

40 РОКІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ І ВТОРИННІ РИТМИ В СИСТЕМІ БЕТА ЛІРИ

М. Ю. Скульський

*Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна
(Отримано 27 грудня 2006 р.)*

На основі спектральних спостережень коротко представлено низку наших найважливіших результатів, що формують фізичну модель Бета Ліри. Уперше визначені маси компонентів стали важливим чинником еволюційного статусу подвійної. Яскравий донор ($\approx 3 M_{\odot}$) на завершальній стадії активної втрати маси привів до формування розвинутих навколосоряних структур й акреційного диска, який камуфлює масивний акретор ($\approx 13.5 M_{\odot}$). Зокрема виявлено прецесійний рух акреційного диска. Магнетне поле, яке ми відкрили, демонструє складну поведінку на поверхні донора та свідчить про наявність спільної для двох компонентів магнетосфери. Проаналізовано вторинні неорбітальні періоди тривалістю від $1.85d$ до $340d$, які теж виявлені останніми десятиліттями. Так, 1.85 -денний період може виникати як нерадіальне коливання на донорі, резонансно підсилене припливною хвилею; 282.425 -денний період визначається як період прецесійного обертання диска акретора, збуреного донором, та як період припливної хвилі на поверхні донора, спричиненої акретором, що вказує на існування синхронізації між ними. Визначено чотири підструктури акреційного диска. Система вторинних ритмів і резонансів трактується як нове явище, визначальним у якому є процес переносу маси в цій взаємодіючій подвійній системі.

Ключові слова: подвійна система, акреція, прецесія, магнетне поле.

PACS number(s): 97.80.Fk, 97.80.–d

Систематичні спектральні спостереження добре відомої подвійної системи Бета Ліри ми започаткували 1966 року. Було поставлено завдання докладніше вивчити фізичну будову й еволюційний статус цієї знаменитої яскравої системи. На ту пору Бета Ліри після Сонця була найбільш цитованим в астрофізичній літературі об'єктом, однак розуміння її природи робило серйозні виклики. Новий погляд на еволюційний сценарій тісних подвійних систем [1] вимагав доказів того, що ця тісна подвійна система повинна бути в активній фазі переносу речовини від яскравого, але менш масивного компонента-донора до ще не ототожненого в спектрі, але масивнішого компонента-акретора значно меншої від донора світності. Перебуваючи у фронті яскравого донора, акретор створює на кривій блиску затемненої системи глибший і ширший мінімум. Тому було запропоновано [2], що стосовно невеликих розмірів акретор замаскований густим і масивним диском. Розташований в екваторіальній ділянці акретора, цей гігантський диск лежить у площині орбіти подвійної системи, у якій практично перебуває промінь зору спостерігача. Однак не виключалося, що невидимий акретор всередині цього диска може існувати як чорна діра [3]. Розв'язання цієї дилеми лежало в пошуку динамічних ознак акретора в спектрі подвійної системи, а відтак прямого визначення мас обох компонентів та абсолютних розмірів системи. Цю та інші задачі розв'язували на основі отримання та обробки сотень спектрограм високого розділення на потужних телескопах: 1.2-м та

2.6-м Кримської, 2-м Шемахинської та 6-м Спеціальної астрофізичних обсерваторій. 1972 р. за десятками спектрограм при розділенні в 0.1 \AA/mm ми вперше ототожили слабкі спектральні лінії, променеві швидкості яких відтворювали орбітальний рух акретора [4]. На підставі ПЗЗ-спостережень 1990–92 рр. маси цих компонентів були визначені досить точно та надійно: $3 M_{\odot}$ і $13.5 M_{\odot}$ відповідно для донора і акретора [5,6]. Реальність цього важливого результату підтверджена розрахунком синтетичного спектра подвійної системи [7] та її абсолютною спектрофотометрією з подальшим моделюванням на цій основі континууму системи [8,9]. При цьому теж було виявлено, який внесок у континуум подвійної системи робить випромінювання розвинутих навколосоряних структур (газові потоки, акреційний диск, загальна оболонка), утворених через бурхливу втрату маси донором (до речі, вона становить $2 M_{\odot}$ за сто тисяч років при фіксованім на цей час зростанні орбітального періоду 18.9 c/рік [10]). Детально вивчали динаміку цих навколосоряних структур. Наприклад, за ПЗЗ-спостереженнями виявлено, що акреційний диск розділений на два складники: внутрішній масивніший балдж, що відображає орбітальний рух акретора, та зовнішній диск, динамічно відокремлений від балджа. Дослідження динаміки так званих ліній-супутників, які формуються в зовнішньому диску, відобразило ротаційний ефект диска. Виявлено, що акреційний диск міняє свої параметри від сезону до сезону, чітко вказуючи на прецесійний рух [6,11,12]. Ці та інші результати

тати класичних спектральних досліджень стали важливими підвалинами в сучасному розумінні будови й еволюційного статусу цієї подвійної системи.

