом охоплювали вторинний компонент (тому цю систему потоків ми й назвали при першому вивченні віялоподібною [71]). При витоці речовини через точку Лагранжа L_1 , що є поміж компонентами, ці спостереження суперечили теоретичним розрахункам.

Ситуація змінилась при відкритті та вивченні магнітного поля яскравого компонента [14,75], оскільки було зауважено, що поміж структурою поля та характером витоку з нього речовини існує певний зв'язок [129]. Це підтвердилось при більш точнім вивченні профілів сильних емісійно-абсорбційних ліній водню і гелію за допомогою ПЗС-спектрограм [94,97]. Розглядаючи кінематику абсорбції, яка прорізає емісію в лініях $\text{H}\alpha$, $\text{HeI}\lambda 6678,7065$ (див. рис.15 і 16, п.6.4.), ми відзначили, що здебільшого всі u_r -криві абсорбції співвідносяться з лінією гравітаційних центрів у системі. Коли в фазах 0.4-0.6P короткохвильове зміщення абсорбції мінімальне і за швидкістю співпадає з тепловою швидкістю на поверхні витікаючого компонента, то в фазах 0.8-0.2P довкола головного мінімуму воно вже

характеризує прискорений анізотропний вітер у напрямі масивного супутника. Однак на всіх u_r -кривих сформовано чіткий локальний мінімум у центрі зони магнітного полюса яскравого компонента, зверненого до масивного супутника. При інтерпретації поведінки цих абсорбцій слід також пам'ятати, що динаміка пов'язаних з ними емісій цілком відображає структуру поверхневого магнітного поля яскравого компонента із витоком речовини з його атмосфери (див. п. 6.4).

Все це разом формує уявлення про те, що перетікання речовини від яскравого компонента в значній мірі мусить здійснюватися вздовж силових ліній магнітного поля, а рух газових мас повинен контролюватися магнітосферою глобального магнітного поля яскравого компонента [94,97]. Саме в цьому процесі важливою стає зона магнітного полюса, що є звернена до масивного супутника. Спостереження цієї зони, зцентрованої до фази 0.86Р, передують центру головного затемнення. Витікаючи в цій зоні з яскравого компонента, газ переміщується вздовж силових ліній магнітного поля, попадаючи в зовнішніх частинах його ж магнітосфери в зону гравітаційного впливу масивного акреціюючого супутника. Відхиляючись до останнього і згущуючись, газ утворює потоки, що є видимими саме в фазах перед головним затемненням. В фазах після центру головного затемнення бачимо вже інші потоки, сформовані силами Коріоліса, переважно у звичайній гідродинамічній картині (див. рис. I, п. I.6.). Так утворюється оригінальна, віалоподібна система газових струменів, яка майже симетрично охоплює масивний компонент, суттєво відрізняючись від класичного випадку, коли газові потоки спостерігаються тільки з тилового боку супутника відносно його орбітального руху. Таким чином, віалоподібна картина газових потоків (низькошвидкісного неізотропного зоряного вітру) у взаємодійній системі β Ліри, запропонована нами ще в [71] і підтверджена на основі спостережень із ПЗС-детектором [97], стала, врешті, зрозумілою при врахуванні поверхневої структури магнітного поля яскравого компонента, який активно продовжує втрачати масу в процесі еволюції.

7.2. Переміщення газових мас всередині системи γ Шита.

Фазова залежність променевих швидкостей газових мас, які рухаються поміж компонентами системи γ Шита, виявлена на підставі вимірів доплерівських зміщень ліній поглинання водню та гелію синьої ділянки спектру, які в них формуються [25]. Вона багато в чому є подібною до такої ж у системі β Ліри [94, 97]. Будучи теж завжди від'ємними, променеві швидкості таких абсорбцій в спектрі γ Шита значно більші за абсолютним значенням, змінюючись у межах від -50 до -170 км/с (див. рис. 6, п. 4.4.). Їх максимальні швидкості спостерігаються в фазах 0.06-0.15P при проекції на яскравий компонент основного газового потоку, який відкривається (як і в системі β Ліри - див. рис. 1, п. 1.6.) з тилового боку масивного супутника після центра головного затемнення. В цьому переконує також те, що в фазі 0.97P, коли супутником закрито основний газовий потік, відбувається різке падіння променевих швидкостей цих абсорбцій [25].

Загальний висновок полягає в тому, що такі лінії, як і в системі β Ліри, утворюються в результаті самопоглинання при проекції на яскравий компонент витікаючого з нього ж газу, що за своєю природою є анізотропним зоряним вітром, який швидко прискорюється в напрямі до масивного супутника. Маючи в системі γ Шита значно вищу стартову швидкість за рахунок високої температури її яскравого γ 0-компонента, цей анізотропний вітер теж перетворюється в деякий аналог віялоподібної системи газових струменів, що в фазах навколо головного затемнення огортає вторинний компонент. І все ж, за рахунок сил Коріоліса й, вірогідно, при відсутності магнітного поля, основний газовий потік при більшій інтенсивності переносу речовини проявляється в системі γ Шита дещо вужчим жгутом, який і закривається в фазі 0.97P. Виходячи з характеру змінності з фазою енергетики і динаміки широким емісійним структур в комплексі із взаємопов'язаними з ними абсорбціями, приходимо до висновку [119, 122] про те, що γ Шита є другою поряд із β Ліри системою типу w Eмії з незвично сильно розвиненими навколосоряними газовими структурами.

7.3. Кінематичні характеристики стаціонарних газових оболонок поза межами взаємодіючих систем β Ліри й γ Шита.

Подібність абсорбційного спектру навколосоряних структур β Ліри й γ Шита виявилась ще більш разючою при розгляді ліній, які формуються у зовнішній розрідженій оболонці, яка, охоплюючи систему в цілому, розширюється з практично постійною швидкістю від центра системи. Така оболонка серед взаємодіючих подвійних систем була ідентифікована спершу тільки в системі β Ліри [4, 71, 131]. Вона проявляється вузькими абсорбціями в деяких лініях гелію (уяву про такі лінії можна скласти на підставі рис. 18, п. 4.5., на якому видно дві вузькі абсорбційні компоненти постійного зміщення в лінії HeI λ 3888). За спостереженнями β Ліри 1966-1972 рр. ми спершу дослідили поведінку двох таких ліній у синій ділянці спектру - HeI λ 3888, 3964 [71]. Променеві швидкості цих ліній від'ємні у всіх фазах і практично постійні з середньою швидкістю -125 км/с відносно центра маси системи. Вона перевищує параболічну швидкість відриву частинок від системи β Ліри (такі лінії використані нами при розробці незалежного способу визначення мас компонентів - п. 4.5.). І все ж ми звернули увагу на систематичне зміщення поміж променевими швидкостями ліній HeI λ 3888 та HeI λ 3964. Останні мають меншу швидкість на 5-7 км/с, що свідчить про деяку стратифікацію оболонки, яка розширюється назовні. Середня u_r -крива цієї абсорбції теж має хвилю невисокої амплітуди, відчувавчи гравітаційне поле системи складної конфігурації. Можна зробити висновок, що середовище, в якому виникають ці лінії, розташоване в оточенні околі від системи. Врахування ефектів дилатції, величина якої $w \approx 0.02$ - [4], приводить до такого ж висновку: ефективна відстань цієї оболонки від центрального джерела випромінювання приблизно рівна відстані поміж центрами обох компонентів.

Виникнення таких ліній гелію в розрідженому середовищі, з одного боку, зумовлене суттєвим надлишком гелію в хімічному складі яскравого компонента з активною втратою речовини, а, з другого боку, специфікою атомних переходів. Лінія HeI λ 3888 має нижній метастабільний рівень 2^3S , для якого дуже суттєві ефекти зіткнення (див. п. 4.5.). При високій насиченості цього рівня в розріджених середовищах поглинання з цього рівня може бути

суттєвим. Оскільки лінія HeI λ 3888 є другою лінією триплетної серії при переході з рівня 2^Sс вгору, був сенс вивчити поведінку першої лінії гелію цієї серії, а саме HeI λ 10830.

Спостереження лінії HeI λ 10830 були проведені в 1974 р. за допомогою електронно-оптичного перетворювача зображення типу ФКТ-1А(СІ), встановленого на 1.22-м телескопі Кримської астрофізичної обсерваторії [72]. Вузька та різка абсорбція, що прорізає сильну емісію, має променеві швидкості, які з малою амплітудою змінюються в межах мінус 130-150 км/с відносно швидкості центра мас системи. Це підтверджує стратифікацію оболонки, яка розширюється, запідозрену по лініям HeI λ 3888,3964, і змушує припускати, що її густина падає назовні разом із швидкості розширення. Враховуючи те, що лінія HeI λ 10830 має дуже сильну емісію, був сенс розглянути також її поведінку у зв'язку зі змінною структурою магнітного поля яскравого компонента. Виявилось, що і емісія лінії HeI λ 10830, зокрема повний потік її випромінювання (подібно до динаміки й енергетики сильних емісійних ліній H α , HeI λ 7065 -[94,97]), змінюється у взаємозв'язку з цим магнітним полем, зростаючи в 1.5 рази від фаз біля 0.36Р зони першого до фаз поблизу 0.86Р зони другого магнітного полюсів цього поля.

Це ще один факт щодо впливу магнітного поля на формування навколосоряних газових структур у системі β Ліри: зовнішня стратифікована оболонка довкола подвійної системи у її внутрішній частині відображає напрям осі диполя магнітного поля яскравого компонента, втрата речовини з якого поза межі системи теж здійснюється з більшою швидкістю та більш інтенсивно в зоні того магнітного поляса (зцентрованого до фази 0.86Р), який напівзвернений до масивного супутника. Таким чином, профіль променевих швидкостей у зоряному вітрі довкола системи має складну форму. І дійсно, якщо нанести на площині ці швидкості від центра яскравого компонента по позиційних кутах спостережень, отримаєм еліпс, витягнений вздовж осі магнітного поля. В цьому онаочненні стають зрозумілими результати виміру променевих швидкостей абсорбції в лінії SiII λ 1175, що змінюються від -150 км/с у фазах поблизу зони 0.36Р першого магнітного полюса до -300 км/с у зоні другого магнітного полюса (0.86Р), які опубліковані в результаті

дослідження далекого-ультрафіолетового спектру β Ліри [132].

Одним із важливих результатів для подальшого дослідження системи γU Шита теж було виявлення у її спектрі та вивчення вузьких складових у лініях гелію з нижнім метастабільним рівнем [25]. Однак в лінії $\text{HeI}\lambda 3888$ на широкій та глибокій складовій абсорбційного профілю, що досягає максимального зміщення в -100км/с у фазі головного затемнення, виявлено не одну, як у спектрі β Ліри, а дві різкі абсорбції постійного зміщення з фазою (див. рис. 18 п. 6.5.). Їх променеві швидкості відносно центра маси системи рівні відповідно -36 і -195 км/с. Їх тлумачення зводиться до їх виникнення у двох різних зовнішніх оболонках постійного розширення. Короткохвильова абсорбція вказує на розширення оболонки зі швидкістю, яка перевищує параболічну швидкість відриву частинок від системи (див. п. 4.5.), тобто, по аналогії із системою β Ліри, на наявність загальної оболонки, близької до системи. Така ж швидкість оболонки реєструється і в лініях $\text{HeI}\lambda 3964, 5015$, які теж мають нижні метастабільні рівні. Довгохвильова вузька абсорбція із значно меншою швидкістю розширення помічена тільки в лінії $\text{HeI}\lambda 3888$ (такої складової немає у спектрі β Ліри). Разом із сусідньою вузькою емісією вона формує профіль типу Р Лебеда. На відміну від роздвоєних небулярних емісій заборонених ліній $[\text{FeIII}]$, $[\text{OIII}]$, а також таких складових емісій інших ліній гелію, вузька емісія лінії $\text{HeI}\lambda 3888$ не роздвоєна, а завжди одиночна. Її променева швидкість співпадає з довгохвильовим піком заборонених ліній, а короткохвильовий пік відсутній і обернений у абсорбцію. Враховуючи також поведінку її еквівалентних ширин, зроблено висновок про те [25], що вузька абсорбція з меншою швидкістю розширення формується в сильно віддаленій од системи оболонці, динамічно зв'язаній з областю утворення небулярних емісійних ліній. Виникнення цієї лінії в небулярних структурах можна пояснити шляхом захоплення електрона іоном HeII [133], тобто є необхідність у жорсткім випромінюванні з $\lambda 504\text{\AA}$ - своєрідній накачці, яка заселяє атоми гелію у метастабільний стан 2^3S . Ця умова правдоподібно виконується [62].

