
СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ “СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ”
ФИЗИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА “АСТРОНОМИЯ”

***Червените нови като продукт на
звездни сливания***

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертация за присъждане на образователна и
научна степен “доктор”

от

Александър Атанасов Куртенков

Професионално направление: 4.1 Физически науки
Специалност: Астрономия и астрофизика

Научен ръководител: доц. д-р Е. П. Овчаров

София 2016 г.

Съдържание

Въведение	2
Публикации по темата на дисертацията	3
Забелязани цитирания на публикациите	4
1 Контактни двойни звезди и еволюция в обща обвивка	5
2 Червени нови и звездни сливания	9
3 Търсене и изследване на нови в M 31	17
4 Червената нова M31LRN 2015	20
4.1 Хронология на наблюденията	20
4.2 Оптичен мониторинг	22
4.3 Оценка на светимостта в максимум	28
4.4 M31LRN 2015 в инфрачервения диапазон	29
4.5 Прогенитор	30
5 Кандидати за звездно сливане	31
5.1 Търсене на двойници на V1309 Sco	32
5.2 Контактни двойни със скъсяващ се период: системи от Kepler и OGLE	34
5.3 KIC 9832227	37
6 Научни приноси на дисертанта	42
Литература	44

Въведение

Предмет на настоящия труд са сливанията на компонентите в система от две звезди (без компактен обект), които водят до избухване на т.нар. “червена нова”. Счита се, че тези оптични явления са изключително редки и към 2016 г. все още няма абсолютен консенсус в научната общност по въпроса за тяхното пораждање, за тяхното наименование, както и за това, кои наблюдавани избухвания спадат към този клас. В същото време, сливането на компонентите на контактна двойна звезда е важен, макар и много кратък, етап от еволюцията на системата.

Червените нови представляват голям интерес и от чисто наблюдателна гледна точка. Това са мощни ($10^4 - 10^7 L_{\odot}$) избухвания – могат да бъдат по-мощни от класическите нови, но са по-слаби от свръхновите. Въпреки че са ярки, в първите седмици спадът им е бавен. Скоростта на разширяващата се обвивка е изключително ниска ($\sim 10^2$ km/s) и тя не достигнала оптически тънка фаза при никой от наблюдаваните досега обекти от този клас. Фотосферната температура се понижава непрестанно, докато обектът не потъне в прах. Тези наблюдателни характеристики на червените нови ги отличават от класическите нови и от всички други известни оптични явления. Тъй като досега са наблюдавани малко на брой такива избухвания, това са наблюдателни цели с изключително висок приоритет.

Основен тласък на настоящата работа даде избухването на червената нова M31LRN 2015 в галактиката Андромеда. Изследването на този обект е представено подробно. Това явление отвори пред автора множество въпроси като:

- Как се получават тези избухвания?
- Каква е честотата на тези избухвания?
- Колко такива избухвания всъщност са наблюдавани досега?
- Можем ли да предскажем такова избухване?
- Какви са прогениторите и крайните продукти на тези избухвания?

Научната общност е стигнала до отговори на някои от тези въпроси. Други от тях са дискутирани в скорошни научни статии от автора. Ще се опитаме да засегнем или да отговорим на всеки един от тях. Основните резултати от работата са оптичният мониторинг и получените параметри на M31LRN 2015 (Глава 4 в дисертацията) и изследването на контактни двойни, потенциални кандидати за звездно сливане (Глава 5 в дисертацията).

Публикации по темата на дисертацията

Реферирани публикации

- [A1] Kurtenkov, A. A., Peshev, P., Tomov, T. et al., *The January 2015 outburst of a red nova in M 31*, 2015, *Astronomy & Astrophysics*, 578, L10
- [A2] Kurtenkov, A. & Popov, V. A., *The stellar merger progenitor candidate KIC 9832227: observations in late 2015*, 2016, *Astronomische Nachrichten*, submitted
- [A3] Kurtenkov, A., *Searching for twins of the V1309 Sco progenitor system: a selection of long-period contact binaries*, 2016, *Bulgarian Astronomical Journal*, accepted for publication
- [A4] Ovcharov, E. P., Kurtenkov, A., Metodieva, Y. et al. *Plana Student Astronomical Observatory: First results and perspectives*, 2014, *Bulgarian Astronomical Journal*, 21, 19

Астрономически телеграми

- [T1] Kurtenkov, A., Tomov, T., Fabrika, S. et al., *M31N 2015-01a - A Luminous Red Nova*, 2015, ATel #7150
- [T2] Kurtenkov, A., Ovcharov, E., Nedialkov, P. et al., *Spectroscopic confirmation and additional photometry of the very bright nova M31N 2015-01a*, 2015, ATel #6941
- [T3] Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Valcheva, A., Nedialkov, P., *Pre-maximum spectroscopy and photometry of a probable nova in M31*, 2015, ATel #6924
- [T4] Peshev, P., Geier, S., Kurtenkov, A., Nielsen, L. D., Tomov, T., *Probable M31 Stellar Merger - NOT ALFOSC Photometry*, 2015, ATel #7272
- [T5] Peshev, P., Geier, S., Kurtenkov, A., Nielsen, L. D., Slumstrup, D., Tomov, T., *Probable M31 Stellar Merger - NOT ALFOSC I-band Photometry*, 2015, ATel #7572
- [T6] Peshev, P., Geier, S., Stritzinger, M., Kurtenkov, A., Tomov, T., *Sudden NIR brightening of the Andromeda galaxy Red Nova M31LRN 2015*, 2015, ATel #7624
- [T7] Peshev, P., Geier, S., Stritzinger, M., Kurtenkov, A., Tomov, T., *NIR monitoring of M31LRN2015*, 2015, ATel #8059
- [T8] Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Valcheva, A., Nedialkov, P., *Nova M31 2014-11a has not reached its maximum yet*, 2015, ATel #6689
- [T9] Ovcharov, E., Kostov, A., Kurtenkov, A., Valcheva, A., Nedialkov, P., *Optical Nova Candidate in M31*, 2015, ATel #7065
- [T10] Ovcharov, E., Minev, M., Kurtenkov, A., Nedialkov, P., Valcheva, A., *Nova M31 2015-05b has increased its brightness*, 2015, ATel #7564
- [T11] Ovcharov, E., Minev, M., Kurtenkov, A., Nedialkov, P., Valcheva, A., *Pre-maximum photometry of the probable nova M31N 2015-06a*, 2015, ATel #7586
- [T12] Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Bozhilov, V., Valcheva, A., Nedialkov, P., Kostov, A., *Optical (R and H-alpha) nova candidate in M31 and H-alpha confirmation of the probable nova 2015-09a*, 2015, ATel #8071
- [T13] Valcheva, A., Kurtenkov, A., Ovcharov, E., Kostov, A., Minev, M., Nedialkov, P., *BR-confirmation of the probable nova M31 2016-07c*, 2016, ATel #9264

Забелязани цитирания на публикациите

Независими реферирани цитирания (към ноември 2016 г.)

- [1] Kamiński, T., Mason, E., Tylanda, R., Schmidt, M. R., 2015, A&A, 580, A34
- [2] Goranskij, V. P., Barsukova, E. A., Spiridonova, O. I., 2016, AstBu, 71, 82
- [3] Pejcha, O., Metzger, B. D., Tomida, K., 2016, MNRAS, 455, 4351
- [4] Smith, N., Andrews, J. E., Van Dyk, S. D., 2016, MNRAS, 458, 950
- [5] Tylanda, R., Kamiński, T., 2016, A&A, 592, A134
- [6] Pejcha, O., Metzger, B. D., Tomida, K., 2016, MNRAS, 461, 2527
- [7] Soker, N., Kashi, A., 2016, MNRAS, 462, 217
- [8] Williams, S. C., Darnley, M. J., Bode, M. F., Steele, I. A., 2015, ApJL, 805, 18

Други независими цитирания

- [9] MacLeod, M., Macias, P., Ramirez-Ruiz, E., Grindlay, J., Batta, A., Montes, G., 2016, arXiv, 1605.01493, submitted to ApJ
- [10] Kashi, A., Soker, N., 2016, arXiv, 1609.00931
- [11] Dong, S., Kochanek, C. S., Adams, S., Prieto, J.-L., 2015, ATel #7173
- [12] Wagner, R. M., Starrfield S. G., Wilber A. et al., 2015, ATel #7208
- [13] Srivastava, M., Ashok, N. M., Banerjee, D. P. K., Venkataraman, V., 2015, ATel #7236
- [14] Steele, I. A., Williams, S. C., Darnley, M. J. et al., 2015, ATel #7555
- [15] Hodgkin, S. T., Campbell, H., Fraser, M. et al., 2015, ATel #6952
- [16] Fabrika, S., Barsukova, E. A., Valeev, A. F. et al., 2015, ATel #6985
- [17] Bersier, D., Kochanek, C. S., Wagner, R. M., Adams, S., Dong, S., 2015, ATel #7537
- [18] Harmanen, J., McCollum, B., Laine, S., Rottler, L., Bruhweiler, F. C., 2015, ATel #7595
- [19] Williams, S. C.; Darnley, M. J.; Steele, I. A. et al., 2014, ATel #6704
- [19] Sarneczky, K., Vida, K., 2015, ATel #7076
- [20] Fabrika, S., Barsukova, E. A., Valeev, A. F., 2015, ATel #7158
- [21] Williams, S. C., Darnley, M. J., Bode, M. F., Shafter, A. W., 2015, ATel #7580
- [22] Hornoch, K., Kucakova, H., Zasche, P., 2015, ATel #7597
- [23] Neric, M., Wilber, A., Wagner, R. M., Starrfield, S., Woodward, C. E., 2015, ATel #7606
- [24] Chinetti, K., Darnley, M. J., Williams, S. C., 2016, ATel #9296

1 Контактни двойни звезди и еволюция в обща обвивка

Тази глава е посветена на контактните двойни звезди и на системите в етап на еволюция в обща обвивка – потенциални прогенитори на червените нови.

Движението на компонентите в двойна система може с добро приближение да се опише като решение на задачата за двете тела, т.е. приемайки, че компонентите с маси съответно M_1 и M_2 са материални точки. Двете звезди обикалят около общ център на масите по елипси с големи полуоси a_1 и a_2 и еднакъв эксцентрицитет e . Орбиталната механична енергия на системата е

$$E_{orb} = -\frac{GM_1M_2}{2a} = -\frac{G(M_1 + M_2)^2}{2a} \frac{q}{(1+q)^2}, \quad (1)$$

където $a = a_1 + a_2$ е голямата полуос на относителната орбита на едната компонента спрямо другата, а $q = \frac{M_2}{M_1}$ е отношението на масите. Орбиталният период P е обвързан с тези параметри чрез III Закон на Кеплер:

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M_1 + M_2)}{4\pi^2}. \quad (2)$$

Моментът на импулса на орбиталното въртене (орбиталният ъглов момент) е

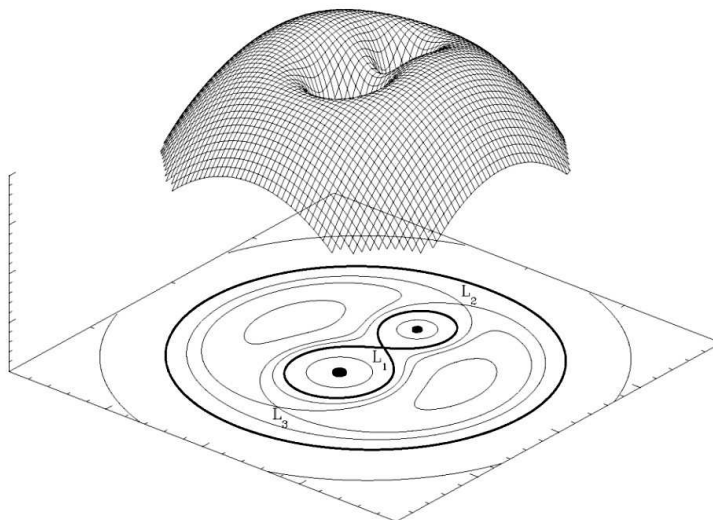
$$J_{orb} = \sqrt{G \frac{M_1^2 M_2^2}{M_1 + M_2} a (1 - e^2)}. \quad (3)$$

За всяка компонента в двойна система се дефинира т.нар. “зона на Рош” (Roche lobe) (фиг. 1), в която орбитиращата коротационно материя остава гравитационно свързана със съответната компонента. Зоната на Рош е капковидна (издължена към точката на Лагранж L_1) и радиусът ѝ се апроксимира със сфера чрез:

$$\frac{r_L}{a} = \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})} \quad (\text{Eggleton 1983}). \quad (4)$$

Според пространственото разположение на компонентите една спрямо друга двойните системи се делят на 3 типа (Kopal 1955):

- Разделени системи (detached systems) – Нито една от звездите не е изпъл-



Фигура 1: Еквипотенциални повърхнини в двойна звезда, в коротационна отпавна система. Тримерно е представен гравитационният потенциал (с отчетена центробежна сила), в чиито екстремуми и седла се намират петте точки на Лагранж. Зоните на Рош са оградени от еквипотенциалната повърхнина, минаваща през L_1 . Източник: <http://physics.stackexchange.com/questions/31201/might-a-planet-perform-figure-8-orbits-around-two-stars>

нила своята повърхност на Рош. Те не си обменят материя чрез акреция и в общия случай еволюират отделно.