Другим за важливістю й новим результатом у вивченні природи системи Бета Ліри є відкриття магнетного поля на поверхні донора [13,14,15]. За даними спектральних спостережень 1980–1988 рр. на 6-м телескопі Спеціальної астрофізичної обсерваторії, з подальшими вимірюваннями зеєманівських розщеплень атмосферних ліній яскравого компонента взаємодіючої подвійної системи Бета Ліри, розв'язок кривої змінності ефективного магнетного поля з орбітальною фазою дав негативне середнє значення поля $H_e = (-1198 \pm 32)$ Гс з амплітудою $A = (475 \pm 51)$ Гс та екстремумами поля в орбітальних фазах $0.355P$ та $0.855P$. Уперше як магнетний ротатор виступає компонент активно взаємодіючої подвійної системи, причому це перший гігант В-типу, чиє магнетне поле виміряне з певністю. Наступні ПЗЗ-спостереження 1991–92 рр. на 2.6-м телескопі з досконалішою апаратурою Кримської астрофізичної обсерваторії показали значно менше магнетне поле при складнішому характері його змінності [16]. Середнє, майже нульове значення магнетного поля мінялося в межах ± 200 Гс. Частково це можна пояснити новим набором ліній для виміру поля, формування яких в атмосфері донора належить більш висотному шару. Повернувшись, в основному, до попереднього набору ліній при спостереженнях у 1993–95 рр., ці ж автори виявили, що магнетне поле стало позитивним і досягло середнього значення приблизно в 0.4 кГс при амплітуді в 0.5 кГс, тобто десь за десятиріччя середнє значення магнетного поля поміняло знак від -1.2 кГс до 0.4 кГс. Спектрополяриметричні спостереження 1999 р. в Катанській астрофізичній обсерваторії (Італія) дали середнє значення ефективного магнетного поля $+1.3$ кГс при амплітуді в 0.5 кГс, тобто десь за 15 років масштаб зміни поля становив 2.5 кГс [17]. Однак дослідження магнетного поля Бета Ліри, виконані у 2000–2004 рр. на 2.6-м телескопі, що були методично й апаратурно адекватні спостереженням 1993–1995 рр., показали в ці два часові інтервали практично однакове середнє значення поля при тій же амплітуді змінності [18]. Якщо поле реально зменшилося від 1999 р., то це може свідчити про тривалу складову циклічної змінності магнетного поля. Фіксуються теж менш тривалі зміни глобального поверхневого магнетного поля донора впродовж одного-двох років, а також швидкі зміни магнетного поля в суміжні дні протягом усіх років спостережень. Їх амплітуда сягає 0.5 кГс і більше, інколи чітко вказуючи на вторинний 1.85-денний період (він становить $1/7$ орбітального періоду), виявлений у [19] за змінністю енергії випромінювання в емісійній лінії H_α . Цікавим є те, що дві третини оцінок поля вкладаються на синусоїдальну криву з екстремумами поля у фазах $0.1P$ і $0.6P$, тобто зміщені по фазі на $0.25P$ чи зорієнтовані в просторі під прямим кутом. Така незвична структура поля може свідчити про квадрупольний складник поля і наявність у даних періоду зміни поля, відмінного від орбітального пері-

оду. І справді, графічна залежність, за даними спостережень 1980-х років [15] варіацій магнетного поля з фазою 1.85-денного періоду, рівного $1/7$ орбітального, підтверджує таке припущення.