Існування оболонки з постійною швидкістю розширення поза межами подвійних систем β Ліри й γU Шита є свідченням значної втрати маси з обох систем. Підрахунок показує, що в системі β Ліри

втрата маси поза систему становить приблизно $10^{-7} M_{\odot} \text{ рік}^{-1}$, що є значно меншою за втрату маси яскравим компонентом у цій взаємодіючій системі в результаті переносу речовини на вторинний компонент - близько $3 \cdot 10^{-5} M_{\odot} \text{ рік}^{-1}$ [96]; суттєво зростає при цьому і період системи - на 19 секунд у рік. В той же час втрата маси системою γ Шита (визначена по потоку радіовипромінювання - [127,128]) становить $10^{-4} M_{\odot} \text{ рік}^{-1}$ при практично постійному періоді системи [134]. Це є результатом кардинальної відмінності переносу і втрати речовини в цих системах: для β Ліри домінуючим є консервативний перенос маси між компонентами системи, в той час як для системи γ Шита приблизно рівноцінною, але дуже показовою в спектрі є неконсервативна форма втрати речовини, що веде при наявності потужного зоряного вітру зі швидкостями до 1000 км/с (за даними спостережень в далекому ультрафіолеті - [135]) до утворення в далеких її околицях радіотуманності, газопилових хмар, небулярних структур [62,127,136].

7.4. Лінії-сателіти спектра β Ліри як відображення обертання сателіт-диска довкола акреціючого вторинного компонента.

Оригінальною рисою абсорбційного спектру β Ліри, незвичною для взаємодіючих систем w Змії та алголів, є т.зв. лінії-сателіти. Вони проявляються як супутники в околі деяких ліній поглинання яскравого компонента (гелію, водню, іонізованих металів) у фазах +0.1P до 1 після центра головного затемнення, щезаючи в ньому впродовж 0.02P. В спектрі системи вони краще проявляються в фазах 0.92-0.97P з променевими швидкостями плюс 150-250 км/с (т.з. червоні сателіти) та в фазах 0.02-0.08P із доплерівськими зміщеннями в мінус 200-300 км/с - фіолетові сателіти. Тлумачення явища ліній-сателітів багато в чому визначало відому системи β Ліри, запропоновану О.Струве [4,5]. За ним, фіолетові сателіти формуються в газових потоках (як результат поглинання при проекції на яскравий компонент), які рухаються від яскравого компонента до вторинного. Обігнувши останній, потоки стають більш повільними і рухаються в сторону яскравого компонента, - тоді в них у результаті проекції на яскравий компонент спостерігаються вже червоні сателіти.

Вазуючись на тих же даних вимірів променевих швидкостей

О.Струве й деякі кількості власних вимірів ліній-сателітів, ми запропонували в свій час альтернативну гіпотезу [51]. За нею сателіти проявляються у спектрі системи в результаті ротаційного ефекту газового диска-кільця, яким охоплений вторинний компонент. У фазах до і після головного затемнення сателіт-диск по чергово проєктується на яскравий компонент то тим боком, швидкість обертання якого направлена до яскравого компонента, то боком з протилежно направленою швидкістю. Врахування від'ємної швидкості центра мас системи в межах похибок майже вирівнювало в абсолютних величинах швидкості червоних і фіолетових супутників і вело до середньої швидкості обертання цього диска-кільця близько 250 км/с.

Подальшим кроком у дослідженні феномена ліній-сателітів стали дані наших спостережень за допомогою ІЗС-детектора [57]. Уявлення про лінії-сателіти в спектрі β Ліри можна скласти на основі рис.19, який демонструє ділянки спектру поблизу лінії SiII $\lambda\lambda$ 6347,6371. Він описує виникнення, розвиток й зникнення ліній-сателітів як явища в фазах до та після центра головного затемнення. Нові дослідження променевих швидкостей та еквівалентних ширин ліній-сателітів було

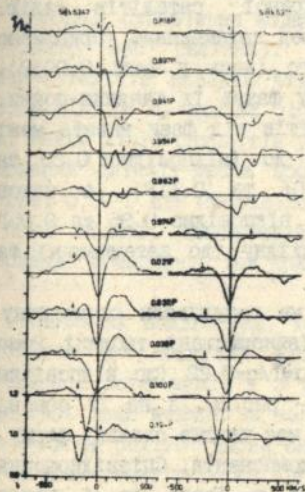


Рис.19. Ділянки нормованих спектрів β Ліри довкола ліній іонізованого кремнію. Оцифровка по ординаті стосується кожного профілю. Лінії приведені до променевої швидкості центра мас подвійної системи як нуль-пункта. Стрілками вказані лінії вторинного компонента (фази 0.818, 0.897 і 0.94P) і ліній-сателіти.

нами проведено на базі їх визначень у лініях $\text{SiII}\lambda 6347, 6371$ та в лініях $\text{HeII}\lambda 6678, 7065$ з подальшим включенням наших спектрофотографічних спостережень [44] високої дисперсії в лініях $\text{HeII}\lambda 4471$, $\text{MgII}\lambda 4481$, $\text{SiII}\lambda 6347$ із використанням даних [4,5] для ліній $\text{SiII}\lambda 4128, 4131$, $\text{HeII}\lambda 4471$, $\text{MgII}\lambda 4481$. Їх основні результати такі [57]:

1. Рух ліній-сателітів у спектрі β Ліри стратифікований. Криві променевих швидкостей і червоних, і фіолетових сателітів, виміряних у лініях різного ступеня збудження та іонізації (їх є три групи) мають різну амплітуду: ліній-сателіти гелію мають найбільшу амплітуду (біля $+240$ км/с в фазах до та -295 км/с у фазах після центра затемнення), лінії кремнію відповідно $+210$ та -280 км/с, а лінії магнію – найменшу ($+210$ та -250 км/с).

2. Спостерігається фазова асиметрія динамічних характеристик ліній-сателітів як певного явища. На v_r -кривих перед центром затемнення максимуми знаходяться в межах $0.035-0.045P$ до центра затемнення і в межах $0.015-0.025P$ після нього. Найближче до центра затемнення розташований максимум v_r -кривої сателітів гелію. Водночас сателіти асиметрично щезають перед затемненням (приблизно у фазі $0.980P$) і появляються після нього (десь у фазі $0.005P$). Однак зауважена міжсезонна відмінність у фазах їх щезання-появи.

3. Залежність еквівалентної ширини сателітів від фази вказує межі зародження і щезання сателітів у фазах до (відповідно 0.89 та $0.98P$) і після центра затемнення (0.01 та $0.11P$), а також досягнення ними максимуму інтенсивності – відповідно 0.95 та $0.05P$. При цьому максимуми W_λ попадають на висхідну (до затемнення) та нисхідну вітки v_r -кривих ліній-сателітів.

Враховуючи виявлені закономірності, ми побудували схематичну модель сателіт-диска в системі β Ліри (використані таблиці Роша [70] при співвідношенні мас компонентів $\alpha=1/q=0.22$ (що відповідає нашому недавньому його визначенню [46])) – рис.20, і на її основі зроблено такі висновки [57]. Сателіт-диск має швидше овальну форму, він витягнутий у напрямі руху вторинного компонента. Співвідношення радіусів диска вздовж великої його осі в фазах до і після затемнення $\approx 4/3$. Другий висновок полягає в тому, що диск має певну стратифікацію умов збудження різних ліній-сателітів, а також

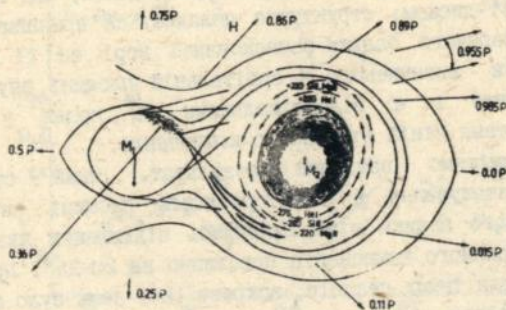


Рис.20. Схематична модель β Ліри і структура газового диска ($\odot$ — центр мас системи). На відповідних радіусах формування ліній-сателітів вказана швидкість обертання сателіт-диска згідно максимумів їх u_r -кривих [57]. Тонкими довгими стрілками показані межі вияву ліній-сателітів у спектрі, а також інші фази ефективного виявлення сателіт-диска або затемнення ним магнітного полюса: у напрямі 0.36–0.86P проведено вісь магнітного полюса із штрихуванням у зоні полюса. Внутрішній щільний диск, яким закамфований вторинний компонент, теж показаний штрихуванням.

Їх променевих швидкостей. Так, сателіти в лініях гелію формуються найближче до поверхні вторинного компонента в більш гарячих внутрішніх його шарах і з більшою швидкістю його обертання (вона виявилась дещо меншою за кеплерівську). З тилового боку компонента при меншому радіусі диска швидкість руху частинок в ньому вища. На цю частину сателіт-диска діє основний газовий потік, який вірогідно і притискає диск до поверхні вторинного компонента. Третій висновок стосується автономності обертання сателіт-диска, що впливає з того факту, що його швидкість майже в три рази більша за швидкість

осевого обертання акреційного вторинного компонента, а також на основі абсолютної спектрофотометрії β Ліри, зокрема, безпосередньо з форми монохроматичної кривої блиску на $\lambda 6485 \text{ \AA}$ [17] в фазах головного мінімуму. Враховуючи рішення кривих блиску в смугах В і V системи β Ліри [42], найібільш вірогідно вважати, що компонент, огорнений сателіт-диском, структурно складається принаймні з двох частин: більш гарячого балджа-замаскованої зорі та її достатньо щільного й теж витягнутого в орбітальній площині внутрішнього диска, які разом і є відповідальними за прояв у спектрі взаємодіючої системи ліній вторинного компонента.

Окремо відмітимо важливий результат, який стосується просторового розташування в екваторіальній площині витягнутого сателіт-диска: його велика вісь виявилась відхиленою назовні від напрямку руху вторинного компонента приблизно на $20-25^\circ$. При цьому, враховуючи дані для інших сезонів, зокрема [5], нами було зауважено [57], що в параметрах сателіт-диска наявні довгоперіодичні зміни.

7.5. Міжсезонна змінність в лініях Si III $\lambda 6347, 6371$ й ознаки прецесійного руху сателіт-диска.

Дослідження характеристик дублету Si III $\lambda 6347, 6371$ за спостереженнями в наступний сезон 1992 р. та виявлена їх змінність від сезону до сезону підтвердили й довготривалі зміни у поведінці сателіт-диска [119]. Необхідність спостережень у кількох послідовних сезонах системи β Ліри стосується перш за все явищ (і в їх числі фенсмена ліній-сателітів, спостережуваного в фазах $\leq \pm 0.1P$ довкола центра головного затемнення), тривалість яких співрозмірна із земною добою. Це визначається досить великим і майже кратним добі орбітальним періодом $P \approx 12.94$, так що на добу припадає $0.077P$, в той час, коли в кожній із тринадцяти діб за сезон вдається перекрити тільки $\geq 0.03P$.

Спостереження за допомогою ПЗС-детектора в сезоні 1991-1992 рр. виявились досить інформативними. По-перше, це стосується власне ліній-сателітів, вивчення яких сформувало для них надійні криві $\varphi_r = f(P)$ та $\omega_\lambda = f(P)$ у лініях дублету кремнію - рис.21, а це дозволило уточнити характеристики сателіт-диска і зафіксувати в ньому певні зміни. Зокрема підтверджена асиметричність максимумів

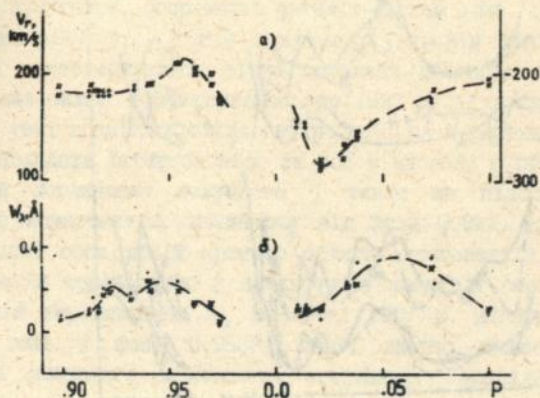


Рис.21. а) v_r -криві ліній-сателітів Si III 6347, 6371 за даними спостережень 1991р. (хрестики) і 1992р. (точки). Шкали променевих швидкостей у фазах до і після центра затемнення зміщені по ординаті б) залежності $w_\lambda = f(P)$ для Si III 6347 (точки) і Si III 6371 (хрестики).

абсолютних значень променевих швидкостей відносно центра затемнення (вони припадають відповідно на 0.958 та 0.022P), що продукує еліптичність диска. В сезоні 1992 р. ліній-сателіти чітко спостерігались при виході із затемнення вже в фазах 0.009-0.014P, тоді як у сезоні 1991 р. вони ледве були помітні в фазі 0.021P. Їх інтенсивність стала дещо більшою в фазах 0.940 і 0.973P. Однак слід відзначити раптове двократне збільшення їхньої еквівалентної ширини в фазах 0.920-0.925P. Втім, цей зріст поглинання потоку випромінювання у сателіт-диску (що є результатом проєкції його на яскравий компонент) стане зрозумілим тільки в порівнянні з комплексним вивченням ліній поглинання обох компонентів та загальної емісії, як характерних деталей сумарного профілю ліній Si III 6347, 6371.