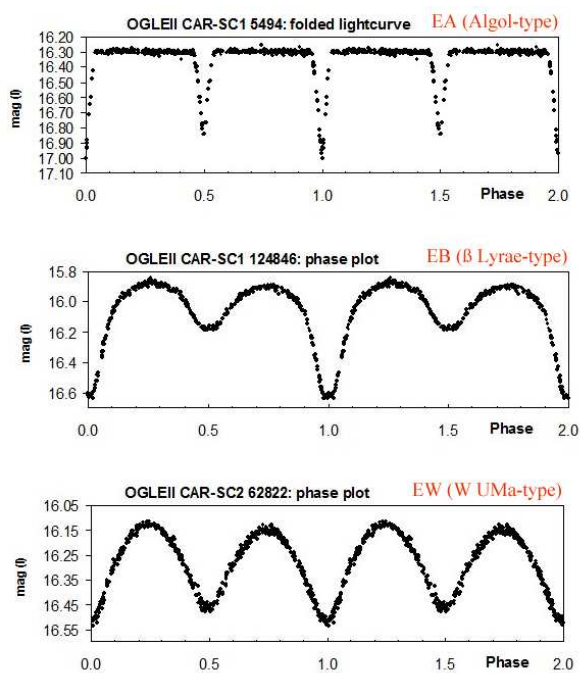
- Полуконтактни системи (semidetached systems) – Едната компонента (донор) е изпълнила повърхността на Рош и от нея през L_1 изтича материя към другата компонента.
- Контактни двойни (contact binaries) – И двете звезди са изпълнили повърхностните на Рош и атмосферите им формират обща обвивка около тях

Затъмнително-двойни звезди

При затъмнително-двойните звезди едната компонента да закрива частично или напълно другата при орбиталното си движение. Поради това сумарният светлинен поток, получен от системата, се изменя строго периодично с период, равен на орбиталния период на системата. В зависимост от наблюдателните си характеристики (основно, кривата на блясъка), затъмнително-двойните се

делят на три подтипа (фиг. 2):

- Алгол (β Persei, EA) – Имат дълъг, хоризонтален участък при максимален блясък в кривата. Разделени или полуконтактни системи.
- β Лур (β Lyrae, EB) – Имат заоблени максимуми с еднакъв блясък и силно различаващи се нива на двата минимума. Полуконтактни системи.
- W UMa (W Ursae Majoris, EW) – Имат заоблени максимуми с еднакъв блясък и сходни нива на двата минимума. Контактни двойни системи.



Фигура 2: Характерни представители на трите типа затъмнително-двойни звезди: (от горе надолу) Алгол, β Лур и W UMa. Изображението е изготвена от Hummerich, Bernhard & Srdoc, използвайки фигури от Hummerich & Bernhard (2012) (публикувано на сайта на проекта VS Compas: <http://www.vs-compas.belastro.net/bulletin/issue/2/p6>)

W Ursae Majoris

W Ursae Majoris (W UMa) са контактни двойни системи, т.е. двете компоненти споделят обща атмосферна обвивка (Kopal 1955). Обикновено W UMa принадлежат към спектрални класове A, F, G, K. Сумарната маса на системите варира

от $1 M_{\odot}$ до $3 M_{\odot}$ (Gazeas & Niarchos 2006). Кривите на блясъка наподобяват тези на β Лут, но дълбочината на двата минимума е почти еднаква, което се дължи на това, че компонентите са със сходни температури (разлика от порядъка на ~ 100 K). Амплитудите са по-малки от 0.8 mag, а периодите са кратки: главно в интервала 0.22 – 1 d.

В зависимост от наблюдателните параметри Binnendijk (1970) разделя W UMa на два типа – A и W. Тип A са от по-ранен спектрален клас (A, F), имат генерално по-големи светимости и маси, както и по-големи орбитални периоди ($P = 0.4 - 0.8$ d). При тях по-масивната компонента е по-гореща. Тип W са от спектрални класове G и K и са с орбитални периоди 0.2 – 0.4 d. При тях по-маломасивната компонента е по-гореща, отношението на масите е по-близко до 1 и компонентите лежат по-близо до главната последователност.

Отношението на наблюдаваните светимости на двете компоненти е

$$\frac{L_2}{L_1} \propto \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{0.92}, \quad (5)$$

откъдето следва, че вторичната компонента черпи голяма част от своята мощност от ядрото на главната. Този енергиен трансфер резултира в умерена редукция на светимостта на главната компонента, но е причина за сериозно реструктуриране на вторичната, която става твърде голяма и мощна за масата си. Описването на механизма на енергиен трансфер със запазване (в някои случаи, загуба) на стабилност на системата е основна задача за разбирането на структурата и еволюцията на системи от тип W UMa.

Еволюция в обща обвивка

Според теорията на звездната еволюция, звездите започват да се разширяват след престоя си на Главната последователност. Много от тези звезди са в двойни системи с по-маломасивна компонента. Ако орбитата не е достатъчно широка, гигантът може да предава материя на другата компонента с темп, прекалено висок за усвояването ѝ. Тогава акреторът се разширява и обвивките на двете звезди се сливат в една обща. Общата обвивка (Paczynski 1976) е слабо изследвана фаза от еволюцията на двойните системи. Тя не е наблюдавана директно, но са налични доказателства – най-вече, тесните двойни системи с С-О бяло джудже и MS-звезда, напр. катаклизмичните променливи. Тъй като бялото джудже е богато на въглерод, то трябва да се е образувало от AGB-звезда с размер, многократно по-голям от размера на орбитата. По някакъв начин голямата полуос

на орбитата се е смалила значително с времето. Счита се, че обяснението е във фазата с обща обвивка (CE).

В общата обвивка орбитата се смалнява поради триене и липса на коротация между ядрото и обвивката (Podsiadlowski 2001). Първоначално приливните взаимодействия причиняват смалняването на орбитата и процесът е бавен – с характерно време $\sim 10^3$ уг. Когато звездните ядра започнат да преминават през по-плътна материя, процесът се ускорява. Когато загубата на орбитална енергия към обвивката надвиши светимостта ($-dE/dt > L$), се навлиза в динамична фаза с характерна продължителност < 10 уг. В нея приливните взаимодействия не успяват да задържат орбитата кръгова. Обвивката поема гравитационната енергия и част от нея се изхвърля. Съдбата на системата зависи от това, дали при изхвърлянето на обвивката орбитата е достатъчно малка, така че ядрата да се слеят. В системи като катаклизмичните променливи и близки двойни бели джуджета системата е оцеляла. По-неясна е съдбата на системата при сливане – вероятно е резултатът да е бързовъртяща се звезда (напр. тип FK Com).

2 Червени нови и звездни сливания

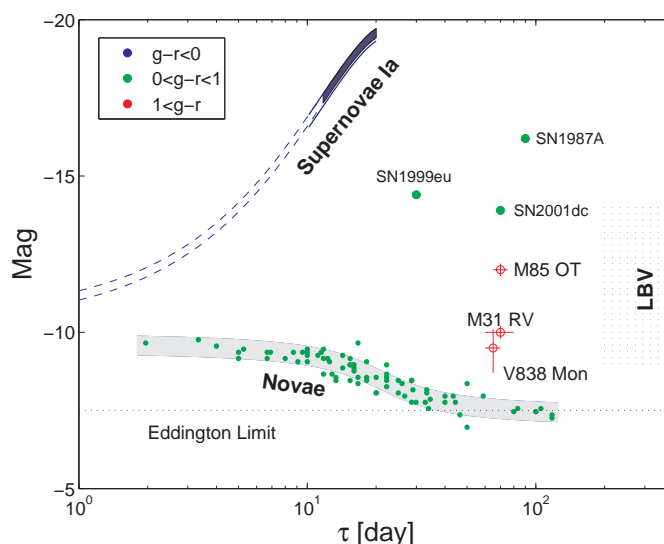
Най-мощните често срещани резки неперидични явления в оптичния диапазон (optical transients, OT) са новите и свръхновите.

Новите възникват в тесни двойни системи, съставени от бяло джудже и MS- или еволюирала звезда, изпълнила зоната си на Рош и предаваща материя към бялото джудже през L_1 . В даден момент акретираният върху бялото джудже водород достига необходимата температура ($\sim 10^7$ K) за активиране на горещ CNO-цикъл и протича бурен термоядрен синтез. Получената енергия е достатъчна за изхвърляне на обвивка със скорост $\sim 10^3$ km/s. Новите достигат абсолютна звездна величина $M = -7 - -9$ mag. В седмиците след избухването се виждат все по-вътрешни и по-горещи части от разширяващата се обвивка, т.е. псевдофотосферата (повърхността на оптически плътната материя) става по-малка и по-гореща. В крайна сметка обвивката става изцяло оптически прозрачна.

Свръхновите (SNe) са значително по-мощни явления – обикновено $M_{bol} = -16 - -20$ mag. Всъщност, представляват два напълно различни вида физични явления. При единия вид свръхнови (свръхнови от тип Ia) бялото джудже в тясна двойна система доближава масата на Чандрасекар от $1.44 M_{\odot}$, благодарение на акретиралата от компаньона материя. Значителна част от масата

на бялото джудже претърпява термоядрен синтез, при което то се взривява. Сходен процес се осъществява и при сливане на двойка бели джуджета. При другия вид свръхнови (core-collapse свръхнови) взривът е породен от колапса на масивна звезда в крайния етап на еволюцията ѝ. Скоростта на изхвърлената обвивка е много висока, обикновено $10000 - 30000 \text{ km/s}$.

Изграждането на стройна теория за пораждането на новите и свръхновите е възможно благодарение на добрата статистика от голям брой наблюдавани явления. В Млечния път ежегодно се регистрират ~ 10 нови, а в близки галактики (основно М31) – над 20. Едва 4 свръхнови са наблюдавани директно в нашата галактика през второто хилядолетие, но високата им светимост позволява да регистрираме над 100 извънгалактични свръхнови годишно. Нещата не стоят така при червените нови – към 2016 г. са известни не повече от 15 такива.



Фигура 3: Диаграма характерно време (в случая, t_2) – пикова светимост за различни видове ОТ (нови, свръхнови тип Ia, червени нови, избухвания на LBV звезди). Ярките червени нови (M31 RV, V838 Mon) имат сходен максимум с най-ярките нови, но спадът им е значително по-бавен. Източник: Kulkarni et al. (2007)

Повечето известни червени нови са достигнали абсолютна звездна величина между -7 и -12 mag . Ярките червени нови мога да се отличат от класическите нови по бавния си спад (фиг. 3). Все още наблюдателните данни не са достатъчни, за да се даде точна дефиниция на обектите от този клас. Основните им отличителни черти са:

- Показват звезден спектър – с много малко или без емисии (често с Na в емисия), но с много абсорбции.