Аналіз наших даних та даних інших авторів показав, що магнетне поле донора відображається в будові навколосоряних структур, у яких формуються сильні та складні абсорбційно-емісійні лінії, передусім, водню та гелію видимого діяпазону спектра. Виявлені явні кореляції між змінами динамічних та енергетичних параметрів таких ліній зі змінами магнетного поля протягом фаз орбітального періоду [9,11,20]. Ці кореляції чіткіші біля того полюса магнетного поля на донорі, який звернений до акретора. Такі ж кореляції показують променеві швидкості та еквівалентні ширини ліній високого збудження в далекім ультрафіолеті, наприклад, CIII1175, NV1238, SiVI1402 [21], а також лінії, що формуються в газовій оболонці навкруг подвійної системи. Зокрема це стосується лінії HeI3889, яка має нижній метастабільний рівень і формується в сильно розрідженій зовнішній оболонці [22]. Поведінка таких ліній свідчить про спільну магнетосферу, яка охоплює обидва компоненти. Просторовий напрям осі магнетосфери відповідає напрямку осі диполя на донорі. Просторовим напрямом намагнетченої високотемпературної плазми можна згрубша пояснити односторонню криву блиску системи Бета Ліри за лайманівською межею [23], зовсім відмінну від її двогорбої кривої блиску у видимому діяпазоні.

Можливість вторинних варіацій магнетного поля з 1.85-денним періодом [9,19], у сім раз меншим за орбітальний, спонукав нас до його дослідження. Воно показало [24], що таку тривалість можуть мати нерадіальні коливання донора, які можуть резонансно підсилюватися при взаємодії із припливною хвилею на його поверхні. Це привело нас до розгляду проблеми вторинної неорбітальної періодичності в системі Бета Ліри, тим більше, що впродовж останнього століття не раз публікувалися дані щодо довгоперіодичних циклічних змін як у елементах орбіти подвійної системи, так і у кривій блиску чи в інтенсивності емісійних ліній [25,26,27]. Сучасніші дослідження 1990-х років [22,28] виявили у кривій блиску вторинний період $T = (283 \pm 1)d$, причому в [22] за 1959–1994 рр. цей період визначено вже з високою точністю $T = (282.425 \pm 0.070)d$ при амплітуді зміни блиску в $A = (0.^m0236 \pm 0.^m0008)$. Перші наші дослідження відомих вторинних періодів [29,30] показали, що вони ув'язані в систему періодів, яка повільно міняється з еволюційним зростанням орбітального періоду. Визначене значення періоду осьового обертання донора $P_{\text{rot}} = 13.2387d$ разом із орбітальним періодом $P = 12.9355d$ (на 1980 р. як усередненого терміну ефективною кривою блиску, яка досліджувалася в [22] з метою виявлення вторинних періодів) дозволило, згідно з простим рівнянням динаміки припливних хвиль у подвійних системах [24,31], отримати період їх биття

$$1/P_{\text{bt,don}} = 1/P - 1/P_{\text{rot,don}} \quad (1)$$

Цей період виявився рівним $564.85d$, а його перша гармоніка, яка є періодом біжучої припливної хвилі на донорі, утвореної збуренням від масивного акретора, дорівнює $T = 0.5P_{\text{bt,don}} = 282.425d$. Бачимо, що період припливної хвилі дорівнює виявленому в [22] значенню вторинного періоду $T = 282.425d$.

З іншого боку, вторинний період $T = 282.425d$ виявляється рівним періодові прецесії зовнішнього акреційного диска акретора, якщо виходити з відомого рівняння для катаклізмичних подвійних систем [32], справедливого для співвідношень мас $q \leq 0.3$:

$$P_{\text{pr}} = 1.333P(R_d/A)^{-3/2}(q+1)^{1/2}q^{-1} \quad (2)$$

Параметри співвідношення (2), у які теж входять орбітальний період P , віддаль між центрами зір-компонентів A та зовнішній критичний радіус R_d акреційного диска, дозволяють застосувати його до системи Бета Ліри, для якої $q = 0.222$. Радіус диска R_d визначено за характером зміни колор-індексів із монохроматичних кривих блиску [8] та за променевими швидкостями й еквівалентними ширинами ліній-сателітів, які формуються в диску при просвічуванні його донором [12]. Ефективні радіуси зовнішнього та внутрішнього країв диска дорівнюють відповідно $R_{d,\text{ex}} = 0.45A$ та $R_{d,\text{in}} = 0.29A$. Їхні значення приводять, згідно формули (2), до періодів акреції диска $T = 282.425d$ та $2T = 564.85d$ — відповідно на зовнішньому й внутрішньому його краях (співвідношення між ними $1 : 2$ — октава). Зворотне співвідношення ми виявили між періодами обертання речовини на тих же краях диска — відповідно $0.25P$ та $0.5P$. Основний висновок із обчислень за формулами (1) та (2) такий: у системі Бета Ліри можуть існувати синхронізаційні взаємодії між біжучою припливною хвилею на поверхні донора, збуреної обертанням акретора, та прецесійним обертанням акреційного диска, спричиненим донором.