Для цього на рис.22 показані криві $w_\lambda = f(P)$ як ліній поглинання, так і Si III-емісії за спостереженнями 1991-1992 рр. На

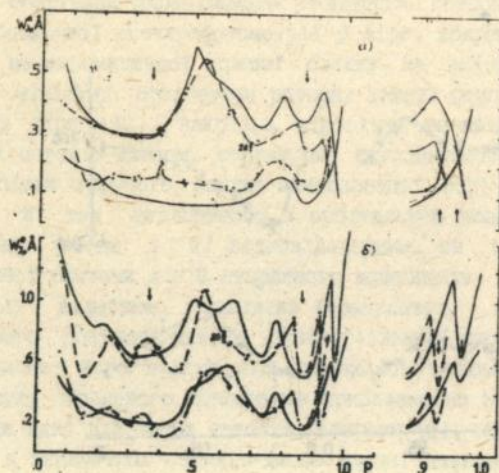


Рис.22. а) - залежності $W_{\lambda}=f(P)$ для абсорцій яскравого (кружки) і вторинного (точки) компонентів в лінії SiIIλ6347 за даними 1991р. (суцільні лінії) і 1992р. (штриховані). Стрілки вказують фази екстремумів кривої напруженості магнітного поля яскравого компонента (див. рис.20). Праворуч в удвоєному масштабі виділені фази 0.925 і 0.955P, в яких відповідно у 1992 та 1991 рр. відбулось вирівнювання W_{λ} ліній поглинання обох компонентів, як в лінії SiIIλ6347 (суцільна крива), так і в SiIIλ6371 - (штрихова). б) - нанесені штрихом залежності $W_{\lambda}=f(P)$, отримані за даними спостережень 1992р. [119] для емісій в лініях SiIIλ6347 (кружки) та SiIIλ6371 (точки). Суцільні криві демонструють ці ж залежності за даними спостережень 1991р.[58]. Справа в удвоєному масштабі в фазах 0.93 і 0.97P відповідно для 1991 і 1992 рр. показано різке зменшення еквівалентної ширини SiII-емісії в результаті затемнення області її ефективного утворення поблизу поверхні яскравого компонента в зоні його магнітного полюса.

розглядаючи детально характер їх зміни впродовж всіх фаз (про це у наступнім розділі), звернемо увагу на поведінку еквівалентних ширин

в фазах 0.9-1.0P, пригадавши [97], що емісія динамічно зв'язана із зоною того магнітного полюса (фаза 0.86P), який звернений до масивного супутника, огорненого сателіт-дискон (див. також п.6.4.). За даними 1991 р. у цій зоні на W_{λ} -кривій лінії поглинання SiII λ 6347 спостерігалась чітко виражена двогорба та симетрична ділянка, яка сильно zdeформувалась до 1992 р. Її локальний мінімум звужився, такі ж зміни пройшли синхронно і на W_{λ} -кривих для емісії. Однак розглядати їх треба перш за все у зв'язку з різким падінням W_{λ} ліній поглинання яскравого і таким же підсиленням ліній вторинного компонентів, починаючи від фази 0.92P. В фазі 0.925P інтенсивності обох ліній кремнію обидвох компонентів вирівнюються (що на рис.22 краще видно у збільшеному масштабі справа). Важливо те, що таке вирівнювання W_{λ} в сезоні 1991 р. відбувалось значно пізніше, лише у фазі 0.955P, отже, значно ближче до центра затемнення яскравого компонента вторинним. Паралельно в обидва сезони відбулось різке (до двох раз), короткочасне зменшення інтенсивності SiII-емісії вздовж всього профіля в обох лініях кремнію, так що на W_{λ} -кривих емісії є локальний глибокий мінімум відповідно у фазах 0.97 і 0.93P для 1991 та 1992 рр. Саме в цих фазах синхронно спостерігалось зростання еквівалентних ширин ліній-сателітів дублету кремнію.

Тлумачення вищеприписаного явища звелось до виявлення за даними спостережень 1991р. локального затемнення (див. рис.20) ущільненим сателіт-дискон певної форми поверхні яскравого компонента з областю посиленого формування емісії в зоні його магнітного полюса, зцентрованої до фази 0.86P [58,119]. Переміщення впродовж року від фази 0.97P до 0.93P (тобто в напрямку обертання диска) центра локального мінімуму W_{λ} SiII-емісії з паралельною зміною W_{λ} ліній поглинання обох компонентів (див. рис.22) не може бути пояснене інакше, ніж зміною умов локального затемнення яскравого компонента сателіт-дискон зміненої за цей час конфігурації. Найбільш правдоподібно, що відбувся поворот видовженої частини сателіт-диска в сторону яскравого компонента принаймні на 40-50°. В цьому разі, для сезону 1992 р. довга вісь диска фіксується майже симетричною до її розташування у сезоні 1991 р. відносно лінії, проведеної з центра вторинного компонента в напрямі його орбітального руху -

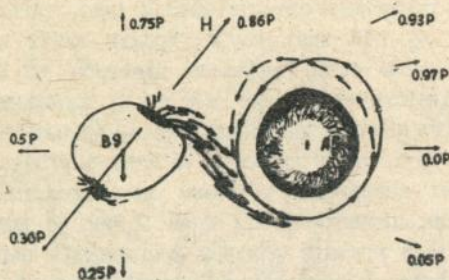


Рис.23. Схематична модель β Ліри (див. також рис.1 і 20) з можливим поворотом сателіт-диска в напрямі його обертання з 1991 до 1992 рр. (в останньому його положення вказане штриховими стрілками).

рис.23, однаке це може бути і прецесійний рух.

Цей новий спостережувальний факт цікавий ще з таких точок зору. Він стверджує, зокрема, видовжену форму сателіт-диска. Він передбачає також обертання диска довкола вторинного компонента. В припущенні, що його тривалість значно більша за рік, матимем для неї 4-8 років. Ці фактори важливі для пояснення довгоперіодичних змін у фотометричних і спектральних характеристиках системи β Ліри, неодноразово відмічених спостерігачами. Наприклад, в [43,137] для такої змінності були знайдені періоди в 3-4 роки. Цим легко пояснюються зміни форми кривої блиску в різні сезони в фазах головного мінімуму. До речі, в [138] у гіпотезі непрозорого диска змінної форми якісно інтерпретовані такі зміни, виявлені в сезони 1958 та 1959 рр. по міжнародній координованій програмі. Недавно повідомлено [6] про можливість систематичних змін на кривих блиску β Ліри з характерним періодом в 275 діб. Наші дані не суперечать і такому періоду, з враховуючи дані спостережень [5] про суттєві зміни у променевих швидкостях ліній-сателітів впродовж десятих циклів одного сезону, можна надати цьому більш короткому періоду

певний пріоритет. Не виключено теж, що такий рух сателіт-диска може спричинитися до виникнення довгоперіодичної складової результуючого коливного процесу в атмосфері яскравого компонента в результаті взаємодії різного типу нерадіальних коливань [80]. Можливий його вплив і на відкрите недавно явище циклічних змін еквівалентних ширин ліній поглинання яскравого компонента [58]. В зв'язку із відкриттям магнітного поля і у вторинного компонента [90] й можливістю певної замагніченості сателіт-диска, повинна існувати магнітна взаємодія поміж компонентами і сателіт-диском. Одне з цих завдань майбутніх спостережень.

8. ДЕЯКІ НОВІ ЯВИЩА І ЕВОЛЮЦІЙНИЙ СТАТУС β ЛІРИ ТА КУ ПІТА.

8.1. Феномен циклічних змін еквівалентних ширин ліній поглинання атмосфери яскравого компонента системи β Ліри.

Особливості спектра β Ліри при їх детальному вивченні на основі спостережень із ІЗС-детектором набули деяких нових рис, для яких немає аналогів. Одним із таких явищ, виявлених нами, є зміни циклічного характеру внутрі орбітального періоду еквівалентних ширин ліній поглинання атмосфери яскравого компонента [58,119]. Спершу за спостереженнями 1991 р. були зафіксовані незвичні пофазні зміни W_λ у лініях поглинання дублету SiII λ 6347,6371. Маючи близькі рівні збудження, вони виявили істотно відмінні W_λ -криві, особливо поблизу зони того магнітного полюса яскравого компонента, який звернений до масивного супутника. Для лінії SiII λ 6347 (див. рис.22) спостерігалась чітка двогорбистість W_λ -кривої, що була відсутня в лінії SiII λ 6371. Здеформувались дещо до 1992р. (збурюючим фактором цього процесу цілком вірогідно служить обертання видовженого сателіт-диска - див. п.7.5.), ця крива все ж зберегла свої риси. При тім W_λ SiII-емісії в основному відтворювала хід змін еквівалентних ширин ліній поглинання. Таку квазіперіодичність можна було с пояснити поведінкою специфічних ліній кремнію з емісією, які формуються в найзовнішніших шарах атмосфери із втратою з неї речовини при певній впливі на цей процес магнітного поля.

Однак вивчення слабких ліній $\text{Ne I } \lambda\lambda 6334, 6383$ (вони присутні на тих же ІБС-спектрограмах), що, навпаки, формуються глибоко в атмосфері зорі, теж показало вздовж фази орбітального періоду досить швидкі, інколи двократні зміни циклічного характеру на їх W_λ -кривих.

В зв'язку з цим були проведені дослідження змінності з фазов еквівалентних ширин близько сотні ліній поглинання в синій області спектра β Ліри. Спектрограми її були отримані нами на 1.22-м та 2.6-м телескопах Кримської астрофізичної обсерваторії впродовж сезону 1966 р. для десяти основних фаз кривої блиску системи, а виміри еквівалентних ширин ліній поглинання були опубліковані в [139]. При достатній точності залежностей $W_\lambda = f(P)$ вони практично для кожної лінії показують індивідуальний хід. Як виявилось, всі ці залежності промодульовані не тільки орбітальним рухом, а й відображають водночас структуру магнітного поля яскравого компонента. Нове полягає в тому, що десятки W_λ -кривих нагадують биття, тобто, незалежно від природи явища, виглядають результатом суперпозиції гармонічних коливань з різними амплітудами і

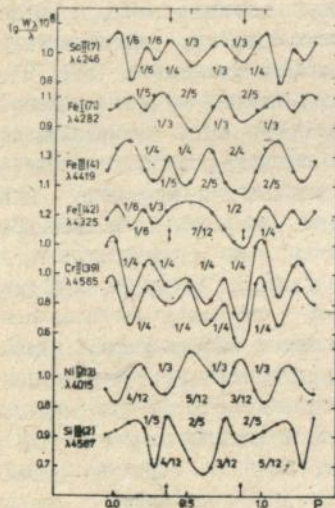


Рис.24. Циклічна змінність W_λ всередині орбітального періода (дрібні числа циклів кратні періоду) в лініях яскравого компонента із вказанням номером мультиплета. W_λ визначені відносно континуума подвійної системи (кружки) і континуума яскравого компонента (точки). Похибка визначення $\lg W_\lambda$ співрозмірна з величиною кружка ($\sigma \approx 0.02$). Стрілки відповідають екстремумам магнітного поля.

частотами, кратними частоті орбітального обертання. Циклічні зміни на W_{λ} -кривих інколи дуже чіткі. Наприклад, на рис.24 всі локальні максимуми W_{λ} -кривої лінії CrII4565 модульовані орбітальним рухом, співпадаючи з фазами 0.0 та 0.5P, що на осі гравітаційних центрів обох компонентів, а також із перпендикулярними до неї фазами 0.25 та 0.75P. Водночас локальні мінімуми цієї ж кривої для хрому співпадають з фазами 0.36 та 0.86P на осі магнітного диполя, а також із фазами 0.11 і 0.61P, розташованими вздовж лінії, перпендикулярної до цієї осі (див. рис.1, 8). Локальні максимуми та мінімуми, отже, зміщені на позиційний кут в $1/7P$ поміж цими фізично значущими осями, а циклічні зміни на цій W_{λ} -кривій становлять $1/4P$. Розгляд рис.24 та багатьох рисунків, подібних цьому, показує, що й в інших W_{λ} -кривих фази, пов'язані цими двома напрямками, виділяються екстремально, або є вузловими. При цьому перехід до еквівалентних ширин ліній W_{λ} , віднесених до континуума власне тільки яскравого компонента (згідно розробленої методики врахування потоку його випромінювання в композиційному континуумі системи β Ліри - [46,58]), якісно мало змінило картину залежностей W від фази, що й видно на прикладі лінії CrII4565.