- В седмиците след избухването почервяват, т.е. цветовете им температура намалява. Спектърът се мени към по-късен спектрален клас, достигайки M/L-свръхгигант.
- Скоростите на разширение на обвивката са $100 - 1000 \text{ km/s}$ – значително по-ниски от тези на класическите нови и свръхновите.
- Месеци след избухването се наблюдава ексцес в инфрачервения диапазон – индикация за активно прахообразуване в обвивката.

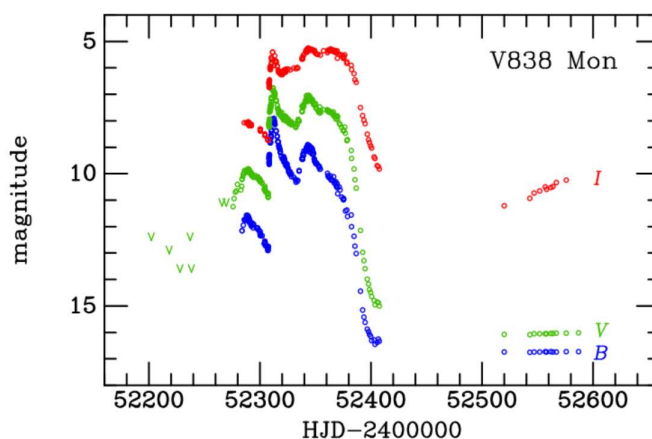
Прототипите: M31 RV, V4332 Sgr и V838 Mon

Съвременната наблюдателна история на червените нови започва с откриването на M31 RV в галактиката Андромеда (M31) през 1988 г. Докато изследват M-гиганти в балджа на M31 Rich et al. (1989) откриват неизвестна дотогава ярка звезда със звездна величина Gunn $i = 14.9 \text{ mag}$, M31 RV, чийто блясък на M31 RV се е покачил с $> 5 \text{ mag}$. На 5 септември те получават спектър с ниска резолюция, наподобяващ клас M0I, с тесни емисии в $H\alpha$ и $H\beta$. Оценената пикова абсолютна звездна величина е $M_{bol} = -10.0 \text{ mag}$. В два спектъра от Mould et al. (1990), 28 d и 57 d след първия, спектралният клас е съответно M3I и M6I. Спектралното разпределение на енергията в диапазона $0.5 - 4.0 \mu\text{m}$ е фитирано с абсолютно черно тяло с $T = 2000 \text{ K}$ за 25 октомври и с $T = 1050 \text{ K}$ за 19 ноември. В началото на февруари 1989 г. обектът вече е прекалено слаб, за да бъде засечен отново. Хелиоцентричните лъчеви скорости са $-435 \pm 20 \text{ km/s}$ на 3 октомври и $-560 \pm 100 \text{ km/s}$ на 1 ноември.

V4332 Sgr през 1994 г. (Martini et al. 1999) е първата наблюдавана червена нова в нашата галактика. По време на оптичния максимум яркостта ѝ достига почти $V = 8 \text{ mag}$, но бързото покачване не е засечено. Регистрирано е рязко почервяване след 3 март 1994 г. – за една седмица $V - I$ индексът се покачва от 1.8 до 3.2 mag. Резките промени са засечени и чрез спектрални наблюдения – набор от спектри в диапазона $4000 - 9000 \text{ \AA}$ показват промяна на спектралния клас от K3III-I до M6III-I през март и до M8-9III-I през юни, на фона на тесни емисии на Балмеровата серия поне до $H\delta$. Спектри с висока резолюция показват $H\alpha$ като абсорбция с FWHM 70 km/s , оградена от емисия с FWHM 200 km/s , с отместване от -180 km/s спрямо лабораторната дължина на вълната.

Най-известната и най-добре изследваната червена нова, V838 Mon, е открита на 6 януари 2002 г. Блясъкът на V838 Mon достига $V = 6.7 \text{ mag}$ във втория от общо четири различни по форма максимума, наблюдавани в оптичния диапазон в рамките на 100 d (фиг. 4). Интересно е, че фотосферната температура на

избухването се покачва преди втория (главния максимум) до ~ 7200 К (Tylanda 2005), след което спада отново и при четвъртия максимум вече е ~ 3500 К. Munari et al. (2002) отбелязват, че V838 Mon няма поведение на класическа нова и прилича на M31 RV и V4332 Sgr по спектралната си еволюция. Дава се идеята за дефиниране на нов клас астрономически обекти.

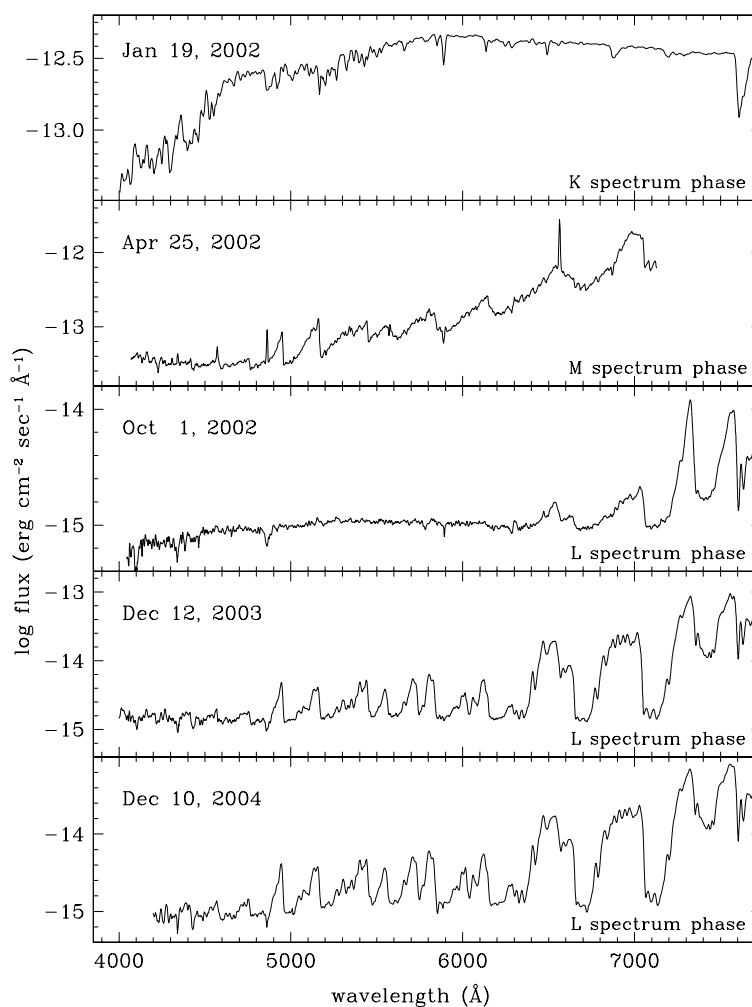


Фигура 4: Крива на блясъка на V838 Mon в *BVI*. Източник: Sparks et al. (2008)

Избухването на V838 Mon създава мощно светлинно ехо – светлината от избухването осветява околосвездната материя и, тъй като скоростта ѝ е крайна, осветената част привидно се разширява. Това позволява да се изчисли точно разстоянието до обекта по наблюдения на разширението с добро ъглово разрешение. По наблюдения с HST¹ Bond et al. (2003) поставят долна граница за разстоянието, $d > 6$ крс, а по-късно Sparks et al. (2008) пресмятат $d = 6.1 \pm 0.6$ крс. Абсолютната звездна величина на V838 Mon в максимум е оценена на $M_V = -9.8$ mag.

Подобно на M31 RV и V4332 Sgr, спектрът на V838 Mon (фиг. 5) е звезден и еволюира бързо към по-късни класове в първите месеци след избухването. През първите 90 d от откриването спектрът е с форма на К-свръхгигант, като фотосферата се загрява около всеки от трите максимума. По това време от по-хладните части на разширяващата се обвивка се образуват линии с P Cygni профил с максимална скорост от ~ 500 km/s, която към $t = 90$ d спада до ~ 250 km/s. След това V838 Mon навлиза в стадий на М-свръхгигант, който преминава почти идентично с еволюцията на M31 RV (Boschi & Munari 2004). Блясъкът в оптичния диапазон спада рязко и в рамките на няколко седмици

¹Hubble Space Telescope



Фигура 5: Спектрална еволюция на V838 Mon за периода 2002 – 2004 г. През 2002 г. спектърът се изменя от К до L свръхгигант. Източник: Munari & Henden (2005)

спектърът преминава през всички М-подкласове. Около 120 d след откриването светимостта на обвивката в оптичния диапазон е намаляла достатъчно и в спектъра се появява ВЗV компонента, която вероятно е физически свързана със системата (фиг. 5). Спектърът преминава във фаза на L-свръхгигант – обект, какъвто до този момент никога не е наблюдаван (Evans et al. 2003). Той е доминиран от мощни молекулни ивици в абсорбция: TiO, VO в оптичния диапазон и H₂O, AlO, CO в близкия инфраквуд. При $t = 200 d$ след избухването цветовата температура достига минимум ($T \sim 1800 K$), след което започва много бавно да се повишава.

Звездно сливане: модел на Tylanda & Soker

Tylanda & Soker (2006) обединяват в един клас M31 RV, V4332 Sgr и V838 Mon най-вече на базата на спектралната им еволюция като отбелязват, че наблюдаваната спектрална еволюция при първите два обекта е изключително сходна с тази на V838 Mon 2-4 месеца след избухването. Като друго силно сходство авторите отбелязват загубата на маса чрез ветрове със скорости 100 – 600 km/s.

Авторите отхвърлят възможността енергетичният бюджет на тези избухвания да е осигурен от термоядрен синтез чрез допускане на противното. Въз основа на наблюдателните характеристики на трите обекта, те опровергават двете основни хипотези, включващи термоядрен синтез: 1) бурен синтез на повърхността на бяло джудже и 2) бурен синтез на външния хелиев слой на еволюирала звезда. Остава възможността енергията на взрива да е гравитационна. Не е известен механизъм, чрез който енергията на избухването на V838 Mon ($\sim 10^{46}$ erg) да се отдели при свиване за няколко месеца. Остава акреция в двойна система. Акреторът не може да е черна дупка или неутронна звезда, защото не е наблюдавано рентгеново излъчване. Също, не може да е бяло джудже, защото биха се осъществили условия за термоядрен синтез. Следователно акреторът е обикновена звезда.

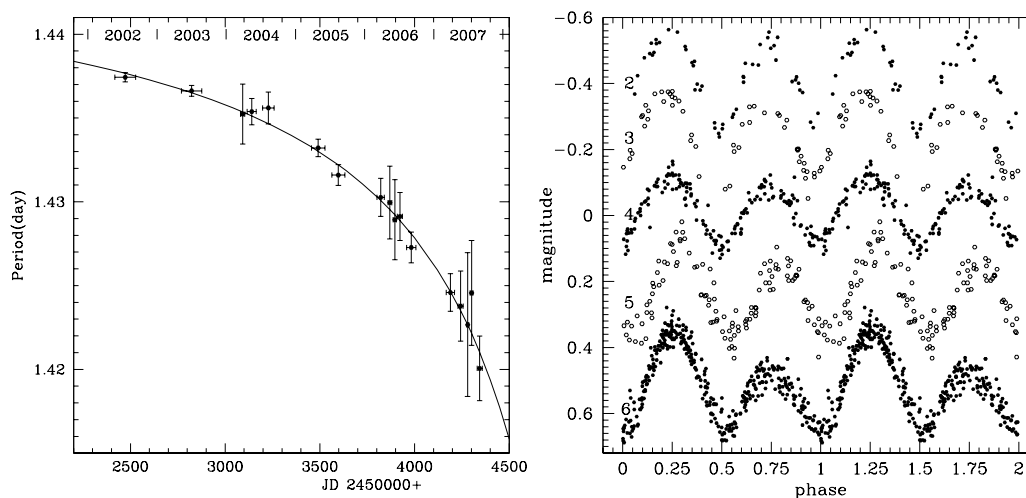
Tylanda & Soker (2006) оценяват, че главната компонента е В/А-звезда от MS с маса $M_1 = 5 - 8 M_{\odot}$. В първите 4 месеца от избухването V838 Mon отделя $\sim 2.5 \times 10^{46}$ erg в електромагнитно лъчение и $0.01 - 0.1 M_{\odot}$ в материя, на която е придадена начална скорост ~ 300 km/s. Записвайки енергетичния баланс на събитието, Tylanda & Soker (2006) оценяват масата на разрушената вторична компонента на $M_2 = 0.1 - 0.3 M_{\odot}$ и поставят ограничение за ексцентрицитета на орбитата $e > 0.8$.