Дослідження довготривалих вторинних періодів показує, що акреційний диск може бути структурованим у радіальному напрямі до акретора. Справді, у деякі епохи спостережень Бета Ліри частотний аналіз її кривих блиску чітко виявляє одночасно два періоди: 283- та 339-денний [33]. Оскільки в катаклізмичних подвійних спостерігається резонанс $3 : 1$ між періодом обертання речовини в диску й орбітальним періодом [32], то при існуванні такої підструктури в акреційному диску Бета Ліри періоди обертання в трьох підструктурах диска (включаючи край) співвідносятимуться, як $0.25P : 0.333P : 0.5P = 3 : 4 : 6$. Заповнивши цей ряд цілими числами, маємо чоти-

ри складники диска з різними періодами обертання речовини всередині нього: $3 : 4 : 5 : 6 = 0.25P : 0.333P : 0.416P : 0.5P$. Періоди ж прецесії відповідних підструктур диска тоді дорівнюють $564.85d$, $423.68d$, $339.05d$, $282.425d$ (і співвідносяться, як $2 : 1.666 : 1.333 : 1$ всередині октави). Як видно з періодограм у [33], де помітний також пік 423-денного періоду, який відповідає глибшій підструктурі диска, таке трактування цілком природне. В аналізованій кривій блиску відслідковуються три підструктури диска, а четверту найбільш внутрішню його підструктуру спостерігаємо тільки в кривих променевих швидкостей ліній-сателітів. Це узгоджується з розумінням того, що при акреції речовини в диску його складники прецесують із уповільненням, хоча сама речовина в диску обертається з прискоренням у напрямку до центру акретора. При цьому періоди всіх прецесуючих кільцевих підструктур акреційного диска кратні припливній хвилі на поверхні донора, інакше кажучи, засинхронізовані чи перебувають у резонансній взаємодії.

Отже, тривалі вторинні періоди показують явний зв'язок з орбітальним періодом подвійної системи та осьовим періодом донора. Однак вони пов'язані також із меншими за орбітальний 1.85- та 4.74-денними періодами, що показали перші дослідження цих періодів [29,30]. Короткотривалі періоди, виявлені з дослідження навколосоряних газових структур в емісійних лініях [19,22], мають певний зв'язок із магнетним полем [9,24]. Усі періоди свідчать про можливу засинхронізованість багатьох процесів у подвійній системі, зокрема таких, як припливна хвиля на поверхні донора і прецесійне обертання структурованого диска акретора, нерадіальні пульсації на поверхні донора, а також виявляють інші резонанси. Ми показали [29,30], що вторинні періоди творять певну систему, яка змінюється в кількісних вимірах разом із поступовим еволюційним зростанням орбітального періоду. Фізика цього явища можна розглядати в контексті того, що активний донор, який водночас є магнетним ротатором, спроможний продукувати оригінальні причинні зв'язки, які проявляються у виявлених вторинних періодах. Установлене явище самоузгодженої системи періодичностей та резонансів має своїм підґрунтям концепцію параметричного резонансу. В ній змінним параметром є маса донора, що зменшується з переносом її від донора до акретора. Цей феномен є не тільки новим у мозаїці фізичної природи Бета Ліри, а й для масивних активно взаємодіючих систем цього типу, що вимагає його подальшого дослідження.

[1] Z. A. Crawford, *Astrophys. J.* **121**, 71 (1955).
 [2] Su-Shu Huang, *Astrophys. J.* **138**, 342 (1963).
 [3] R. E. Wilson, *Nature* **234**, 406 (1971).
 [4] М. Ю. Скульський, *Астрон. журн.* **52**, 510 (1975).
 [5] М. Ю. Скульський, *Письма Астрон. журн.* **18**, 711 (1992).