Таким чином, ми прийшли до висновку, що в лініях поглинання яскравого компонента проявляється невідомий досі феномен циклічних змін їхніх еквівалентних ширин всередині орбітального періоду, який відображає певні коливні процеси в його атмосфері під дією його магнітного і гравітаційного полів [58]. Були проведені спроби класифікації W_{λ} -кривих, враховуючи картину розщеплення ліній у магнітному полі і значення факторів Ланде, повний момент імпульса атомів і відношення інтенсивностей ліній у мультиплетах, ступінь збудження та іонізації. Чітких залежностей не виявлено (потрібні масові спостереження з детектором низького шуму в синій ділянці спектра), але можна констатувати виділення трьох груп ліній. До першої з них відносяться такі лінії, W_{λ} -криві яких найбільш явно відповідають орбітальній модуляції: їх максимуми припадають, як правило, на фази 0.0 та 0.5P. Це легкозбуджувані та резонансні лінії, що формуються в горішніх шарах атмосфери. Для другої групи ліній залежності $W_{\lambda}=f(P)$ чіткіше корелюють з фазовою змінністю магнітного поля яскравого компонента. Це лінії більш високого

ступеня збудження та іонізації, які формуються глибше в атмосфері. Третя, проміжна група, демонструє зміни w_λ як розмаїті коливання водночас у гравітаційному та магнітному полях. Ці групи ліній грубо повинні відобразити специфіку зміни умов збудження та магнітного

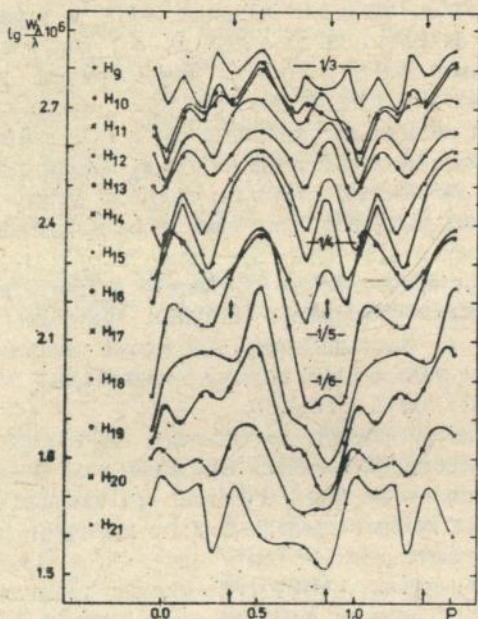


Рис.25. Залежності від фази приведених до континуума яскравого компонента β Ліри еквівалентних ширин ліній поглинання високих членів бальмерівської серії. Спостерігається значна відмінність від лінії до лінії хвилоподібних варіацій кривих $w'_\lambda = f(P)$ вздовж орбітального періода, особливо в зоні спостереження того магнітного полюса яскравого компонента, який є ближчим до масивного вторинного компонента. Стрілками позначені фази екстремумів магнітного поля (див. рис.8, п.5.2.).

поля з висотою в атмосфері вздовж еліпсоїдальної zdeформованої поверхні яскравого компонента системи β Ліри.

З цієї точки зору показовим є рис. 25 із зміною з фазою W_λ неспотворених емісій ліній високих членів балмерівської серії. Систематична зміна форми W_λ -кривих при переході від H9 до H21 має відображати фізичні умови при заглибленні в атмосферу. Однак є моменти, які ніяк не вкладаються в межі стандартних тлумачень. Наприклад, при спостереженні поверхні яскравого компонента продовж фаз від 0.51P до 0.74P еквівалентні ширини балмерівських ліній H13-H14 зростають в півтора рази, тоді як для ліній H16-H17 аж в три рази. Ще більш незрозумілою, хоча внутрішньо закономірною видається поступова зміна еквівалентних ширин цих ліній водню при спостереженнях в фазах $(0.86 \pm 0.15)P$ зони магнітного полюса, зверненого до масивного супутника. Якщо в лінії H9 фазам центру цієї зони відповідає локальний мінімум W_λ із симетричною структурою, яка дещо нагадує в цих фазах зміну еквівалентної ширини лінії поглинання SiII λ 6347 (рис.22, п.7.5.), то в лініях H12-H16 спостерігається зворотня картина: явний локальний максимум. В лініях H16-H18 він практично стрибком перетворюється знову ж у глибокий мінімум. Ширина локального максимума вздовж ліній H9-H18 поступово зменшується від 1/3 до 1/6 орбітального періода.

При інтерпретації феномена циклічних змін еквівалентних ширин ліній яскравого компонента слід враховувати роль багатьох задіяних в ньому механізмів. Зокрема перспективним виглядає механізм розширення спектральних ліній тиском, істотним має бути квазістатичне розширення контурів ліній гелію та водню (в той же час градієнт температури в тих шарах атмосфери, в яких формуються H9-H21 лінії водню, не настільки великий, щоб бути визначальним у виявленому явищі, однак ця зміна може бути суттєвою вздовж сильно zdeформованої поверхні яскравого компонента поблизу в 4.5 рази більш масивного і близького супутника). Слід нагадати і про швидку зміну магнітного поля з висотою в атмосфері, виявлену на основі ПЗС-спектрограм β Ліри [89,90], та квазіперіодичні зміни магнітного поля в його максимумі [17]. Це викликає сумніви в адекватності моделі простого диполя природі магнітного поля яскравого компонента і вимагає розгляду складніших моделей типу зміщеного диполя чи

дипольно-квадрупольного поля (спостереження відомої магнітної зорі α^2 Cyg теж показали [140], що магнітне поле росте в глибину з градієнтом, що перевищує дипольний).

В кожному разі, виявлений феномен циклічної змінності еквівалентних ширин ліній "замагніченої" та водночас витікаючої атмосфери zdeформованого яскравого компонента ставить завдання теоретичного плану: розрахувати фізичну картину цього явища з врахуванням розглянутих вище та інших механізмів (цікавим у їх колі є питання про аномалії хімічного вмісту елементів у атмосфері яскравого компонента в аспекті вивчення вносу продуктів термоядерного синтезу з надр зорі вздовж силових ліній магнітного поля). На жаль, для свого вирішення це завдання вимагає інтенсивних спостережень за допомогою детектора низького шуму, з максимумом чутливості у синім діапазоні спектра, в якому набір ліній поглинання яскравого компонента системи β Ліри є визначальним, тобто є задачею на майбутнє.

8.2. Осциляції та резонанси в системі β Ліри і можливе збудження нерадіальних коливань яскравого компонента.

Починаючи від абсолютної спектрофотометрії β Ліри в лінії H α 1978-1979 рр., коли у фазах другої елонгації зберігалась чітка змінність абсолютного потоку випромінювання в H α -емісії з підперіодом в 1/7 орбітального [114], квазіперіодичні та циклічні процеси в системі β Ліри стали об'єктом нашої уваги, особливо, коли невдовзі вторинна періодичність такої ж тривалості була виявлена в ті ж фазах на кривій змінності магнітного поля (вони співпали із зоною спостереження магнітного полюса, зверненого до масивного супутника) - див. рис.6, п.5.2., [75]. Саме величині в 1/7P відповідає зміщення між напрямом проєкції осі диполя магнітного поля на площину орбіти, тобто 0.36-0.86P, та напрямом осі гравітаційних центрів зір-компонентів 0.5-0.0P. Не виключено, що цей фактор має визначальне значення. З часом картина виявлених явищ ускладнилась: H α -фотометрія, усереднена за шість сезонів спостережень, зберегла кратність в 1/7P - п.6.3., але зменшилась амплітуда, передбачаючи довгоперіодичні зміщення з фазою. Недавно виявлено цілий спектр циклічних змін еквівалентних ширин багатьох

ліній поглинання яскравого компонента [58] - п.8.1. Ясно, що такого типу осциляційні явища співвідносяться з поверхнею яскравого компонента: скажімо, його магнітне поле є вимірним по зееманівському розщепленню ліній атмосфери, а $\text{H}\alpha$ -емісія формується в близькому околі компонента, в газових структурах, утворених в процесі витікання його маси. В своїй сукупності спостережувальні факти свідчать про певні резонансні ефекти та осциляції - рис.26. Моделювання значень кривої напруженості магнітного поля показало [80], що вони добре представляються суперпозицією трьох гармонічних коливань із періодами P - орбітальним, $P_1 = 1/6P$, $P_2 = 1/8P$, коли

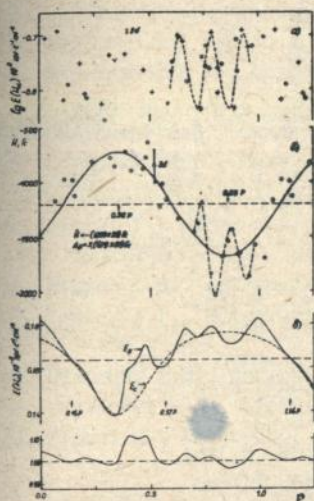


Рис.26. а) - зміна абсолютного потоку випромінювання в $\text{H}\alpha$ -емісії з фазою за даними щілинної фотометрії 1978 р. (хрестики) та 1979 р. (кружки); б) - зміна з фазою ефективною напруженості магнітного поля яскравого компонента (див. п.5.2.); в, г) - потік випромінювання в $\text{H}\alpha$ -емісії, усереднений за шість сезонів в 1974-1985 рр. (див. рис.12, п.6.3)

в процесі биття і виникає спостережуваний період в $1/7P$.

В зв'язку з цим була зроблена спроба виникнути в фізику цих циклічних процесів, розглянувши можливість резонансного підсилення амплітуди коливних поверхневих рухів при взаємодії приливної хвилі з неадіальними коливаннями яскравого компонента [80]. Для цього важливо було оцінити вірогідність неадіальних коливань яскравого

23. Huovelin J., Poutanen M., Tuominen I., Helsinki Univ. Techn. Radio Lab. Report. S166. 1986. P.18.
24. Плачинда С.И., Якушечкин А.В., Сергеев С.П., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1993. Т.87. С.124.
25. Скульский М.Ю., Астрон.ж. 1992. Т.69. С.803.
26. Скульский М.Ю., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1972. Т.45. С.135.
27. Belton M.J.S., Woolf N.J., Astrophys. J. 1965. V.141. P.145.
28. Willstrop R.N., Mem. Roy. Astron. Soc. 1965. V.69. P.83.
29. Бурнашев В.И., Скульский М.Ю. Изв. Крымской астрофиз. obs. 1978. Т.59. С.64.
30. Кульчицкий А.В., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1973. Т.47. С.176.
31. Никонев В.Б., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1975. Т.54. С.3.
32. Бурнашев В.И., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1977. Т.57. С.57.
33. Шаховской Н.М., Астрон. ж. 1964. Т.41. С.142.
34. Шулов О.С., Астрофизика. 1967. Т.3. С.233.
35. Боярчук А.А., Гершберг Р.Е., Подовников Н.В., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1967. Т.38. с.308.
36. Харитов А.В., Терещенко В.М., Плущкова Е.А. и др., Труды астрофиз. инст-та АН Казахстана. 1974. Т.24. С.3.
37. Abt H.A., Jeffers H.M., Gibson J. et al., Astrophys. J. 1962. V.135. P.429.
38. Woolf N.J., Astrophys. J. 1965. V.141. P.155.
39. Kondo J., Mc Cluskey C.F., Houck T.E., Coll. IAU N15. Veroff.: Remeis.-Sternw. Bamberg; 1971. Bd.9.N100. P.308.
40. Struve O., Publ. Astron. Soc. Pac. 1958. V.70. P.5.
41. Kopal Z., Astrophys. J. 1941. V.93. P.92.
42. Wilson R.E., Astrophys. J. 1974. V.189. P.316.
43. Скульский М.Ю., Астрон. ж. 1971. Т.48. С.766.
44. Скульский М.Ю., Астрон. ж. 1975. Т.52. С.710.
45. Bahyl' V., Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1986. V.37. P.364.
46. Скульский М.Ю., Топильская Г.П. Письма в АЖ. 1991. Т.17. С.619.
47. Dimitrov D., Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1987. V.38. P.240.
48. Wright S., Argyros J., Commun. Univ. London. Obs. 1975. V.75. P.3.
49. Kuruch R., Astrophys. J. Suppl. Ser. 1979. V.40. P.1.
50. Скульский М.Ю. Проблемы косм. физики. Вісник Київ. унів. Сер.

астрон. 1975. Т.10. С.160.

51. Скульский М.Ю., Астрон. циркуляр. 1974. N827. С.3.
52. Скульский М.Ю., Переменные звезды. 1973. Т.18. С.609.
53. Скульский М.Ю., Сиколарчук В.М., Циркуляр АО Львсв. ун-та 1976. N51. С.20.
54. Curtiss H.R., Publ. Allegheny Obs. 1912. V.2. P.73.
55. Struve O., Svolopoulos S.N., Zebergs V., Astrophys. J. 1960. V.131. P.111.
56. Kranjc A., Mem. Soc. Astron. Ital. 1960. V.31. P.211.
57. Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1992. Т.18. С.711.
58. Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1993. Т.19. С.49.
59. Ziolkowski J., Astrophys. J. 1976. V. 204. P.512.
60. Леушин В.В., Снежко Л.И., Письма в АЖ. 1980.
61. Balachandran S., Lambert D.L., Tomkin J. et al., Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 1986. V.219. P.479.
62. Головатый В.В., Скульский М.Ю. Астрон. Ж. 1992. Т.69. С.1069.
63. Скульский М.Ю., Бюлл. Абастум. астрофиз. обс., 1985. Т.58. С.101.
64. Закиров М.М., Бюлл. Абастум. астрофиз. обс. 1985. Т.58. С.425.
65. Ciatti F., Mammato A., Margoni R. et al., Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1980. V.41. P.143.
66. Popper D.M., Astrophys. J. 1943. V.97. P.394.
67. Cowley A.P., Hutchings J.B., Publ. Astron. Soc. Pac. 1976. V.88. P.456.
68. Старицын Е.И., Астрон. Ж. 1991. Т.68. С.306.
69. Скульский М.Ю., Циркуляр АО Львов. ун-та. 1976. N51. С.13.
70. Plavec M., Kratochvil P., Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1964. V.15. P.145.
71. Скульский М.Ю., Астрон. циркуляр. 1973. N766. С.4.
72. Гирняк М.Б., Скульский М.Ю., Шанин Г.И., Щербаков А.Г., Изв. Крымской астрофиз. обс. 1978. Т.58. С.75.
73. Антропов Ю.Ф., В кн.: Новая техника в астрономии., Ред. Михельсон Н.Н., "Наука", Ленинград. 1972. С.75.
74. Глаголевский Ю., Найденов И.Д., Романюк И.И. и др., Сообщ. Спец. астрофиз. обс. 1978. N24. С.62.
75. Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1985. Т.11. С.51.
76. Skulskij M.Yu., In: Magnetic stars. Eds. Glagolewskij Yu.V.,

спостережень з метою його дослідження є те, що розраховані нами періоди нерадіальних коливань яскравого компонента, зокрема їх фундаментальної моди, знаходяться саме в зоні резонансу.