V1309 Sco

Към 2016 г. последната наблюдавана червена нова в нашата галактика е V1309 Sco, избухнала през лятото на 2008 г. Архивните данни, публикувани от Tylanda et al. (2011) показват, че прогениторът е контактна двойна система. Поради това, освен че е един от най-добре изследваните обекти от този клас, V1309 Sco е ключ към разбирането на произхода на червените нови.

Уникална възможност за изследване на V1309 Sco предоставя щастливата случайност, че обектът се намира в поле на OGLE – експеримент за изследване на гравитационни микролеци (Udalski 2003). OGLE предоставя над 2000

фотометрични оценки на V1309 Sco в периода 2001 – 2010 г., основно в Cousins *I* филтър. Оказва се, че прогениторът на V1309 Sco има крива на блясъка наподобяваща W UMa, т.е. е контактна двойна система. (фиг. 6, вдясно) От 2002 до 2007 г. орбиталният период на системата спада експоненциално от 1.44 d до под 1.42 d (фиг. 6, вляво).



Фигура 6: *Вляво*: Експоненциалният спад на орбиталния период $P(t)$ между 2002 и 2007 г. *Вдясно*: Фазирани криви на блясъка на V1309 Sco за периода 2002 – 2006 г. Източник: Tytenda et al. (2011).

Tytenda et al. (2011) интерпретират експоненциалното смалвяване на периода като резултат на нестабилен еволюционен етап, довел до свиване на орбитата с последвало сливане на двете компоненти. Протичането на такъв процес е предвидено в теоретичните изследвания (Webbink 1976; Rasio 1995). Понастоящем се смята, че във финалния етап на еволюцията си компонентите на W UMa системите се сливат в една звезда.

Tytenda et al. (2011) оценяват повърхностната температура на ~ 4500 K, светимостта на $L = 3.0 - 8.6 L_{\odot}$ и разстоянието на $d = 3.0 \pm 0.7$ kpc. Към 2016 г. това все още е единствената червена нова, за която има директно доказателство, че е породена в контактна двойна система. Наблюденията на V1309 Sco са най-силният аргумент в подкрепа на хипотезата, че червените нови са породени при сливане на две звезди.

Известните червени нови към 2016 г.

Червени нови, подобни на V838 Mon

M31 RV (1988 г., M31)
 V4332 Sgr (1994 г., Млечен път)
 V838 Mon (2002 г., Млечен път)
 OGLE-2002-BLG-360 (2002 г., Млечен път)?
 M85 OT2006-1 (2006 г., M85)?
 V1309 Sco (2008 г., Млечен път)
 NGC 4490-OT2011 (2011 г., NGC 4490)
 M31LRN 2015 (2015 г., M31)
 M101 OT2015-1 (2015 г., M101)

Предполагаеми исторически червени нови

CK Vul (1670 г., Млечен път)
 V1148 Sgr (1943 г., Млечен път)

Други ОТ със сходства в наблюдателните параметри

SN 2008S (2008 г., NGC 6946)
 NGC 300 OT2008-1 (2008 г., NGC 300)
 PTF 10fqg (2010 г., M99)
 PTF 10acb (2010 г., UGC 11973)

Kasliwal et al. (2011) обединяват SN 2008S, NGC 300 OT2008-1, PTF 10fqg и M85 OT2006-1 в един общ клас. Обектите от този клас би трябвало да имат екстремни AGB прогенитори, обвити в прах. Най-вероятно енергията на тези избухвания също е с гравитационен произход.² Някои автори предлагат систематизиране на понятията LRN, ILRT и ILOT в контекст на явления от звезден произход с висока светимост, които не са класически нови или свръхнови. Soker & Kashi (2016) наричат всички такива явления ILOT и ги разделят на три групи: LRNe (червените нови), екстремни LBV избухвания и ILRT (обектите от класа на SN 2008S).

Механизми за сливане на компонентите на двойна система

Един от възможните механизми, водещи до сливане в контактна двойна, е достигане на т.нар. “нестабилност на Дарвин”. Случва се, когато ъгловият момент на околоосно въртене в системата достигне една трета от този на орбитално въртене. На теория, при контактните двойни тази нестабилност се достига при

²вж. напр. <http://phsites.technion.ac.il/soker/ilot-club/>

много ниски отношения на масите: $q < 0.076$ (Li & Zhang 2006). При по-ниски отношения на масите не се наблюдават, тъй като такава система не може да бъде задържана в синхронизация от приливните сили. При получената десинхронизация приливните сили ще пренесат орбиталния ъглов момент към въртенето на главната компонента, което ще доведе до ускорително свиване на орбитата и сливане на компонентите.

Друг възможен механизъм е навлизането на системата в дълбок контакт. Това може да се случи, когато главната компонента започне да еволюира и прекосява т.нар. Hertzsprung gap – зоната между MS и клона на червените гиганти по диаграмата на Херцшпрунг-Ръсел. Главната компонента обгръща вторичната и се преминава във фаза с обща обвивка. Системата започва да губи материя и ъглов момент през външната точка на Лагранж, L_2 . Това води до свиване на орбитата, по-дълбок контакт и ускоряване на процеса. Поражда се и десинхронизация и, както при нестабилността на Дарвин, започва да се пренася ъглов момент от орбитата към околоосното въртене на компонентите.

3 Търсене и изследване на нови в М31

Близките галактики са много удобни за търсене на нови. Основното им предимство е оптималният им ъглов размер, който позволява да се извършва мониторинг за ОТ на съществена част от галактиката със зрително поле, характерно за малки телескопи. Както беше отбелязано в Глава 2.1, в М31 се откриват над 20 предполагаеми нови годишно, като немалка част от тях получават и спектрално потвърждение въз основа на характеристики, описани в Глава 2.1. В сравнение, откриваните нови в М33 са малко (2 – 3 годишно). Информацията за нови в близки галактики се актуализира своевременно в базите данни на Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik³ и Rochester Academy of Science⁴.

От 2004 г. насам в България действа група за откриване и изследване на нови в М31. Ядрото на групата е съставено от астрономи от Софийския университет, а дейността ѝ до 2010 г. е описана от Valcheva et al. (2010). Основните цели и дейности на групата са:

- Откриване на кандидати за нови в М31 в оптичния диапазон и съвременното им съобщаване в The Astronomer's Telegram (ATel, уебсайт за бърз обмен между наблюдателни астрономи посредством кратки онлайн

³<http://www.mpe.mpg.de/~m31novae/opt/m31/index.php>

⁴<http://www.rochesterastronomy.org/novae.html>

съобщения – “телеграми”). Така явленията бързо се оповестяват сред научната общност, което спомага за по-подробното им изследване и в много случаи води до спектрално потвърждение.

- Проследяване на фотометричната еволюция в оптичния диапазон на вече оповестени кандидати за нови в М31. В немалко случаи резултатите се съобщават в *The Astronomer’s Telegram*, за да могат други изследователски групи своевременно да преценят дали и как да включат съответния обект в наблюдателната си програма, според възможностите на инструментите си.
- В индивидуални случаи: спектрално потвърждаване на обекта като нова или регистриране на $H\alpha$ емисия чрез тесноивична фотометрия.
- В индивидуални случаи: дългосрочно фотометрично и спектрално изследване на обекта.

В периода 2013 – 2016 г. групата използва следните инструменти за наблюдателните си цели:

- **50/70 cm Шмид телескоп на НАО Рожен (Националната астрономическа обсерватория).** Изключително подходящ за задачата поради голямото си зрително поле. В комбинация със CCD камерата FLI PL 16803 с Johnson-Cousins *UBVRI* филтри полето е с размер $74' \times 74'$ и мащаб $1.08''/\text{pixel}$. Обикновено се използва за търсене на ОТ по дълбоки кадри в R . При добри наблюдателни условия чрез комбиниране на 5 експозиции с продължителност по 300 s се достига характерна 5σ проникваща способност $R \approx 20.5 \text{ mag}$. Допълнителни кадри в B , V и I се използват за пресмятане на цветови индекси.
- **2 m Ritchey-Chrétien-Coudé телескоп на НАО Рожен (2mRCC).** За предпочитане е този детектор да се използва с фокалния редуктор FoReRo2 (Jockers et al. 2000). Така зрителното поле е с форма на кръг с диаметър $\sim 16'$, но на $\gtrsim 5'$ от центъра се наблюдават астрометрични и фотометрични отклонения. Инструментът може да се използва в комбинация с набор от широкоивични и тесноивични филтри, вкл. Johnson-Cousins *VRI*, Sloan *griz*, два различни филтъра в областта на $H\alpha$, OIII, SII и континуумни филтри. Обикновено, с комбинация от 5 експозиции по 180 s в R се достига 5σ проникваща способност $R \approx 22 \text{ mag}$ за търсене на ОТ в централните части на М31. С тесноивична фотометрия се получава относителен $R-H\alpha$ индекс, който може да покаже $H\alpha$ емисия. При по-ярките

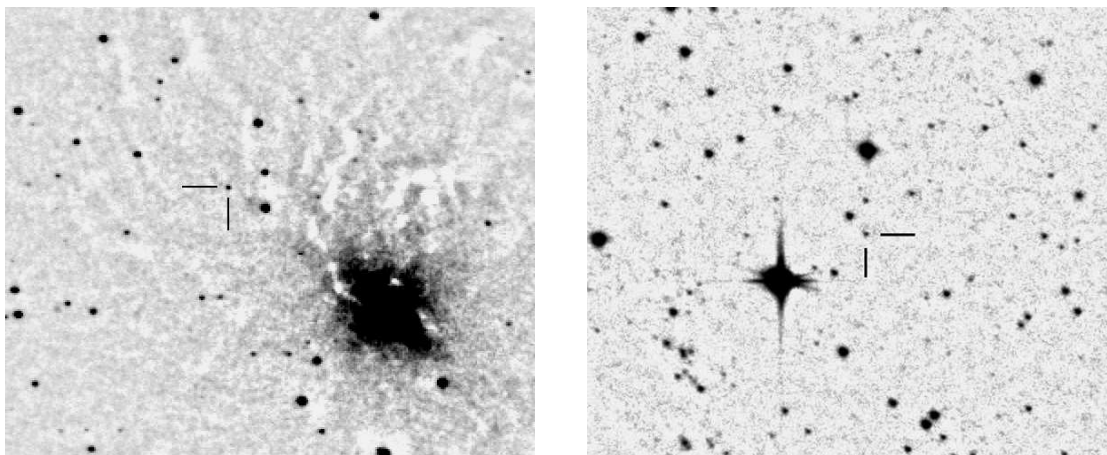
От в М31 това е почти сигурно доказателство, че обектът е нова. Ако наблюдаваният обект е достатъчно ярък, инструментът позволява да се получи спектър с ниско разрешение ($R \approx 400$) с гризма в червения канал.

- **35 cm Нютон телескоп на САО Плана** (Студентската астрономическа обсерватория на катедра “Астрономия” към Физическия факултет на СУ; в работа от 2013 г.). Телескопът е с фокусно разстояние 160 cm (f/4.6). В комбинация със CCD камерата SBIG STL-11000M с Johnson-Cousins *UBVRI* филтри дава зрително поле с размер $78' \times 52'$. С единична 300 s експозиция се достигат 5σ дълбочини до $R \approx 18.5$ mag, $V \approx 19.0$ mag, $B \approx 19.8$ mag (Ovcharov et al. 2014b).