[6] М. Ю. Скульський, *Письма Астрон. журн.* **19**, 417 (1993).
 [7] М. Ю. Скульський, Г. П. Топильская, *Письма Астрон. журн.* **17**, 619 (1991).
 [8] В. И. Бурнашев, М. Ю. Скульський, *Известия Крым. астрофиз. обсерв.* **58**, 64 (1978).

- [9] В. И. Бурнашев, М. Ю. Скульский, Известия Крым. астрофиз. обсерв. **83**, 108 (1991).
- [10] P. Harmanec, G. Scholz, *Astron. Astrophys.* **279**, 131, (1993).
- [11] М. Ю. Скульский, Письма Астрон. журн. **19**, 45 (1993).
- [12] М. Ю. Скульский, Письма Астрон. журн. **19**, 116 (1993).
- [13] М. Ю. Скульский, Письма Астрон. журн. **8**, 238 (1982).
- [14] М. Ю. Скульский, Письма Астрон. журн. **11**, 51 (1985).
- [15] M. Yu. Skulsky, *Mitteilungen KSO Tautenberg* **125**, 146 (1990).
- [16] M. Yu. Skulsky, S. I. Plachinda, *Astron. Lett.* **19**, 203 (1993).
- [17] F. Leone, *et al.*, *Astron. Astrophys.* **405**, 233, (2003).
- [18] M. Yu. Skulsky, S. I. Plachinda, in: *The A-Star Puzzle*, J. Zverko, J. Ziznovsky, S. J. Adelman and W. W. Weiss eds. (Cambridge Univ. Press, 2005), p. 647.
- [19] В. И. Бурнашев, М. Ю. Скульский, Письма Астрон. журн. **6**, 587 (1980).
- [20] М. Ю. Скульский, Ю. Ф. Мальков, *Астрон. журн.* **62**, 291 (1992).
- [21] M. Hack *et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **34**, 565 (1977).
- [22] P. Harmanec *et al.*, *Astron. Astrophys.* **312**, 879 (1996).
- [23] R. S. Polidan, *Space Sci.* **50**, 89 (1989).
- [24] М. Ю. Скульский, Ф. П. Косовичев, Письма Астрон. журн. **16**, 240 (1990).
- [25] H. R. Curtiss, *Publ. Allegeny Obs.* **2**, 73 (1912).
- [26] M. A. Blagg, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **88**, 162 (1928).
- [27] A. Maury, *Harvard Col. Astron. Obs. Bull.* **25**, 899 (1935).
- [28] W. Van Hamme, R. E. Wilson, E. F. Guinan, *Astron. J.* **110**, 695 (1995).
- [29] M. Yu. Skulsky, *Kinematics Phys. Celest. Bodies Suppl. Ser.* **3**, 425 (2000).
- [30] M. Yu. Skulsky, *Odessa Astron. Publ.* **14**, 227 (2001).
- [31] S. Kato, *Publ. Astron. Soc. Japan.* **26**, 341 (1974).
- [32] Y. Osaki, *Astron. Astrophys.* **144**, 369 (1985).
- [33] M. Peel, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **284**, 148 (1997).

40 YEARS OBSERVATIONS AND SECONDARY RHYTHMS IN BETA LYRAE SYSTEM

M. Yu. Skulsky
National University "Lviv Polytechnics"
12 Bandera St., Lviv, UA-79013, Ukraine
E-mail: mysky@polynet.lviv.ua

The crucial results of the spectral observations of the Beta Lyrae binary system are presented briefly. We determined directly the masses of both components as an important characteristic to the evolution status of this binary. The bright donor ($\approx 3 M_{\odot}$) is losing its matter very actively in the rapid mass loss stage. The developed circumstellar gaseous structures and an accretion disk that camouflage the massive accretor ($\approx 13.5 M_{\odot}$) are investigated. The disk's external part showed the precession motion. We discovered the donor's magnetic field that demonstrates the complicated time-dependent behavior and change on the long-time-scale variability. Also we analyzed the nonorbital secondary periods with the duration from 1.85d to 340d discovered in the last decades. In particular, the 1.85-day period could arise as the donor's nonradial oscillation that is in the resonant amplification of the tidal wave at the donor's surface. The 282.425-day period shows synchronization between the precession rotation of the accretion disk, disturbed by the donor, and the running tidal wave on the donor's surface caused by the accretor. The four substructures of the accretion disk are determined. The mass transfer processes in this interacting binary system are a determinative parameter in the phenomena of secondary rhythms and resonances.