8.3. Хімічний склад і еволюційний стан систем β Ліри й γ Щита:

а) особливості вивчення хімічного складу яскравого компонента β Ліри і будови його атмосфери;

б) хімічний склад небулярних структур системи γ Щита як відображення втрати речовини яскравим компонентом.

Хоча деякі лінії вторинного компонента системи β Ліри тепер вже впевнено виявлені та досліджені [46,58], домінування в композиційному спектрі ліній атмосфери яскравого компонента є визначальним. Перше визначення хімічного складу цієї атмосфери виявило незвично високе відношення He:H [145]. Хоча в наступній роботі [146] це відношення було дещо зменшене, але при цьому було прийнято завищену температуру збудження. Досліджуючи спектр поглинання, ми зауважили, що цій атмосфері притаманні водночас лінії широкого діапазону ступенів збудження та іонізації. Тому крім дослідження хімічного складу, ми поставили задачу виявлення змінності фізичних параметрів атмосфери, зокрема, впродовж орбітального циклу, для чого були отримані спектрограми β Ліри в десяти основних фазах зміни блиску системи [50,147]. Як і в попередніх роботах, кількісний експрес-аналіз в усіх фазах проводився за допомогою методу кривої росту (недавно в роботі [46] ми опублікували результати розрахунків синтетичних композиційних спектрів β Ліри в деяких спектральних інтервалах: вони показують, що хімічний склад узгоджується з найновішими визначеннями його при представленні континууму, як для одинокої зорі, скажімо, в [47,61]).

Було виявлено, що температура збудження в усіх фазах є приблизно рівною (дещо більшою в елонгаціях), але мікротурбулентна швидкість в атмосфері яскравого компонента є суттєво змінною: від 5.5 км/с в елонгаціях до 18 км/с в головному мінімумі [50,147], тобто зі сторони вторинного масивного компонента. Оскільки зростання мікротурбулентної швидкості корелює із зменшенням густини в атмосферах зір, це простіше пояснити зміною сили тяжіння вздовж поверхні яскравого компонента в результаті спотворення його фігури

приливними силами. Однак, якщо користуватись не моделлю Роша, в якій маса зорі вважається зосередженою в її центрі, а врахувати реальний закон розподілу густини від центру зорі назовні, то як показали розрахунки [148] для співвідношення мас $q=4$ (що олізке до теперішнього значення $q=4.5$ для β Ліри [58]), відношення осей еліпсоїдального яскравого компонента становитиме 1.17. При такій видовженості та здеформованості яскравого компонента на його виступах значно повинна впасти густина атмосфери та потік випромінювання, що й спостерігається. Визначення хімічного складу атмосфери яскравого компонента ми проводили за допомогою спектрограм, отриманих у фазі вторинного мінімуму, коли його вклад у континуум системи є домінуючим. Отримані значні його відхилення від сонячного (нормального) хімічного складу. Це дослідження, як звичайно, проводилось при певних фізичних параметрах P, g, T зб. "іон". Однак наявність в атмосфері яскравого компонента як ліній високого збудження, так і ліній відносно низького збудження потребувало спеціального дослідження питання визначуваності хімічного складу в залежності від прийнятих умов в атмосфері яскравого компонента в межах, які б могли в ній існувати: $10000 < T < 14000 \text{ K}$, $1 < \lg P < 4$. В усіх варіантах моделі суттєвий надлишок порівняно з нормальним показують елементи He, N, C, S, Si, Mn, Sc. Особливо значним є надлишок вмісту гелію та азоту при дефіциті водню. Така аномальність хімічного складу свідчить про те, що в системі β Ліри ми зараз спостерігаємо результати вигорання водню в надрах яскравого компонента в реакціях C, N, O-циклу, що невдовзі було константовано в роботах [60, 61]. В подальшому, в [149], враховуючи відкриття магнітного поля цього компонента [15, 75], ми звернули увагу на взаємозв'язок його хімічного складу із хімічним складом магнітних зір. Як і в останніх, спостерігається надлишок Si, Mn, Sc, а також депресія в континуумі на $\lambda 5200$, змінність якої, до речі (див. п.5.3.), теж корелює зі змінністю магнітного поля [85].

Наявність ліній іонів суттєво відмінного потенціалу збудження стверджує, що вони утворюються в атмосфері, відмінній від нормальної. Виявилось, що в цій атмосфері з витіканням речовини наближення до нормального хімічного вмісту можна дістати при деякій стратифікації: лінії високого потенціалу збудження, такі як

HeI, NII, SiIII, CII, SII виникають при високій температурі та низькому електронному тискові, а лінії відносно нижчого потенціалу збудження, наприклад, FeI, CrI, TiII - в більш густих шарах атмосфери при нижчій температурі. На рис.27 ми демонструємо це залежністю величини $[X] = \lg(N_{\text{елем}}/N_{\text{Fe}})_{\beta \text{ Ліри}} - \lg(N_{\text{елем}}/N_{\text{Fe}})_\odot$ від потенціалу збудження ϵ_i для різних хімічних елементів у двох варіантах: по

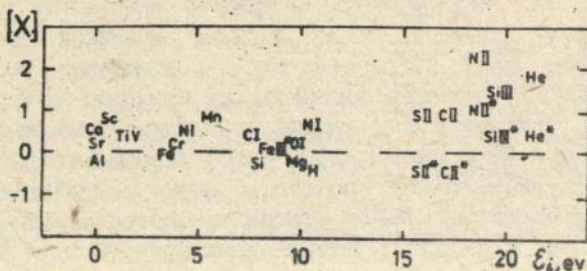


Рис.27. Залежність [X]-індекс - потенціал збудження для різних хімічних елементів в атмосфері яскравого компонента β Ліри.

відношенню до заліза, середньозваженого із визначень $\lg N$ для FeI і FeII без урахування наявності ліній FeIII у спектрі, а також із таким врахуванням (останній відмічено зірочками). В рамках локальної термодинамічної рівноваги такий хід стратифікації незрозумілий, і, якщо він є реальним, то, вірогідно, повинен завдячувати активній втраті речовини цим компонентом. Тепер ми можемо стверджувати, що при цьому слід зважати на такі нові фактори, як магнітне поле чи приливні та нерадіальні коливання, які відображаються в циклічній змінності еквівалентних ширин ліній поглинання яскравого компонента.

Підбиваючи загальний підсумок вивчення хімічного складу й беручи до уваги моделювання еволюції системи β Ліри [59], приходимо до висновку, що ця система знаходиться на етапі закінчення швидкої втрати маси яскравим компонентом та її акреції тепер більш масивним супутником. Більшу частину багатой воднем оболонки яскравим компонентом вже втрачено, відкриті багаті гелієм та азотом шари

його теперішньої атмосфери. Фізичні умови на поверхні цієї здеформованої зорі суттєво відрізняються від умов у атмосфері нормальної зорі такого ж спектрального класу. Втрата і перенос речовини не проходить ламінарно, вони ускладнені несиметричною відносно осі центрів структурою магнітного поля яскравого компонента, високою вірогідністю нерадіальних коливань та різних резонансів, спричинених приливною взаємодією компонентів, мультициклічними процесами в його атмосфері.

Спроба визначення хімічного складу яскравого компонента системи γ Щита при малій кількості його ліній і невисокій якості наявних спектрограм не дала потрібної точності. Можна лише стверджувати надлишок гелію та дефіцит водню. Однак наші дослідження [25,62] показують, що утворення небулярних структур в цій системі може бути результатом неконсервативного переносу речовини поміж гарячими масивними компонентами при її великій втраті поза межі подвійної системи. Спостерігаються, зокрема, дві оболонки, що покидають систему з постійними швидкостями, а також високошвидкісний зоряний вітер (див. п.7.3.). У цьому аспекті теж були цікавими результати нашого визначення фізичних параметрів та хімічного складу небулярної оболонки з її численними вузькими емісіями (їхні усереднені еквівалентні ширини для цього були переведені в абсолютні потоки випромінювання на межі земної атмосфери [62]). Виявилось, що лінійчастий спектр цих структур нагадує спектр планетарних туманностей, свічення яких збуджується іонізуючим випромінюванням центральних зір: балмерівський декремент оболонки більше відповідає рекомбінаційному механізму збудження, ніж механізму зіткнень. Тому для вивчення фізичних характеристик небулярної оболонки γ Щита (електронна концентрація і температура, розміри і структура оболонки, параметри збуджуючої зорі) та її хімічного складу були застосовані методи вивчення планетарних туманностей.

Для визначення електронної концентрації та температури небулярних структур n_e , T_e використано співвідношення авроральних та небулярних заборонених ліній $[NII]\lambda\lambda 5755/(6548+6584)$. Отримано, що $n = 6 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^5$ та 10^5 см^{-3} відповідно для $T_e = 10000$, 15000 та

20000K (співвідношення $[\text{NeIII}]\lambda 3869/[\text{OIII}]\lambda (4969+5007)$) при дуже слабкій лінії $[\text{NeIII}]\lambda 3869$ дозволяє оцінити тільки верхню границю $n_e \leq 6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$). Такі температури є характерними для областей HII, утворених в результаті взаємодії жорсткого УФ-випромінювання з розрідженим газом. Важливим виявилось питання узгодження розрахованих і спостережуваних розподілів енергії спектра R' Щита. Воно стало можливим при припущенні, що середовище утворення небулярних ліній не сфера, а кільцеподібне утворення, сформоване поблизу орбітальної площини (в системі RY Щита нахил орбіти $i=85^\circ$ [126]). Ми провели [62] порівняння розрахованого планківського розподілу енергії для різних варіантів температур центрального джерела (в межах 28000-50000K) із спектральними даними для RY Щита в діапазоні $\lambda\lambda 1200-9700\text{K}$ та в інфрачервоному діапазоні. Найкраще з оптичним і УФ-спектром узгоджується крива із $T_{\text{зорі}} = 40000\text{K}$ і $R_{\text{зорі}} = 1.4 \cdot 10^{12} \text{ см}$ (присутність у спектрі системи інфрачервоного надлишку випромінювання є у всіх варіантах, що стверджує наявність у системі пилу при температурі $\approx 200\text{K}$; радіовипромінювання від RY Щита теж має значний надлишок, не узгоджуючись з чорнотільним в усьому діапазоні вказаних температур [150]). Однак спостереження для більш яскравого H α -компонента дають температуру 28000-30000K. Отже, теоретичні розрахунки узгоджуються з результатами рішення фотометричної кривої блиску RY Щита [126], що стверджують наявність у системі гарячого джерела з $T=40000\text{K}$, яке співвідноситься з полюсами масивного супутника, закамфльованого в орбітальній площині акреціючим диском. У цьому аспекті модель RY Щита є дубліником системи β Ліри: подібні результати отримані при рішенні фотометричної кривої блиску β Ліри [42].

Для визначення іонних концентрацій різних елементів у небулярних структурах використані співвідношення, відомі з літератури, зокрема, з монографії [151], а також апроксимаційні формули, виведені на основі розрахунків фотоіонізаційних моделей свічення планетарних туманностей [62,152]. При визначенні хімічного складу, виходячи також із можливої стратифікації небулярних структур, припускалось, що лінії $[\text{SiII}]$, $[\text{NiII}]$ утворюються в області з $T=10000\text{K}$, а лінії CIV , SiIV - в області з $T_e=20000\text{K}$. Інші спостережувані лінії утворюються в області з лінійною

залежністю між T_e та потенціалом іонізації SII , $NI1$ і $CI1$. У цьому разі лінії HeI , $[NI1]$, $[OI1]$, $[NeIII]$, $[Si1]$, $[SiII]$ і $[FeII]$ утворюються в області з $T_e \approx 10000K$ та $n_e \approx 6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Таким чином, найбільш вірогідний такий хімічний склад газу небулярної оболонки: $He/H \approx 0.89$, $C/H \approx 2.3 \cdot 10^{-4}$, $N/H \approx 2 \cdot 10^{-4}$, $O/H \approx 6.6 \cdot 10^{-5}$, $Ne/H \approx 9.9 \cdot 10^{-5}$, $Si/H \approx 2.4 \cdot 10^{-4}$, $S/H \approx 1.1 \cdot 10^{-5}$, $Fe/H > 4 \cdot 10^{-5}$. Порівнюючи хімічний склад небулярної оболонки із сонячним ($He/H=0.1$, $C/H=4.7 \cdot 10^{-4}$, $N/H=0.98 \cdot 10^{-4}$, $O/H=8.3 \cdot 10^{-4}$, $Ne/H=1.0 \cdot 10^{-4}$, $Si/H=0.43 \cdot 10^{-4}$, $S/H=0.17 \cdot 10^{-4}$, $Fe/H=0.33 \cdot 10^{-4}$ - [152,153]), бачимо явну його відмінність від нормального. Спостерігається великий надлишок вмісту гелію порівняно з воднем (врахування ударних збуджень ліній гелію приведе до $He/H \approx 0.79$, тобто воно зменшиться не суттєво), а також збільшений порівняно з вуглецем і киснем вміст азоту.