За търсене на нови обикновено се използва специален алгоритъм за обработка на кадрите. След редукцията и напасване по координати кадрите се комбинират медианно, за да се изчистят остатъчни горещи пиксели и космически частици. След това се извършва медианна филтрация – с процедурата MEDIAN се генерира кадър, в който всеки пиксел е с медианна стойност на околните 25×25 пиксела в оригиналния кадър. Генерираният кадър, съдържащ само фон от галактиката, без разделените звезди, се изважда с цел да се неутрализира влиянието на фона при визуалната инспекция за нови (фиг. 7, вляво). Самата визуална инспекция се извършва с блинковоане (бърза смяна) на кадъра с по-ранен кадър, получен по същия алгоритъм.

Обикновено се извършва апертурна фотометрия с АРНОТ/РНОТ. За фотометричната калибровка в *BVRI* филтри се използват надеждните вторични стандарти от Local Group Galaxies Survey (Massey et al. 2006).

За периода 2013 – 2016 г. групата е публикувала 170 фотометрични оценки за 30 кандидати за нови в М31. От тези 30 обекта 5 са открития на групата, а за 8 обекта групата е потвърдила $H\alpha$ емисията чрез тесноивична фотометрия. Повечето наблюдения са публикувани в The Astronomer’s Telegram (Ovcharov et al. 2013c,b,a, 2014a, 2015a,d,e,b; Valcheva et al. 2016b,a), а някои – в статия в Bulgarian Astronomical Journal, съдържаща първите резултати от САО Плана (Ovcharov et al. 2014b, *Plana Student Astronomical Observatory: First results and perspectives*). За някои обекти ръководителят на групата (Е. Овчаров) е изпратил карти за идентификация до екипа, поддържащ веб-страницата на Rochester Academy of Science за извънгалактични нови (фиг. 7). Резултатите показват, че изследването на нови в близки галактики е постижима цел за 35 cm телескоп на катедра “Астрономия”. Всички публикувани фотометрични наблюдения в периода 2013 – 2016 г., с изключение на наблюденията на червената нова М31LRN 2015, са представени в табл. 1 в приложението на дисертацията.



Фигура 7: Изображения за идентификация на две спектрално потвърдени нови в M31, получени с телескопите на НАО и публикувани на уеб-страницата на Rochester Academy of Science за извънгактични нови. Обектите са M31N 2014-11a (*вляво*) и M31N 2016-07c (*вдясно*). На левия кадър се вижда ядрото на M31. Високият фон от балджа на галактиката е редуциран чрез медианна филтрация. И двата обекта са наблюдавани от дисертанта.

Изследването на M31LRN 2015 (глава 4) беше започнато в следствие от работата на тази група. Какво е математическото очакване да се засече друга червена нова в M31 в близките години е сложен въпрос, тъй като честотата на тези избухвания все още не е добре оценена (както е дискутирано в Глава 2.5). Кандидати за червени нови могат да бъдат търсени сред непотвърдените спектрално избухвания чрез изследване на промяната на цветовете индекси. Макар и странична задача, това остава интересна перспектива за бъдещата работа на групата.

4 Червената нова M31LRN 2015

4.1 Хронология на наблюденията

На 13 януари 2015 г. руската мрежа от роботизирани телескопи MASTER (Lipunov et al. 2010) откри пореден кандидат за нова в M31, с оптична звездна величина (без филтър) ~ 19.0 mag. Откритието беше съобщено незабавно от екипа на MASTER (Shumkov et al. 2015, ATel#6911). В последвалите нощи обектът (вече MASTER OT J004207.99+405501.1) беше наблюдаван екстензивно с Шмид и 2mRCC телескопите на НАО Рожен. Около 1 d след избухването беше получен спектър с FoReRo2 с ниско отношение сигнал/шум (S/N), показващ слаба $H\alpha$

емисия, а при $R \approx 16.8$ mag яркостта продължаваше да се повишава. Около 3 d след избухването обектът с $R \approx 15.6$ mag вече беше сравним с най-ярките нови в M31, което позволи да се получи по-качествен спектър с FoReRo2. Спектърът показва силна и тясна $H\alpha$ емисия, въз основа на която обектът беше неправилно класифициран като нова. Наблюденията от НАО в първите дни след избухването бяха съобщени съвременно от Ovcharov et al. (2015c, ATel#6924) и Kurtenkov et al. (2015a, ATel#6941). Fabrika et al. (2015, ATel#6985) публикуваха фотометрични и спектрални данни от инструмента SCORPIO на 6 m телескоп ВТА-6 (SAO RAS) в 2 епохи – 15 и 21 януари, – в които спектърът е характерен за звезда от клас F, с множество тесни абсорбции и слаба емисия в $H\beta$, обградена от абсорбцията. В следствие се оказва, че втората епоха приблизително съвпада с максимума в оптичния диапазон при $R \approx 15.1$ mag. Като кандидат за нова в M31, обектът получи обозначението M31N 2015-01a – първата нова (a) в M31 за месец 2015-01.

След 24 януари не бяха публикувани нови наблюдения на обекта в продължение на един месец. В края на януари и началото на февруари атмосферните условия не позволиха избухването да бъде проследено от България. В следствие от лична кореспонденция с Петър Песев (Instituto de Astrofísica de Canarias, Испания) и Stefano Valenti (University of California, Davis, САЩ) обектът беше включен в програма за мониторинг на OT с 1 m телескоп на мрежата LCOGT⁵ (Shporer et al. 2011) в обсерваторията McDonald, САЩ. Благодарение на Krisztián Vida започна мониторинг и с 60/90 cm Шмид телескоп на обсерваторията Konkoly, Унгария⁶. За мониторинг бяха избрани Johnson-Cousins филтрите. Спадът в приоритетния за мониторинг R филтър се оказа нехарактерно бавен за ярка нова – в началото на февруари яркостта ѝ все още беше $R \approx 15.7$ mag. На базата на фотометричното поведение и абсорбционния спектър, докладван от Fabrika et al. (2015, ATel#6985), Тома Томов (Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Торун, Полша) предложи, че обектът може да е червена нова (лична кореспонденция). Получените фотометрични резултати по кадри от Konkoly от 7/8 февруари силно подкрепиха тази хипотеза – $B - R$ индексът беше нарастнал от 0.9 mag до 2.1 mag за около 2 седмици. По заявката за DDT на П. Песев, Т. Томов, А. Куртенков (GTC2015-020) бяха отпуснати 30 min директорско време с инструмента OSIRIS на 10.4 m Gran Telescopio Canarias (GTC). Спектрите с $R \approx 2500$ бяха получени на 24 февруари. Междувременно бяха обединени усилия с екипа, ръководен от Sergei Fabrika (SAO), който на 21 и 22 февруари получи спектри с $R \approx 1000$ със SCORPIO на ВТА-6. Спектрите от GTC и ВТА-6 показаха силен континуум, типичен за К-свъръхгигант. Наблюда-

⁵Las Cumbres Observatory Global Telescope, <http://lco.global/>

⁶http://www.konkoly.hu/index_en.shtml

ваната промяна на спектъра от F до K със стабилно понижаване на цветовата температура, бавният спад, високата светимост в максимум и ниските скорости на разширение на обвивката на този етап бяха достатъчни аргументи за това, обектът да бъде класифициран като червена нова. Това заключение беше обявено на 27 февруари в The Astronomer's Telegram от целия екип, проследил обекта в предходния месец (Kurtenkov et al. 2015b, ATel#7150).

Оптичният мониторинг продължи с наблюдения с инструмента ALFOSC на 2.56 m Nordic Optical Telescope (NOT). Резултатите от NOT през март 2015 г. (Pessev et al. 2015a, ATel#7272, $R \approx 17.3$ mag на 14 март) бяха последните съобщени оптични звездни величини на обекта преди да се загуби видимостта на обекта от наземни телескопи за двумесечен период около съединението на M31 със Слънцето. След това обектът не беше регистриран надежно в оптичния диапазон отново. Беше дадено начало на NIR мониторинг с инструмента NOTCam на NOT. Рязко повишаване на блясъка в K_S (0.7 mag за 1 d) в началото на юни, загатващо за прахообразуване, беше съобщено в Pessev et al. (2015c, ATel#7624). Последвалите NIR наблюдения (Pessev et al. 2015b; Geier & Pessev 2015, ATel#8059 & #8220) подкрепиха тази хипотеза – в края на септември $K_S = 15.34 \pm 0.08$ mag, а $J - K_S = 3.55 \pm 0.15$ mag, което е по-червено в NIR диапазона и от най-хладните гиганти, дори след отчитане на цветовия ексцес (секция 4.2).

Данните от нашия оптичен мониторинг бяха допълнени от оптичните наблюдения на Kamil Hornoch (Ondřejov, Чехия), Андон Костов (Институт по астрономия, БАН) и Klaas Wiersema (University of Leicester, Великобритания), след което бяха хомогенизирани (както е описано в Глава 4.2). Пълните данни от оптичния мониторинг за периода януари – март 2015 г. бяха публикувани като Letter to the Editor в Astronomy & Astrophysics през юни 2015 г. (Kurtenkov et al. 2015c, *The January 2015 outburst of a red nova in M 31*, A&A, 578, L10).

4.2 Оптичен мониторинг

Астрометрия

Отделни астрометрични калибровки бяха извършени по каталозите PPMXL (Roeser et al. 2010) и LGGS (Massey et al. 2006). Бяха получени астрометрични решения за 5 кадъра от телескопите GTC, ВТА-6 и 1m LCOGT. След усредняване по PPMXL бяха получени координати α, δ (J2000) = $00^h42^m08^s.053, +40^\circ55'01''.27$ с точност $\Delta_\alpha \sim 0.2''$, $\Delta_\delta \sim 0.1''$. Усредняване на резултатите от калибровките по LGGS даде α, δ (J2000) = $00^h42^m08^s.065, +40^\circ55'01''.33$ и

Таблица 1: Телескопите, използвани за фотометрични наблюдения по време на оптичния мониторинг на M31LRN 2015.

телескоп	обсерватория	държава	мащаб ["/pix]
6 m BTA-6	SAO RAS	Русия	0.36
2.5 m NOT	ORM	Испания	0.19
2 m RCC	HAO Рожен	България	0.74
1 m LCOGT	McDonald	САЩ	0.47
65 cm рефлектор	Ondřejov	Чехия	1.05
60/90 cm Шмид	Konkoly	Унгария	1.03
50/70 cm Шмид	HAO Рожен	България	1.08
50 cm Cassegrain	Uni Leicester	Великобритания	0.89

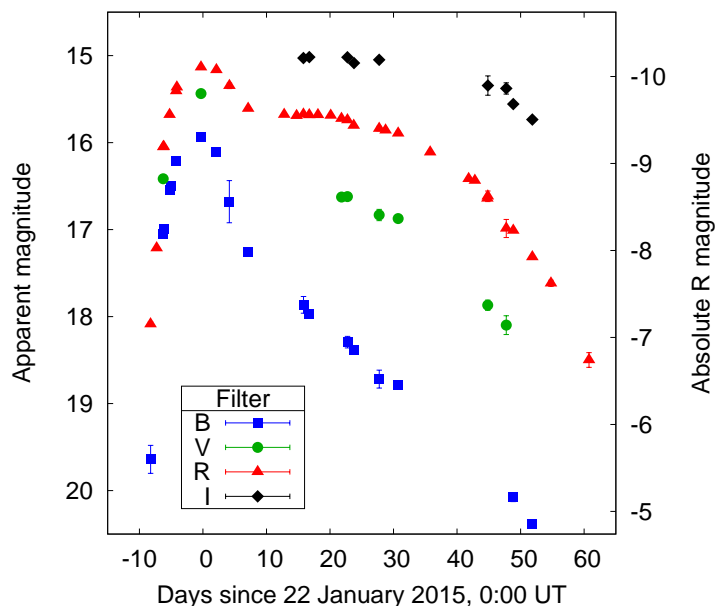
$\Delta_\alpha \sim \Delta_\delta \sim 0.05''$. Независимо от това, кой от двата каталога е по-точен спрямо ICRS координатната мрежа, резултатите от LGGS са по-удобни за идентификация на обекта в бъдеще или на прогенитора по архивни кадри.

Фотометрия

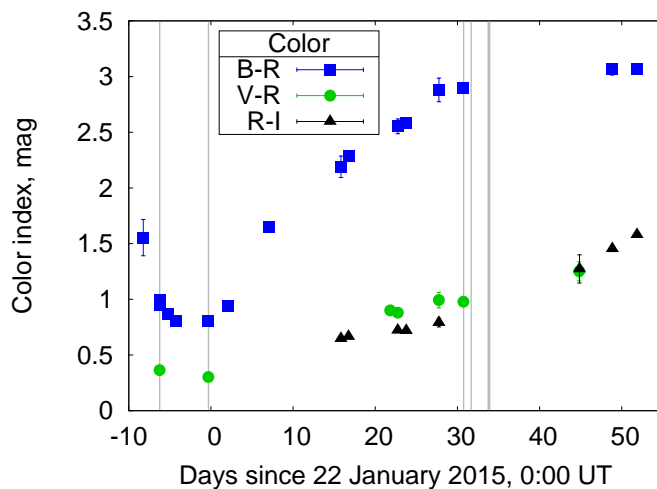
Обектът беше следен в Johnson-Cousins *BVRI* филтри. Използваните за фотометрични наблюдения телескопи са изброени в табл. 1. Кадрите са с голям набор от проникващи способности и ъглови размери на полетата. С цел да се получи хомогенен набор от данни, финалната фотометрия за всички кадри беше получена по 4 ярки звезди за сравнение в радиус от $1.6'$ от обекта. За предварителната фотометрия с цел наблюдателно планиране по време на кампанията, вкл. и фотометрията, публикувана в ATel#7150 и ATel#7272 бяха използвани звездните величини на звездите за сравнение от каталога на Magnier et al. (1992). С предположението, че каталогът на Massey et al. (2006) е по-надежден, той беше използван за рекалибриране на *BVRI* величините на четирите звезди.

За всеки индивидуален кадър беше извършена апертурна фотометрия. Радиусът на апертурата беше подбран в диапазона 1–1.5 FWHM на Гаусовия профил на точковите източници. При получени няколко последователни кадъра са използвани средните стойности на JD и медианните стойности на звездната величина, а грешката е получена като rms на стойностите на отделните кадри. Резултатите са дадени в табл. 2 в приложението на дисертацията. Построената крива на блясъка в *BVRI* е представена във фиг. 8.

Кривата на блясъка (фиг. 8) показва сходства с тази на V1309 Sco в първия месец след откриването (Mason et al. 2010). Съдейки по формата на кривата на блясъка, наблюденията от BTA-6 на 21 януари 2015 г. вероятно са получени



Фигура 8: Крива на блясъка на M31LRN 2015 в Johnson-Cousins *BVRI* филтри. Нулцункта по времевата ос съвпада приблизително с максимума в *R*-филтър. Вдясно са дадени абсолютни звездни величини, приложими единствено за филтър *R*, използвайки цветови ексцес $E_{B-V} = 0.35$ mag. Публикувано в Kurtenkov et al. (2015c, A&A, 578, L10).



Фигура 9: Промяната на наблюдаваните цветови индекси на M31LRN 2015 в оптичния диапазон. Вертикалните линии съответстват на времената на получаване на спектрите (табл. 2) от ВТА-6 (тънки) и ГТС (дебела линия). Публикувано в Kurtenkov et al. (2015c, A&A, 578, L10).

малко преди максимума в R и малко след максимума в B , така че може да се приеме, че приблизително съвпадат в максимума във V и стойността му е $V = 15.43$ mag. Чрез линейна интерполация между точки по кривата могат да се оценят времената t_2 : съответно ~ 17 d, ~ 40 d и ~ 50 d за B , V и R . Подобно на други червени нови се наблюдава плато преди спада – в случая, в R филтър. В B спадът е монотонен, а наблюдения от MASTER показват, че в I вместо спад се наблюдава втори максимум (V. Lipunov, лична кореспонденция). Платото и втория максимум в I са аналогични на платото и третия максимум в I при V838 Mon. Предварителен максимум като при V838 Mon не може да бъде отхвърлен.

На фиг. 9 е представена промяната на цветовете. Първоначално цветовата температура се повишава и достига пик 2 – 3 d преди максимума в R . След това постоянно се понижава и за 31 d $B - R$ се увеличава с цели 2.1 mag. Изключително рязката промяна на $B - R$ в периода $t - t_{max} = 5 - 20$ d е сходно интензивна с едноседмичното покачване на $V - I$ на V4332 Sgr с 1.4 mag през март 1994 г.

Спектроскопия

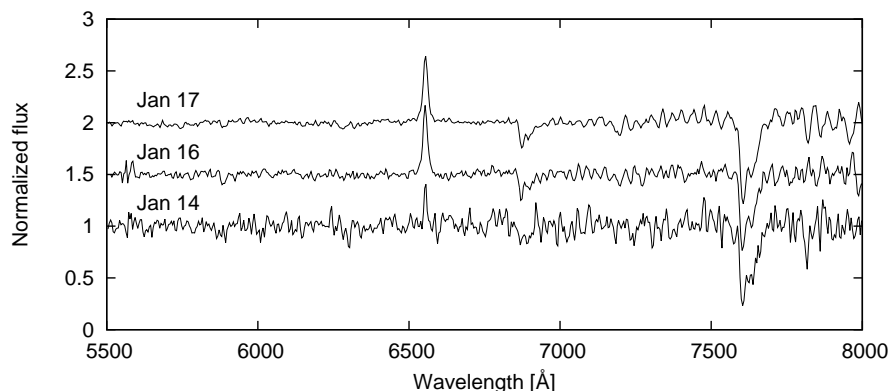
Спектри на M31LRN 2015 бяха получени с три телескопа – BTA-6, GTC и 2mRCC (табл. 2). Спектрите от FoReRo2 на 2mRCC бяха редуцирани и бяха извършени трасиране и екстракцията на 1D спектри. Калибровка по дължина на вълната (получаване на функцията на дисперсията) беше извършена по 20 линии на нощното небе с $\text{rms} \sim 1$ Å. Полученият мащаб е 4.3 Å/pix. Спектрите бяха нормирани спрямо континуума и комбинирани за всяка от двете нощи.

Спектрите от OSIRIS на GTC бяха получени с 3 отделни VPH гризми: R2500V (0.8 Å/pix), R2500R (1.0 Å/pix) и R2500I (1.4 Å/pix). Редукцията беше извършена по сходен начин. Тъй като инструментът е в Nasmyth фокус, той е значително по-стабилен от FoReRo2 и за калибровка по дължина на вълната бяха използвани емисионни лампи (HgAr + Ne + Xe). Спектрите са калибрирани по поток използвайки спектрофотометричните стандарти G191-B2B, Hiltner 600 and Hz 2 (Oke 1990; Namcy et al. 1992, 1994), след което са съшити по дължина на вълната, за да се получи целия спектър в диапазона 4430-9090 Å.

Единствените линии в спектрите от FoReRo2 (фиг. 10), които са добре регистрирани при ниското отношение S/N са мощната H α емисия и Na I D в абсорбция. Еквивалентните ширини на H α са съответно 19 ± 1 Å и 17 ± 1 Å на 16 и 17 януари. Бяха получени лъчеви скорости на пика на H α емисиите от -365 km/s и -350 km/s като инструменталната резолюция е много по-голяма (~ 700 km/s). Резултатите са в съгласие с оценката на Fabrika et al. (2015) за лъчева скорост от $\sim -370 \pm 50$ km/s на областта от диска на M31, в която се

Таблица 2: Хронология на спектралните наблюдения на M31LRN 2015. Използваните инструменти са описани от Jockers et al. (2000), Afanasiev & Moiseev (2005) и Сера (1998).

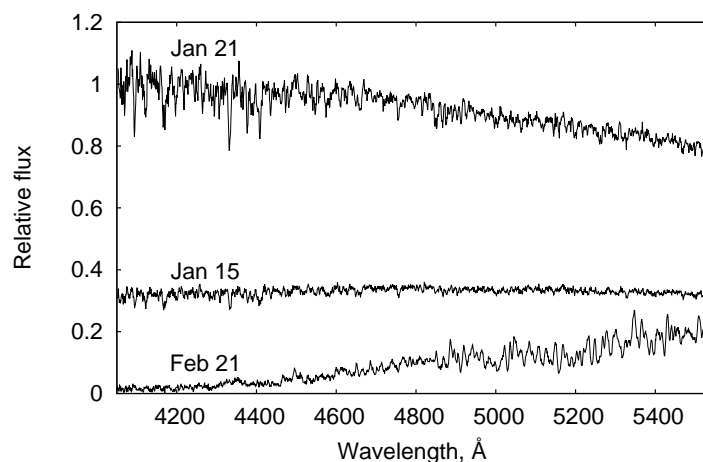
дата	телескоп/инструмент	$R = \lambda/\Delta\lambda$	диапазон [Å]	експозиции [s]
2015-01-15	BTA/SCORPIO	1000	4050-5850	1500
2015-01-16	2mRCC/FoReRo2	400	5500-7500	4×900
2015-01-17	2mRCC/FoReRo2	400	5500-7500	5×900
2015-01-21	BTA/SCORPIO	1000	4050-5850	1800
2015-02-21	BTA/SCORPIO	1000	3720-5530	2700
2015-02-22	BTA/SCORPIO	1000	5750-7500	1800
2015-02-24	GTC/OSIRIS	2500	4430-9090	6×180



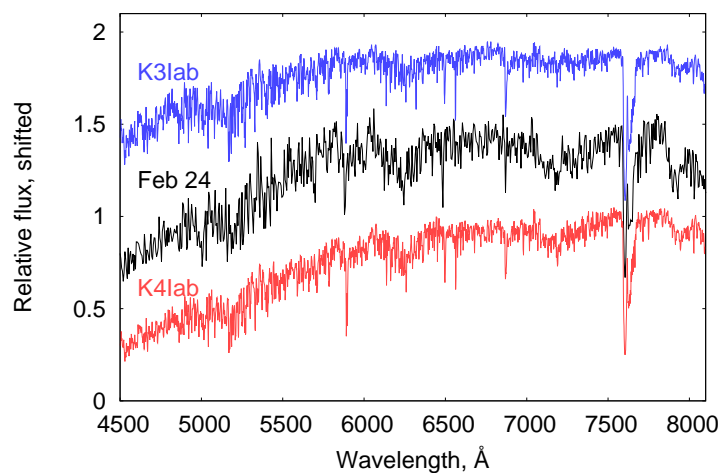
Фигура 10: *Горе*: Спектър (2D) на M31LRN 2015 с FoReRo2 на 2mRCC от 16 януари, центриран на мощната атмосферна абсорбционна ивица A на кислорода ($\sim 7600 \text{ \AA}$). Забелязва се как ивицата (успоредните тъмни линии) минава по-вляво върху спектъра на обекта, отколкото върху фона, което не се наблюдава при емисиите на небето. Причината е асиметрията в потока от обекта във широкия процеп, зависеща от ръчното гидиране. *Долу*: Спектри (1D) на M31LRN 2015 от FoReRo2, нормирани по континуум. Спектрите са вертикално отместени с константи +1.0, +0.5 и 0 за по-добра визуализация и са коригирани за гореописания ефект. Единствените линии, ясно регистрирани над шума, са NaI D ($\sim 5900 \text{ \AA}$), H α и телуричните ивици A ($\sim 7600 \text{ \AA}$) и B ($\sim 6900 \text{ \AA}$). Емисията на H α видимо се усилюва до 16 януари, след което леко спада.

намира обектът.

Първият спектър от BTA-6 ($t = t_{max} - 6 \text{ d}$) показва сходство с клас F5I. Абсорбциите във втория спектър от BTA-6 ($t \approx t_{max}$) са почти същите, но континуумът е по-син (Fig. 11), близък до клас F0I. Крос-корелации с образци от библиотеките дават лъчеви скорости съответно $-462 \pm 38 \text{ km/s}$ и $-534 \pm 14 \text{ km/s}$ за двете епохи. Отчитайки лъчевата скоростта на тази част от диска на M31 от -370 km/s се получава, че хелиоцентричната скорост е $\sim 90 \text{ km/s}$ на 15 януари



Фигура 11: Спектри на M31LRN 2015, получени с гризмите VPHG1200B и G на ВТА-6/SCORPIO, калибрирани в относителен поток (вкл. един спрямо друг). Публикувано в Kurtenkov et al. (2015c, A&A, 578, L10).