Це важливий результат як в сенсі інтерпретації утворення небулярної оболонки внаслідок виносу речовини яскравого компонента поза межі взаємодіючої системи підчас неконсервативного обміну масою компонентів, так і в аспекті розгляду еволюційного статусу системи RY Шита. В такому разі можемо стверджувати, що в атмосфері яскравого компонента, який втрачає масу, спостерігається речовина з його надр - результат процесу вигорання водню в CNO -циклі. Дійсно, продвинута стадія еволюції цього компонента підтверджується спостережуваним тепер зворотнім відношенням мас компонентів. Будучи більш масивним на початку еволюції (вихідна маса первинного компонента становила приблизно $20 M_{\odot}$ при наповненні його порожнини Роша і обміну речовиною після вигорання водню в ядрі [68]: тоді напівконвекція встигає перемішати речовину із зміненням у CNO -циклі вмістом елементів із речовиною верхніх шарів цього компонента), він на даний час має масу в три рази меншу за масу супутника, всього приблизно $8 M_{\odot}$ [25]. На діаграмі маса-світність цей компонент попадає в область завершення втрати речовини через заповнення ним порожнини Роша. Виходячи з цього, спостережувані аномалії гелію і CNO -елементів в небулярних структурах довкола системи RY Шита, а, отже, і на поверхні її яскравого компонента, який втрачає речовину, пояснюються цілком природно. Отже, можемо констатувати подібність еволюції обох масивних взаємодіючих систем β Ліри й RY Шита, які є водночас вельми оригінальними об'єктами типу W $SmII$.

Таким чином, дослідження хімічного складу яскравого компонента системи β Ліри та небулярних структур системи RY Щита приводить до висновку про притаманність продвинутої стадії еволюції їх яскравим компонентам внаслідок вигорання водню в їх надрах у реакціях CNO -циклу, що спричинилось до спостережуваної тепер активної стадії переносу речовини поміж компонентами системи із утворенням в їх околі цілого набору розвинутих газових структур.

9. УЗАГАЛЬНЮЮЧІ ПІДСУМКИ.

Вище ми виклали дані всебічних спектральних спостережень та основні результати вирішення давно назрілих завдань, а також відкриття і вивчення нових явищ, які, назагал, і призвели до нового розуміння природи й будови взаємодіючої системи β Ліри. Це був тривалий процес, як через специфіку спостережень цього об'єкта, враховуючи великий та майже кратний добі орбітальний період, так і через специфіку забезпечення спостережень на крупних телескопах (зскрема, конкурсність заявок через КТШТ; поступове удосконалення і створення якісно нової апаратури). Так, перше ототожнення ліній вторинного компонента в композиційному спектрі системи β Ліри було здійснене ще 1972 р. при досить високому спектральному розділенні, однак остаточне своє логічне завершення задача визначення мас компонентів системи змогла отримати лише в 1990-1992 рр. завдяки спостереженням з використанням ПЗС-детектора, що, врешті, й забезпечило потрібне високе відношення сигнал/шум і точність у вимірах променевих швидкостей. Від моменту відкриття магнітного поля яскравого компонента до в'яснення його поверхневої структури потребувались майже щосезонні спостереження на 6-м телескопі впродовж 1980-1988 рр. і т.п. Водночас наші спостереження системи β Ліри показали, що її дослідження традиційно залишаються доброю астрофізичною лабораторією. Зокрема, застосування основних принципів методики пошуку ліній вторинного компонента до спектра RY Щита призвело до визначення мас компонентів і цієї системи, а аналіз абсорбційно-емісійного спектра розвинених газових структур в околі цих обох систем - до розробки та подальшої апробації

нового, незалежного способу визначення мас компонентів при їх крупномасштабній взаємодії.

До важливих результатів, зв'язаних із відкриттям та вивченням магнітного поля і супроводжуваних його явищ, ми відносимо також доказ впливу поля на різні процеси, що протікають як в атмосфері яскравого компонента, так і в його магнітосфері, зокрема, на формування оригінальної віялоподібної системи газових потоків поміж компонентами. Порівняльний аналіз навколосоряних газових структур у системах β Ліри та γ Щита призвів до виявлення спільних рис в їх будові. Це стосується картини переміщення газових мас всередині обох систем і їх акреції на масивний супутник, присутності загальних оболонок, що скидаються обома системами поза їх межі. Можна сподіватись, що це має не лише діагностичні чи прогностичні, а й узагальнюючі наслідки для подальшого вивчення і розуміння систем типу ω Змії, як систем з розвинутими навколосоряними газовими структурами на активній стадії первинного переносу речовини. Водночас цей аналіз виявив багатство індивідуальних рис, зумовлених характером явища переносу в цих системах: скажімо, утворення оригінального сателіт-диска довкола акреціюючого масивного компонента β Ліри при явно вираженому консервативному переносі речовини між компонентами, або утворення змінних небулярних структур в околі системи γ Щита при визначальній неконсервативності такого переносу.

Водночас наші дослідження ставлять нові завдання у подальшому вивченні систем β Ліри й γ Щита, для реалізації яких передбачаються тривалі спостереження на крупних телескопах. Звернемо увагу на такі напрямки. В зв'язку з виявленням у кількох фазах орбітального періоду магнітного поля у вторинного компонента β Ліри, нагальними стають його дослідження з метою вияснення характеру змінності з фазою і можливої магнітної взаємодії обох компонентів. Це, правдоподібно, краще допоможе зрозуміти природу вторинного компонента, враховуючи дані позаатмосферних спостережень про надмірну інтенсивність континууму β Ліри в далекому ультрафіолеті, які інтерпретуються у припущенні, що вторинний компонент може бути гарячою, замаскованою зорею [10]. Необхідно продовжити вивчення магнітного поля яскравого компонента, що

зумовлено виявленням оригінального по формі ходу зміни магнітного поля з фазою в різних спектральних лініях, спаду магнітного поля з висотою у витікаючій атмосфері, а також впливу магнітного поля на виявлене нами явище циклічної змінності еквівалентних ширин ліній поглинання яскравого компонента. Все це могло б бути реалізованим при встановленні ПЗС-детектора, чутливого до синьої ділянки спектру. Отримання в ній якісного спектрального матеріалу уможливить розрахунок лінійчастого синтетичного спектру системи β Ліри з подальшим визначенням фізичних параметрів та хімічного складу яскравого компонента з урахуванням випромінювання обох компонентів та навколосоряних структур. До речі, вивчення останніх залишається актуальним в сенсі виявлення впливу магнітного поля на їх формування: скажімо, в аспекті магнітної взаємодії обох компонентів і сателіт-диска чи дослідження виявленого прецесійного обертання видовженого сателіт-диска навколо вторинного компонента. Однак, в зв'язку із специфікою спостережень β Ліри у вузьких фазових інтервалах, для вирішення цього завдання необхідні або позаатмосферні дослідження, або добре скоординовані спостереження на 3-4 обсерваторіях, рознесених по довготі довкола Землі.

В дисертаційній роботі ми багато уваги приділили дослідженню системи $\gamma\gamma$ Щита, як системи спорідненої до β Ліри. Незважаючи на порівняно невисоку яскравість, якісно новим етапом дослідження цієї системи мусить бути перехід на її спостереження з детектором низького шуму. Це продиктовано, передусім, необхідністю точних вимірів доплерівських зміщень ототожнених нами слабких ліній вторинного компонента з метою більш впевненого визначення мас обох компонентів, емісійно-абсорбційних деталей складних ліній, відповідальних за динаміку близьких навколосоряних утворень, а також детального вивчення розщеплення заборонених ліній небулярних структур та їх змінності з фазою орбітального періоду, як нововиявленого феномена.

Ми вважаємо, що проведення таких досліджень є перспективним і стане наступним кроком до розуміння природи й уточнення будови взаємодіючих систем β Ліри та $\gamma\gamma$ Щита, а, отже, і споріднених їм систем ω Змії, як певного класу рідкісних об'єктів на активній стадії першого етапу обміну речовиною поміж їх компонентами.

ЦИТИРОВАНА ЛИТЕРАТУРА.

1. Асланов А.А., Касимов Д.Е., Логунова Н.А. Хрузина Е.С., Черепашук А.М., Каталог тесных двойных звезд на поздних стадиях эволюции. Изд. Моск. ун-та. 1989. С.49.
2. Yung A., Snyder J.A., *Astrophys. J.* 1982. V.262. P.269.
3. Belopolsky A., *Mem. della Soc. Spett. Ital.* 1897. V.26. P.135.
4. Struve O., *Astrophys. J.* 1941. V.93. P.103.
5. Sahade J., Huang S.S., Struve O., Zebergs V., *Trans. Amer. Philos. Soc.*, 1959. V.49. P.1.
6. Guinan E.E., *Space Science Reviews.* 1989. V.50. P.35.
7. Sahade J., *Space Science Reviews.* 1980. V.26. P.349.
8. Plavec M.J., In: *Interacting Binaries.* Eds. Eggleton P.P., Pringle J.E., by D. Reidel Publ. Comp. 1985. P.155.
9. Hack M., Hutchings J., Kondo Y., et. al., *Mem. Soc. Astron. Ital.* 1974. V.45. P. 805.
10. Polidan R.S., *Space Science Reviews.* 1989. V.50. P.85.
11. Devinnej E.J., *Nature.* 1971. V.233. P.11.
12. Kondo Y., Parsons B.S., Henize K.G., *Astrophys. J.* 1976. V.208. P.468.
13. Горбачкий В.Г., *Астрон. циркуляр.* 1972. №707. С.1.
14. Скульский М.Ю., *Астрон. циркуляр.* 1972. №741. С.3.
15. Скульский М.Ю., *Письма в АЖ.* 1982. Т.8. С.238.
16. Бурнашев В.И., *Изв. Крымской астрофиз. обс.* 1988. Т.80. С.54.
17. Бурнашев В.И., Скульский М.Ю., *Изв. Крымской астрофиз. обс.* 1991. Т.83. С.108.
18. Найденов И.Д., Чунтонов Г.И., *Сообщ. Спец. астрофиз. обс.* 1976. Т.16. С.63.
19. Глаголевский Ю.В., Чунтонов Г.А., Найденов И.Д. и др., *Сообщ. Спец. астрофиз. обс.* 1979. Т.25. С.5.
20. Алексеев Г.Н., Бескин Г.М., *Астрофиз. исслед.* 1976. Т.8. С.53.
21. Алексеев Г.Н., Драбек С.В., Саморуков Г.С. и др., *Изв. Крымской астрофиз. обс.* 1983. Т.67. С.177.
22. Березин В.Ю., Зуев А.И., Кирьян Г.В. и др., *Письма в АЖ.* 1991. Т.17. С.953.

23. Huovelin J., Poutanen M., Tuominen I., Helsinki Univ. Techn. Radio Lab. Report. S166. 1986. P.18.
24. Плачинда С.И., Якушечкин А.В., Сергеев С.П., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1993. Т.87. С.124.
25. Скульский М.Ю., Астрон.ж. 1992. Т.69. С.803.
26. Скульский М.Ю., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1972. Т.45.С.135.
27. Belton M.J.S., Woolf N.J., Astrophys. J. 1965. V.141. P.145.
28. Willstrop R.N., Mem. Roy. Astron. Soc. 1965. V.69. P.83.
29. Бурнашев В.И., Скульский М.Ю. Изв. Крымской астрофиз. obs. 1978. Т.59. С.64.
30. Кульчицкий А.В., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1973. Т.47.С.176.
31. Никонзов В.Б., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1975. Т.54. С.3.
32. Бурнашев В.И., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1977. Т.57. С.57.
33. Шаховской Н.М., Астрон. ж. 1964. Т.41. С.142.
34. Шулов О.С., Астрофизика. 1967. Т.3. С.233.
35. Боярчук А.А., Гершберг Р.Е., Годовников Н.В., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1967. Т.38. с.308.
36. Харитов А.В., Терещенко В.М., Глушкова Е.А. и др., Труды астрофиз. инст-та АН Казахстана. 1974. Т.24. С.3.
37. Abt H.A., Jeffers H.M., Gibson J. et al., Astrophys. J. 1962. V.135. P.429.
38. Woolf N.J., Astrophys. J. 1965. V.141. P.155.
39. Kondo J., Mc Cluskey C.F., Houck T.E., Coll. IAU N15. Veroff.: Remeis.-Sternw. Bamberg; 1971. Bd.9.N100. P.308.
40. Struve O., Publ. Astron. Soc. Pac. 1958. V.70. P.5.
41. Kopal Z., Astrophys. J. 1941. V.93. P.92.
42. Wilson R.E., Astrophys. J. 1974. V.189. P.316.
43. Скульский М.Ю., Астрон. ж. 1971. Т.48. С.766.
44. Скульский М.Ю., Астрон. ж. 1975. Т.52. С.710.
45. Bahyl' V., Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1986. V.37. P.364.
46. Скульский М.Ю., Топильская Г.П.б Письма в АЖ. 1991.Т.17.С.619.
47. Dimitrov D., Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1987. V.38. P.240.
48. Wright S., Argyros J., Commun. Univ. London. Obs. 1975. V.75. P.3.
49. Kuruch R., Astrophys. J. Suppl. Ser. 1979. V.40. P.1.
50. Скульский М.Ю. Проблемы косм. физики. Вісник Київ. унів. Сер.