Фигура 12: Комбинирания спектър от GTC/OSIRIS с отчетено почервявяване от $E_{B-V} = 0.4 \text{ mag}$ (с процедурата DEREDDEN) в сравнение със звездите HD 157999 (K3Iab) и 41 Gem (K4Iab). Публикувано в Kurtenkov et al. (2015c, A&A, 578, L10).

и се увеличава до $\sim 160 \text{ km/s}$ в следващите 6 d. Февруарските спектри от ВТА-6 и GTC ($t \approx t_{max} + 30 \text{ d}$) показват много по-хладен континуум, в съответствие с фотометричните резултати. В спектъра от GTC $H\alpha$ е в слаба емисия, разделена централно от абсорбция. Спектрите показват сходство с клас K3-4I. Лъчевата скорост е $-588 \pm 40 \text{ km/s}$, т.е. наблюдаваната скорост на изхвърлената материя се е повишила до $\sim 220 \text{ km/s}$. Чрез фитиране на спектрите от GTC и ВТА-6 с

образци от библиотеките (съответно F5I, F0I и K3I) са получени независими оценки за цветовия експес: $E_{B-V} = 0.37, 0.33, 0.25$ и 0.42 mag. Операциите са извършени с процедурата FITSPEC в пакета SYNPHOT. (*T.Томов*)

4.3 Оценка на светимостта в максимум

За пресмятане на светимостта е необходимо да се оцени цветовият експес E_{B-V} . Светимостта L е обвързана с абсолютната звездна величина чрез закона на Погсън във формата:

$$M_{bol} = M_{\odot bol} - 2.5 \log_{10} L[L_{\odot}], \quad (6)$$

където $M_{\odot bol} = 4.75$ mag е болометричната абсолютна звездна величина на Слънцето. От своя страна, болометричната звездна величина за спектър с известна форма (звезден, в случая) се получава с прилагане на болометричната корекция: $M_{bol} = M_V + BC_V$. Болометричната корекция може да се намери като функция на спектралния клас, а абсолютната звездна величина е обвързана с видимата чрез:

$$V = M_V + 5 \log_{10} r[\text{pc}] - 5 + A_V \quad (7)$$

или

$$V = M_V + (m - M) + A_V, \quad (8)$$

където $(m - M)$ е модулът на разстоянието, а поглъщането във V е $A_V = R_V E_{B-V}$. За целта може да се приеме, че $R_V \approx 3.1$. Така основното неизвестно остава E_{B-V} .

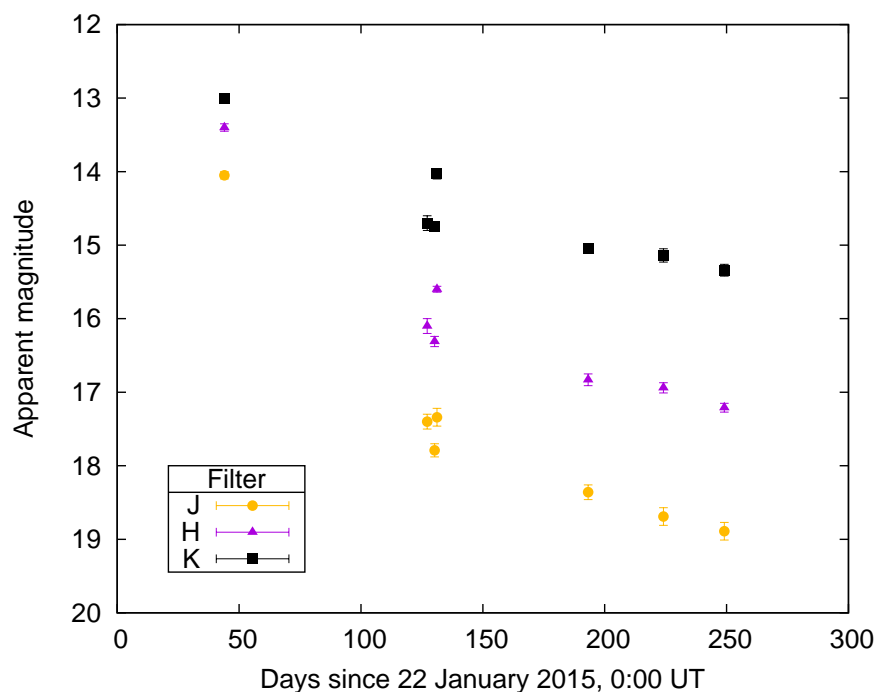
Сравнение на $B - V$ и $V - R$ индексите с каталога на Worthey & Lee (2011) показва, че почервяването може да е в интервала $0.15 - 0.58$ mag. Средната стойност, получена от спектрите ($E_{B-V} = 0.35 \pm 0.10$ mag) е в този интервал. Приносът на праха в нашата галактика към цветовия експес е ~ 0.05 mag (Schlafly & Finkbeiner 2011). При тази стойност на почервяването цветът в максимум е $(B - V)_0 = 0.15 \pm 0.10$ mag, а болометричната корекция е $BC_V = +0.03$ mag. Базата данни NED дава медианна стойност за модула на разстоянието на центъра на M 31 $(m - M) = 24.45$ mag. Ако приемем, че M31LRN 2015 лежи в равнината на диска, разликата спрямо центъра на M 31 е $+0.02$ mag. Така, приемаме, че модулът на разстоянието е $(m - M) = 24.47$ mag и се получава, че абсолютната звездна величина в максимум е $M_V = -10.13 \pm 0.30$ mag. Това дава резултат за светимостта $L_{bol} = 8.7_{-2.2}^{+3.3} \times 10^5 L_{\odot}$.

M31LRN 2015 се проектира в III region с ъглови размери $2'' \times 2''$ (Azimlu

et al. 2011, #1527). Екстинкцията за региона е оценена на $A_R = 0.538$ mag, което дава по-нисък цетови ексцес – $E_{B-V} = 0.23$ mag. Ако обектът се намира физически в тази област, оценката за светимостта се занижава на $\sim 6 \times 10^5 L_{\odot}$.

4.4 M31LRN 2015 в инфрачервения диапазон

За съжаление, почти липсват NIR оценки на M31LRN 2015 по време на най-активната фаза на избухването (януари – март 2015 г.). Единствените публикувани наблюдения в този период са JHK оценките на Srivastava et al. (2015, ATel#7236). Наблюдаваните цветове ($J - H = 0.65 \pm 0.07$ и $J - K = 1.05 \pm 0.07$) са типични за късна K / ранна M звезда и не показват инфрачервен ексцес.



Фигура 13: Крива на блясъка на M31LRN 2015 в JHK филтри.

Наблюдения от Spitzer през април (Adams et al. 2015a,b, ATel#7468 & #7485) не показват значителна променливост в Mid-IR диапазона. Получени са по 4 оценки в периода 4 – 24 април в каналите на $3.6 \mu\text{m}$ и $4.5 \mu\text{m}$. И четирите оценки са в интервалите $[3.6] = 12.79 - 12.99$ mag и $[4.5] = 12.80 - 13.15$ mag, с характерна грешка $\sigma_{[3.6]} = 0.08$ mag и $\sigma_{[4.5]} = 0.10$ mag. Цетовият индекс $[3.6] - [4.5] \approx 0$ е характерен за опашката на Рейли-Джийнс от чернотелно

излъчване.⁷ Поради това, може да се заключи, че около 20 април все още няма активно прахообразуване около обекта.

В периода юни-септември 2015 г. бяха извършени наблюдения в *JHK* филтри с инструмента NOTCam на NOT. Публикуваните данни в *JHK*, комбинирани с данни от предни телеграми, са представени на фиг. 13. На 1 юни $J-H = 1.48 \pm 0.11$ и $J-K_S = 3.05 \pm 0.11$, след което само за един ден и двата индекса се покачват с по ~ 0.3 mag. Тези стойности са по-високи и от NIR индексите на най-червените звезди. Това показва, че вече се е образувало значително количество прах: температурата на излъчващото тяло е $T < (1/\lambda_H) \times 2.9 \times 10^{-3}$ mK или под 1800 K. Тенденцията се запазва и цветовете продължават да почервяват. Поради активното прахообразуване яркостта в инфрачервения диапазон спада бавно – през септември 2015 г. все още $K_S < 16$.

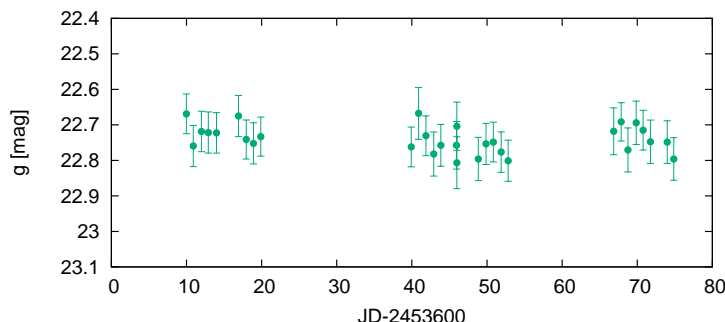
4.5 Прогенитор

Williams et al. (2015) измерват независимо яркостта на прогенитора по архивните кадри от HST от август 2004 г. и получават $F555W = 23.43 \pm 0.04$ mag и $F814W = 22.09 \pm 0.01$ mag (отговарящи грубо на *V* и *I*, съответно). Williams et al. не разглеждат възможността това да е случайна звезда от M31 в даденото направление, тъй като е на $\sim 0.01''$ от координатите на избухването (което съответства на до ~ 80000 AU тангенциално разстояние между проекциите). Те приемат значително по-ниска стойност за екстинкцията, $E_{B-V} = 0.12 \pm 0.06$ mag, единствено на базата на карти на праха в M31. Това води до оценка за абсолютната звездна величина и действителния цвят на прогенитора $M_V = -1.50 \pm 0.23$ mag и $(V-I)_0 = 1.05 \pm 0.15$ mag – характерни за масивен K-гигант.

В етапа, в който главната компонента не е обгърнала вторичната напълно, при немалък наклон на орбитата би трябвало да се наблюдават затъмнения като при V1309 Sco. С цел да се засече евентуалната променливост на прогенитора, бяха анализирани архивни кадри от инструмента MegaCam⁸ на CFHT, получени в периода август – октомври 2005 г. Машабът на изображението е $0.187''/\text{pix}$, а характерният атмосфернен сиинг – около 4 pix ($\sim 0.8''$). Беше извършена апертурна фотометрия с малък радиус на апертурата (3 pix

⁷В приближението на Рейли-Джийнс за червената част (опашката) на Планковата крива излъчването е $I_\lambda(T) \propto T$. При прилагането на закона на Погън сравняваме с Вега и коефициентите на пропорционалност (зависещи от λ) се съкращават. Така, в приближението, че звездите излъчват чернотелно, във филтри, много по-червени от максимума на излъчването звездните величини са еднакви и цветовете индекси – нулеви.

⁸<http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Imaging/Megacam/>



Фигура 14: Крива на блясъка на предполагаемия прогенитор на M31LRN 2015 в периода август – октомври 2005 г. Блясъкът е завишен изкуствено от паразитен сигнал на близки обекти.

или $\sim 0.6''$), тъй като обектът е слаб. Звездите за сравнение бяха рекалибрирани от Johnson-Cousins (Massey et al. 2006) в g , използвайки трансформацията за звезди, дадена от Jester et al. (2005):

$$g = V + 0.60(B - V) - 0.12. \quad (9)$$

Получената крива на блясъка (фиг. 14) не показва променливост в рамките на ~ 0.1 mag. Средната звездна величина за периода е $g = 22.74 \pm 0.05$ mag (грешката е изцяло от рекалибрирането от BV в g). Ако приемем, че действителната звездна величина на прогенитора (без паразитния сигнал от близки обекти) е $g < 24$ mag (оценено чрез горната трансформация), то потокът от него е поне 30% от измерения. Приемайки, че 30-те точки дават задоволително покритие по фаза, можем да ограничим реалната амплитуда на прогенитора на $A \lesssim 0.3$ mag. Този резултат не е публикуван.