- астрон. 1975. Т.10. С.160.
51. Скульский М.Ю., Астрон. циркуляр. 1974. N827. С.3.
52. Скульский М.Ю., Переменные звезды. 1973. Т.18. С.609.
53. Скульский М.Ю., Смолларчук В.М., Циркуляр АО Львов. ун-та 1976. N51. С.20.
54. Curtiss H.R., Publ. Allegheny Obs. 1912. V.2. P.73.
55. Struve O., Svolopoulos S.N., Zebergs V., Astrophys. J. 1960. V.131. P.111.
56. Kranjc A., Mem. Soc. Astron. Ital. 1960. V.31. P.211.
57. Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1992. Т.18. С.711.
58. Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1993. Т.19. С.49.
59. Ziolkowski J., Astrophys. J. 1976. V. 204. P.512.
60. Леушин В.В., Снежко Л.И., Письма в АЖ. 1990.
61. Balachandran S., Lambert D.L., Tomkin J. et al., Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 1986. V.219. P.479.
62. Головатый В.В., Скульский М.Ю. Астрон. Ж. 1992. Т.69. С.1069.
63. Скульский М.Ю., Бюлл. Абастум. астрофиз. obs., 1985. Т.58. С.101.
64. Сокиров М.М., Бюлл. Абастум. астрофиз. obs. 1985. Т.58. С.425.
65. Ciatti F., Mammato A., Margoni R. et al., Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1980. V.41. P.143.
66. Popper D.M., Astrophys. J. 1943. V.97. P.394.
67. Cowley A.P., Hutchings J.B., Publ. Astron. Soc. Pac. 1976. V.88. P.456.
68. Старицын Е.И., Астрон. Ж. 1991. Т.68. С.306.
69. Скульский М.Ю., Циркуляр АО Львов. ун-та. 1976. N51. С.13.
70. Plavec M., Kratochvil P., Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1964. V.15. P.145.
71. Скульский М.Ю., Астрон. циркуляр. 1973. N766. С.4.
72. Гирияк М.Б., Скульский М.Ю., Шанин Г.И., Щербаков А.Г., Изв. Крымской астрофиз. obs. 1978. Т.58. С.75.
73. Антропов Ю.Ф., В кн.: Новая техника в астрономии., Ред. Михельсон Н.Н., "Наука", Ленинград. 1972. С.75.
74. Глаголевский Ю., Найденов И.Д., Романюк И.И. и др., Сообщ. Спец. астрофиз. obs. 1978. N24. С.62.
75. Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1985. Т.11. С.51.
76. Skulskij M.Yu., In: Magnetic stars. Eds. Glagolewskij Yu.V.,

- Kopylov I.M., "Nauka", Leningrad. 1988. P.47.
77. Skuiskij M.Yu., Mitteilungen KSO Tautenburg. 1990. N125.P.146.
78. Bahyl' V., Pikler J., Rreiner J.M., Acta Astron. 1979.
V.29. P.393.
79. Пискунов Н.Е., Хохлова В.Л., Письма в АЖ. 1993. Т.9. С.665.
80. Косовичев А.Г., Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1990. Т.16.С.240.
81. Didelon P., Astron.and Astrophys. Suppl.Ser. 1984. V.55. P.69.
82. Cramer N., Maeder A., Astron. and Astropys. 1980. V.88. P.135.
83. Maitzen H.M., Astron. and Astrophys. 1981. V.95. P.213.
84. Houck B., Nurth P., Astron. and Astrophys. 1982. V.114. P.23.
85. Бурнашев В.И., Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1986. Т.12. P.535.
86. Глаголевский Ю.В., Чунтонов Г.А., Найденев И.Д. и др.,
Сообщ. Спец. астрофиз. общ. 1979. Т.25. С.5.
87. Романик И.И., Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1986. Т.22. С.25.
88. Skulskij M.Yu., Naidenov I.D., Romanyuk I.I., Bychkov V.D.,
In: "Stellar magnetism". Eds. Glagolewskij Yu.V.,
Romanyuk I.I., "Nauka", St-Peterburgs. 1992. P.204.
89. Skulskij M.Yu.; Plachida S.I., Malkov Yu.P., In: "Stellar
magnetism". Eds. Glagolewskij Yu.V., Romanjuk I.I.,
"Nauka", St-Peterburg. 1992. P.216.
90. Скульский М.Ю., Плачинда С.И. Письма в АЖ. 1993. Т.19. С.525.
91. Плачинда С.И., Якушечкин А.В., Сергеев С.И., Изв. Крымской
астрофиз. общ. 1993. Т.87. С.104.
92. Swings P., Jose P.D., Astrophys.J. 1950. V.111. P.513.
93. Beals C.B., Publ. Dom. Ap. Obs. Victoria. 1951. V.9. P.1.
94. Скульский М.Ю., Мальков Ю.Ф., Астрон.Ж. 1992. Т.69. С.291.
95. Погодин М.А., Астрофизика. 1990. Т.32. С.371.
96. Мандушев Г.И., Астрон. циркуляр. 1988. N1533. С.15.
97. Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1993. Т.19. С.116.
98. Plachinda S.I., In: "Magnetic Stars". Eds. Glagolewskij Yu.V.,
Kopylov I.M., "Nauka", Leningrad. 1988. P.54.
99. Svolopoulos S.N., Astron. Nachr. 1967. V.290. P.155.
100. Sahade J., Trans. IAU. 1964. 12B. C.494.
101. Batten A.H., Sahade J., Publs. Astron. Soc. Pac. 1973.
V.85. H.599.
102. Stebbins J., Kron G.E., Astrophys. J. 1956. V.123. P.440.

103. Благодыр Я.Т., Скульский М.Ю., Циркуляр АО Львов. ун-та.
1979. N54. З.51.
104. Касаркевич В.С., Скульский М.Ю., Вопросы астрофизики. Вісник
Львів. унів. Сер. астрон. 1981. N56. С.36.
105. Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1980. Т.6. С.628.
106. Касаркевич В.С., Скульский М.Ю., Вопросы астрофизики. Вісник
Львів. унів. Сер. астрон. 1981. N56. С.28.
107. Алексеев А.Г., Скульский М.Ю., Бюлл. Абастум. астрофиз. общ.
1985. Т.58. С.57.
108. Алексеев А.Г., Скульский М.Ю., Астрофиз. исслед. (Изв. САО).
1989. Т.28. С.21.
109. Алексеев Г.Н., Изв. Крымской Астрофиз. общ. 1983. Т.67. С.177.
110. Алексеев Г.Н., Сообщ. Спец. астрофиз. общ. 1974. Т.12. С.5.
111. Алексеев Г.Н., Бескин Г.М., Астрофиз. исслед. 1976. Т.8. С.53.
112. Соколов В.В., Ченцов Е.Л., Астрофиз. исслед. (Изв. САО).
1984. Т.18. С.8.
113. Bless R.S., Eaton J.A., Meade M.R., Publ. Astr. Soc. Pac.
1976. V.88. P.899.
114. Бурнашев В.И., Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1980. Т.6. С.587.
115. Tüg A., White N., Lookwood G.W., Astron. and Astrophys.
1977. V.61. P.679.
116. Харитонов А.В., Терещенко В.М., Тр. АИ АН Казах. 1972. Т.21. С.13.
117. Харитонов А.В., Терещенко В.М., Князева Л.И., Бойко П.И.,
Астрон. Ж. 1980. Т.57. С.587.
118. Hajes D.S., Latham D.W., Astrophys. J. 1975. V.197. P.593.
119. Скульский М.Ю., Письма в АЖ. 1993. Т.19. С.417.
120. Mihalas D., Conti P.S., Astrophys. J. 1980, V.235. P.515.
121. Skulskij M.Yu., In: "Stellar magnetism". Eds.
Glagolewskij Yu., Romanjuk I.I., "Nauka", St-Peterburg.
1992. P.216.
122. Скульский М.Ю., Сообщ. Тарт. астрофиз. общ. 1990. N107. С.57.
123. Каретников В.Г., Менченкова Е.В., Астрон. циркуляр.
1988. N1531. С.11.
124. Каретников В.Г., Менченкова Е.В., Астрон. циркуляр.
1989. N1536. С.25.

125. Karetnikov V.G., Menchenkova E.V., Skulskij M.Yu. et al.,
Contr. Astr. obs. Scalnate Pleso. 1991. V.20. P.33.
126. Антохина Э.Ф., Черепашук А.М., Письма в АЖ. 1988. Т.14. С.252.
127. Grasdalen G.L., Hackwell J.A., Gehrz R.D. et al.,
Astrophys. J. 1979. V.234. P.129.
128. Purton G.R., Feldman P.A., Marsh K.A. et al., Mon. Not.
Roy. Astron. Soc. 1982. V. 198. P.321.
129. Скульский М.Ю., Сообщ. Абастум. астрофиз. общ. 1985. Т.58. С.53.
130. Скульский М.Ю., Астрон. циркуляр. 1973. N765. С.6.
131. Kuiper G.P., Astrophys. J. 1941. V.93. P.133.
132. Hack M., Hutchings J.B., Kondo Y., Mc Claskey G.E.,
Astrophys. J. Suppl. Ser. 1977. V.34. P.565.
133. Zirin M., Astrophys. J. 1975. V.199. P.63.
134. Черепашук А.М., Бюлл. Абастум. астрофиз. общ. 1985. Т.58. С.133.
135. Sahade J., Brandt E., Fontela J.V., Astron. and Astrophys.
Suppl. Ser. 1984. V.56. P.17.
136. Wright A.E., Barlow M.J., Mon. Not. Roy. Astron. Soc.
1975. V.170. P.41.
137. Алдусева В.Я., Астрон. Ж. 1969. Т.46. С.832.
138. Larson-Leander G., Vistas Astron. 1970. V.12. P.183.
139. Скульский М.Ю., Вовчик Е.Б., Циркуляр Львов. Астрон. общ.
1971. N45. С.25.
140. Романик И.И., Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1991. Т.33. С.53.
141. Горбачев В.Г., Космическая газодинамика. М. Наука. 1977.
142. Unno W., Osaki Y., Ando H., Shihosashi H., In: Nonradial
oscillations of stars. Univ. Tokyo press. 1979.
143. Косовичев А.Г., Северный А.Б., Изв. Крымской астрофиз.
общ. 1985. Т.70. С.14.
144. Kato S., Publ. Astr. Soc. Japan. 1974. V.26. P.341.
145. Воярчук А.А., Астрон. Ж. 1959. Т.36. С.5.
146. Hack M., Job F., Zs. Astrophys. 1965. B62. С.203.
147. Скульский М.Ю., Астрон. циркуляр. 1972. N668. С.2.
148. Мережин В.В., Труды Казан. горн. АО. 1972. Т.38. С.16.
149. Skulskij M.Yu., In: "Upper Main Sequence Stars with
Anomalous Abundances", Coll. IAU N90. Eds. Cowley C.R.,
et al., Utrecht Reidel Publ. Comp. 1986. P.365.

150. Hjellming R.M., Blankenship L.S., Balick B., Nature Phsy. Sci. 1973. V.242. P.84.
151. Aller L.N., In: Physics of Termal Gaseous Nebulae. 1984. P.350.
152. Lambert D.L., Lucke R.E., Mon. Not. Roy. Astr. Soc. 1978. V.183. P.79.

Список основных публікацій по темі дисертації.

1. Скульский М.Ю. Элементы орбиты β Лyr. - Астрон.Ж. 1971. Т.48. С.766-776.
2. Скульский М.Ю., Вовчик Е.Б. Эквивалентные ширины линий поглощения в спектрах β Лyr. - Циркуляр Львов. АО. Т.45. 1971. С.25-31.
3. Скульский М.Ю. Количественный анализ спектра β Лyr. I. Изменение некоторых эмиссионных линий водорода и гелия. - Изв. Крымской астрофиз. обс. 1972. Т.45. С.135-146.
4. Скульский М.Ю. О линиях вторичного компонента в спектре β Лyr. - Астрон. циркуляр. 1972. N74I. С.1-3.
5. Скульский М.Ю. Количественный анализ спектра β Лyr. II. Лучевые скорости по наблюдениям весной 1972 г. - Переменные звезды. 1973. Т.18. С.609-613.
6. Скульский М.Ю. О существовании газового диска вокруг вторичного компонента β Лyr. - Астрон. циркуляр. 1973. N765. С.6-8.
7. Скульский М.Ю. О поведении абсорбционных особенностей газовой оболочки β Лyr. - Астрон. циркуляр. 1973. N766. С.4-6.
8. Скульский М.Ю. К эффекту вращения газового диска в системе Бета Лиры. - Астрон. циркуляр. 1974. N827. С.3-5.
9. Скульский М.Ю. Количественный анализ спектра β Лиры. III. Исследование атмосферы яркого компонента. - Проблемы космической физики. Вісник Київ.унів. Сер.астрон. 1975. Т.10. С.160-174.
10. Скульский М.Ю. Количественный анализ спектра β Лиры. IV. Отождествление линий слабого компонента и массы звезд тесной двойной. - Астрон. Ж. 1975. Т.52. С.510-521.
11. Скульский М.Ю. Способ определения масс компонентов тесных двойных систем по признакам переноса и потери вещества. -

- Циркуляр Львов. АО. 1976. N51. С.13-19.
12. Скульский М.Ю., Смолярчук В.М. Уточнение элементов орбиты β Лyr. - Циркуляр Львов. АО. 1976. N51. С.20-23.
 13. Бурнашев В.И., Скульский М.Ю. Абсолютная спектрофотометрия β Лyr. Изв. Крымской Астрофиз. обс.-1978. Т.58. С.64-74.
 14. Гирняк М.Б., Скульский М.Ю., Шанин Г.И., Щербаков А.Г. Изучение эмиссионной линии H γ 10830 в спектре β Лyr. - Изв. Крымской астрофиз. обс. 1978. Т.58. С.75-80.
 15. Благодыр Я.Т., Скульский М.Ю. Изучение газовой оболочки β Лyr в 1976-1977 гг. - Циркуляр Львов. АО. 1979. N54. С.21-26.
 16. Бурнашев В.И., Скульский М.Ю. Квазипериодические изменения эмиссии H α в системе β Лyr. Письма в АЖ. 1980. Т.6. С.587-591.
 17. Скульский М.Ю. Кратковременные флуктуации эмиссии водорода и гелия в спектре β Лyr. - Письма в АЖ. 1980. Т.6. С.628-631.
 18. Касаркевич В.С., Скульский М.Ю. Быстрая переменность эмиссионных линий Бета Лyr. - Вопросы астрофизики. Вісник Львів. унів. Сер. астрон. 1981. N56. С.28-35.
 19. Касаркевич В.С., Скульский М.Ю. Изучение околосреднего вещества Бета Лyr в 1969 и 1978 гг. - Вопросы астрофизики. Вісник Львів. унів. Сер. астрон. 1981. N56. С.36-44.
 20. Скульский М.Ю. β Лyr - магнитная двойная звезда. - Письма в АЖ. 1982. Т.8. С.238-241.
 21. Скульский М.Ю. Изучение магнитного поля системы β Лyr. - Письма в АЖ. 1985. Т.11. С.51-54.
 22. Скульский М.Ю. Магнитное поле яркого компонента и структура газовых потоков в системе β Лyr. - Совещание подкомиссии N5 "Двойные звезды" многостр. сотр. АН соц. стран, Сообщ. Абастум. астрофиз. обс. 1985. N58. С.53-56.
 23. Алексеев Г.Н., Скульский М.Ю. Секундная переменность β Лyr в линии H α по наблюдениям на 6-м телескопе. - Совещание подкомиссии N5 "Двойные звезды" многостр. сотр. АН соц. стран, Сообщ. Абастум. астрофиз. обс. 1985. N58. С.57-60.
 24. Skulskij M.Yu. β Lyrae - a binary system with anomalous abundances and magnetic field. - In: "Upper main sequence stars with anomalous Abundances", Colloquium IAU N90. Eds. Cowley et al. Utrecht. Reidel publ.comp. 1986. P.365-368.

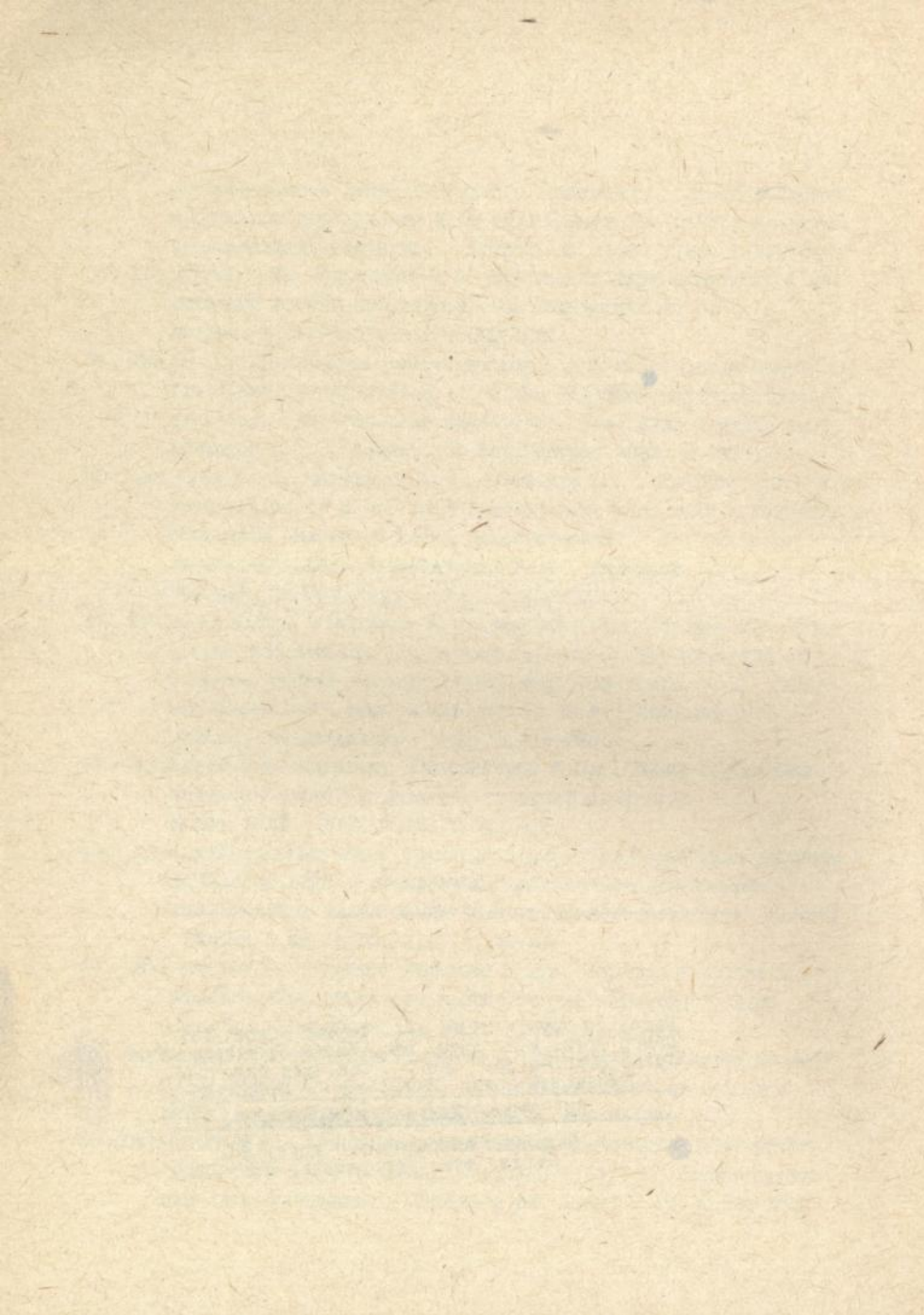
25. Бурнашев В.И., Скульский М.Ю. Переменность депрессии на $\lambda 5200$ в спектрах β Lyr и γ Sgr. - Письма в АЖ. 1986. Т.12. С.535-540
26. Skulskij M.Yu. Modern state of magnetic field investigation in β Lyrae.- In: "Magnetic stars". Proc. of intern. meeting of the problem "Physics and evolution stars". Eds. Glagolevsky Yu.V. and Kopylov I.M. Leningrad. Nauka. 1988. P.47-50.
27. Скульский М.Ю. К возможности резонансных явлений в системе β Лиры. - Переменные звезды. 1988. Т.28. С.311-312.
28. Алексеев Г.Н., Скульский М.Ю. О быстрой переменности спектра β Лиры в области H α . - Астрофиз. исследования (Известия САО). 1989. Т.28. С.21-43.
29. Косовичев А.Г., Скульский М.Ю. Осцилляции и приливные резонансные явления в системе β Лиры. - Письма в АЖ. 1990. Т.16. С.240-246.
30. Скульский М.Ю. Особенности околозвездных газовых структур RY Sct и β Lyr.- В сб. "Нестационарные процессы в тесных двойных системах". Ред. Пустыльник И.С. Собщ. Тартусской астрофиз. общ. им. В. Струве. 1990. N107. С.57-58.
31. Skulskij M.Yu. The magnetic field and tidal resonant phenomena in β Lyrae. - Mitteilungen KSO Tautenburg. 1990. N125. P.146-152.
32. Golovaty V.V., Skulskij M.Yu. Physics characteristics of the nebular envelope around the RY Sct system. - Contr. astron. obs. Scalnate Pleso. 1991. V.20. P.37-40.
33. Skulskij M.Yu. On the determination of masses of components using spectra of developed circumstellar structure and the case of RY Sct and Beta Lyrae. - Contr. astron. obs. Scalnate Pleso. 1991. V.20. P.41-44.
34. Бурнашев В.И., Скульский М.Ю. H α -фотометрия и магнитное поле β Лиры.- Изв. Крымской астрофиз.общ. 1991. Т.83. С.108-117.
35. Скульский М.Ю., Топильская Г.П. Линии вторичного компонента в спектре β Lyr. - Письма в АЖ. 1991. Т.17. С.619-625.
36. Скульский М.Ю., Мальков Ю.Ф. Исследование β Лиры по ИСЗ-спектрограммам высокой дисперсии в области H α . - Астрон.Ж. 1992. Т.69. С.291-307.
37. Скульский М.Ю. Исследование абсорбционного спектра RY Sct:

- отождествление линий вторичного компонента, элементы орбиты и принципы определения масс компонентов по спектру развитых околосветных структур. - Астрон. Ж. 1992. Т.69. С.803-820.
38. Головатый В.В., Скульский М.Ю. Физические характеристики и химический состав небулярной оболочки вокруг RY Set. - Астрон. Ж. 1992. Т.69. С.1068-1082.
39. Skulskij M.Yu. Towards understanding the β lyrae nature: magnetic field and investigation of H α and HeII λ 7065 emission line dynamics. - In: "Stellar magnetism". Eds. Glagolevskij Yu.V., Romanyuk I.I., "Nauka", St-Peterburgs. 1992. P.127-132.
40. Skulskij M.Yu., Najdenov I.D., Romanjuk I.I., Bychkov V.D. First observation of β Lyr in FeII λ 4233 line made with a magnetometer with the Fabry-Perot interferometer. - In: "Stellar magnetism". Eds. Glagolevskij Yu.V., Romanyuk I.I., "Nauka", St-Peterburg. 1992. P.204-206.
41. Skulskij M.Yu., Plachinda S.I., Mal'kov Yu.F. On the CCD-study of the red doublet of ionised silicon in the spectrum of β Lyrae: radial velocities and magnetic field. - In: "Stellar magnetism". Eds. Glagolevskij Yu.V., Romanyuk I.I., "Nauka", St-Peterburg. 1992. P.216-222.
42. Скульский М.Ю. Изучение ПЭС-спектров β Лyr. Линии поглощения, параметры орбиты и дисковая структура gainer'a. - Письма в АЖ. 1992. Т.18. С.711-726.
43. Скульский М.Ю. Изучение спектров β Лyr. Характеристики дублета SiII λ 6347,6371 и обнаружение циклической переменности эквивалентных ширин линий "замагниченной" атмосферы loser'a. - Письма в АЖ. 1993. Т.19. С.49-64.
44. Скульский М.Ю. Изучение спектров β Лyr. Перенос вещества и околосветные структуры в присутствии магнитного поля loser'a. - Письма в АЖ. 1993. Т.19. С.116-133.
45. Скульский М.Ю. Изучение спектров β Лyr. Характеристики дублета SiII λ 6347,6371 в 1992 г. и их переменность от сезона к сезону. - Письма в АЖ. 1993. Т.19. С.417-435.
46. Скульский М.Ю., Плачинда С.И. Изучение магнитного поля яркого компонента β Лyr в линиях SiII λ 6347,6371 по зеемановским ПЭС-спектрограммам. - Письма в АЖ. 1993. Т.19. С.525-538.

Підп. до друку 14.04.93 . Формат 60х84¹/16.
Папір друк. № 2, Друк. офс. Умовн. друк. арк. 6.5
Умовн. фарб.-відб. 6.5 Обл.-вид. арк. 6.37
Тираж 100 прим. Зам. 68 . Безплатно

ЛПІ 290646 Львів-13, Ст. Бандери, 12

Дільниця оперативного друку ЛПІ
Львів, вул. Городоцька, 286



465835

Ab 27.288
Ab 27.288