5 Кандидати за звездно сливане

Архивните наблюдения на V1309 Sco предоставят уникалната възможност да се изследва процес на звездно сливане от финалния етап преди сливането (контактна двойна система, чиято орбита губи ъглов момент) към динамичната фаза (избухване на червена нова и последвалото обгръщане на системата в прах). Успешно предсказване на подобно явление би дало възможност за много по-детайлно изследване на прогенитора, както и на протичането на самия

процес. Чрез насочени фотометрични и спектрални изследвания ще могат да се определят основните параметри на прогенитора: маси на компонентите, фотосферна температура, голяма полуос на орбитата и др. Тези параметри ще могат да се обвържат с параметрите на самото избухване.

Липсва целенасочено изследване на тесни двойни системи, които са в последния еволюционен етап преди сливането. Такива системи могат да бъдат разглеждани в контекст на прогенитори на червени нови, така както катаклизмичните променливи се разглеждат като прогенитори на нови, а масивните звезди – на свръхнови. Поради това, изследването на системи в еволюционен етап, водещ до сливане, представлява интерес, дори и сливането да не е в обзиримо бъдеще. Това беше мотивация да се положат основите за търсене на системи в същия еволюционен етап като прогенитора на V1309 Sco.

5.1 Търсене на двойници на V1309 Sco

Прогениторът на V1309 Sco е контактна двойна, но с много особени параметри. Впечатление прави големият орбитален период ($P = 1.44$ d), нехарактерен за W UMa системите. Почти всички W UMa системи имат период в интервала $P = 0.2 - 0.9$ d и компонентите им в общия случай не са еволюирали. В същото време, фотометрията на прогенитора на V1309 Sco и оценката на разстоянието до системата предполагат, че главната компонента е K1/2-субгигант (Tylanda et al. 2011). Тъй като по-голям радиус спрямо нееволуираните звезди предполага и по-голяма голяма полуос на орбитата, големият орбитален период е в съгласие с тази оценка. Независимо дали загубата на ъглов момент в системата е била задействана от нестабилността на Дарвин или от влизане в дълбок контакт, причината би следвало да е еволюционното разширение на K-субгиганта.

За контактни двойни със сходна фотосферна температура и период като V1309 Sco може да се очаква, че главната компонента се разширява и ще обгърне изцяло вторичната. Поради това, сходна еволюция с V1309 Sco е немалко вероятна. С цел да се намерят евентуални прогенитори на червени нови, беше съставена селекция от такива контактни двойни. Резултатите са описани в статия (Kurtenkov 2016, *Searching for twins of the V1309 Sco progenitor system: a selection of long-period contact binaries*), приета за публикуване в том 26 на Bulgarian Astronomical Journal⁹ и са представени в Глава 5.1 на дисертацията.

През юни 2016 г. най-пълната и актуална база данни за променливи

⁹вж. <http://www.astro.bas.bg/AIJ/issues.html>

звезди, AAVSO VSX¹⁰, съдържаше 39640 променливи, класифицирани като затъмнително-двойни от тип W UMa. Селекцията беше извършена в интервала $1.1 < P < 1.8$ d, приблизително центриран спрямо периода на V1309 Sco. От всичките разглеждани 39640 W UMa системи 506 попадат в него. От тях 207 бяха идентифицирани в DR9¹¹ на каталога SDSS (Ahn et al. 2012). Идентификацията беше извършена чрез направена заявка към базата данни VizieR по списъка с екваториални координати на обектите от VSX.

Каталогът SDSS съдържа многоцветова фотометрия в широкоивичните филтри Sloan *ugriz*. Кадрите за дадена площадка са правени последователно в реда $r \rightarrow i \rightarrow u \rightarrow z \rightarrow g$, с интервал от 72 s между два съседни филтъра, така че максималното време между оценките в 2 различни филтъра за дадена площадка (времето от r до g) е ~ 5 min. Поради това, може да се приеме, че за променливи с период $P > 1$ d оценките в различните филтри са правени при една и съща фаза. Цветовете на променливите от тип W UMa се променят слабо с фазата. Основните причини са:

1) температурната разлика между компонентите (в различна фаза се наблюдава различна проекция на излъчващата площ на всяка компонента),

2) ефектът на гравитационно потъмнение поради различното гравитационно ускорение по излъчващата повърхност (от теоремата на фон Зайпел $T_{eff} \propto g^{1/4}$ (von Zeipel 1924)).

И двата ефекта са от порядъка на $\sim 10^2$ K, което позволява да се направи задоволителна оценка на фотосферната температура на W UMa система по фотометричните цветове, независимо от фазата по време на наблюдението.

Зависимостите цвят-температура, фитирани с полиноми от 3-та степен от Boyajian et al. (2013), бяха използвани за изчисляване на цветовете температури. По три цветови температури (T_{g-r} , T_{g-i} и T_{g-z}) бяха пресметнати за всеки от 207-те обекта. Фотосферната температура T_{eff} и статистическата грешка σ_T бяха пресметнати като средно аритметрично и на трите стойности и rms на разликите с T_{eff} , съответно. Резултатите са в интервала 3230 – 7560 K (медианна температура 5150 K), с медианна грешка $\sigma_T = 80$ K. От всички системи, 9 са извън цвят-температурния интервал на валидност на калибровките, 55 (26 % от всички) са с голяма грешка ($\sigma_T > 150$ K) и още 15 са на малки галактични ширини ($|b| > 20^\circ$), на които цвят-температурният експес, който не отчитаме, може да играе голяма роля. Резултатите за температурите на всички 128 системи са дадени в табл. 3 в приложението на дисертацията.

¹⁰Variable Star Index, <http://www.aavso.org/vsx/>

¹¹Data Release 9

В температурния интервал $T_{eff} = 4200 - 4800$ К попадат 23 системи, дадени в Табл. 5.2 в дисертацията. Тези температури са характерни за гиганти от класове K0III-K3III, а температурният интервал е центриран на оценката за V1309 Sco. Трябва да се отбележи, че цветовият ексцес е пренебрегнат в случая. За 15 от 23-те системи пълният цветови ексцес от галактичния прах по лъча на зрение е $E_{B-Vmax} < 0.07$ mag. По-подробно изследване на тези системи е препоръчително, за да се определи, доколко те са близки по параметри до V1309 Sco.

5.2 Контактни двойни със скъсяващ се период: системи от Kepler и OGLE

За да се предскаже звездно сливане в обозримо бъдеще, е необходим по-непосредствен метод. Към момента единственият такъв е изследването на ETV кривата¹² на затъмнително-двойни звезди. Това е времевата крива, по чиято ордината се нася стойността на $O - C$ ефекта¹³ за даден минимум. Стойностите на $O - C$ се изчисляват като разлика на наблюдавания момент на минимума и предсказания момент от

$$BJD = BJD_0 + kP_0, \quad (10)$$

където BJD е барицентричният юлиански ден, P_0 е изчисленият орбитален период, а k е цяло число (брой обиколки от минимума BJD_0 до BJD). Тъй като центърът на Слънцето е много близо до центъра на масите на Слънчевата система, хелиоцентричният юлиански ден HJD се различава от BJD с не повече от ~ 4 s и също може да бъде използван за целта.

В случай, че за дадена система се задействат описаните в Глава 2.6 механизми за загуба на ъглов момент, компонентите ще започнат да се доближават и орбиталният период ще започне да се скъсява. Това ще предизвика постепенно избързване на минимумите в кривата на блясъка. По ETV кривата може да се пресметне как се изменя орбиталният период $P(t)$ с времето, използвайки

$$\frac{dP}{dt} = P_0 \frac{d^2(O - C)}{dt^2}, \quad (11)$$

където P_0 е периодът, използван за изчисляване на минимумите. Очевидно, при $dP/dt = const$ ETV кривата е обърната парабола. Тъй като преди сливането орбиталният период се скъсява с ускорение, т.е. $d^2P/dt^2 < 0$, за система,

¹²Eclipse timing variations

¹³Observed–Computed

наблюдавана в този етап $d^3(O - C)/dt^3 < 0$. Както показват наблюденията на V1309 Sco, този ефект може да бъде засечен само в последните години преди сливането. Преди това той е много слаб и докато $d^2P/dt^2 \approx 0$, ETV кривата ще изглежда като обърната парабола.

Ефектите, които могат да повлияят ETV кривата, са систематизирани от Conroy et al. (2014) по следния начин:

- **Light Travel Time (LTT) ефект.** Поради наличие на трето тяло в системата затъмнително-двойната обикаля около общия център на масите и светлината трябва да измине различен път до наблюдателя за различните минимума. Това поражда строго периодични промени в ETV кривата.
- **Система от 3 тела с нейерархична структура.** Третото тяло пертурбира движението на компонентите на затъмнително-двойната една спрямо друга и реално изменя орбиталния им период.
- **Пренос на маса между двете компоненти.** От закона за запазване на момента на импулса преносът на маса променя орбиталния период.
- **Ефект на Апългейт.** При системи с магнитно активна компонента се пренася ъглов момент между околоосното и орбиталното въртене на компонентите. В следствие, периодът може да се измени с до $\sim 10^{-5}P$ (Applegate 1992).
- **Прецесия на апсидната ос.** При системи със значителен ексцентрицитет прецесията на апсидната ос може да създаде ETV, въпреки че орбиталният период остава непроменен.
- **Паразитни сигнали.** Например, температурните петна, които не се движат коротационно, изместват моментите на минимумите по различен начин, създавайки ETV.

Най-точните данни за построяване на ETV криви досега са тези от мисията Kepler (Borucki et al. 2010). ETV кривите на 1279 затъмнително-двойни от Kepler са анализирани от Conroy et al. (2014) с цел да се изследват тройни системи по LTT ефекта. Освен системите със строго периодични ETV криви, авторите съобщават и за 31 с параболични ETV криви за целия наблюдателен период от ~ 1400 d. Те може да са тройни системи с период на третата компонента $P \gg 1400$ d, но е възможно и техните ETV да са породени от пренос на маса или от загуба на орбитален ъглов момент. Сред тези системи, потенциални кандидати за звездно сливане могат да са само такива с W UMa криви на

блясъка и $d^2(O - C)/dt^2 < 0$ (обърната парабола в ETV кривата). По визуални признаци беше извършена класификация на кривите на блясъка и определяне на знака на $d^2(O - C)/dt^2$ за всички 31 системи. За целта бяха използвани визуализираните данни на уебсайта на каталога¹⁴. Резултатите са представени в табл. 5.3 в дисертацията.

Само две системи бяха определени като контактни двойни с отрицателна втора производна на $O - C$:

- KIC 9840412 ($BJD_0 = 2454954.556807$, $P_0 = 0.87845(58 \pm 9)$ d)
- KIC 10292413 ($BJD_0 = 2454954.202209$, $P_0 = 0.55915(88 \pm 4)$ d).

Кривите на блясъка и ETV кривите на двете системи са представени във фиг. 5.2 в дисертацията. Възможно е KIC 10292413 да е елипсоидална променлива, тъй като променливите от тип W UMa с криви на блясъка, подобни на синусоиди и неголеми амплитуди, трудно могат да бъдат различени от елипсоидални променливи без допълнителни (напр. спектрални) наблюдения. ETV кривите бяха фитирани с параболи, вторите производни бяха пресметнати и чрез уравнение 11 беше пресметнат темпът на промяна на периода за двете системи: $dP/dt = -1.196 \pm 0.003 \times 10^{-5}$ d/yr за KIC 9840412 и $-2.737 \pm 0.089 \times 10^{-7}$ d/yr за KIC 10292413.

Друг надежден източник на дълговременни оптични изследвания на затъмнително-двойни е гореспоменатия експеримент OGLE. Промените в периодите на 569 контактни двойни в полетата на OGLE са анализирани от Kubiak et al. (2006). Авторите оценяват статистическата грешка в изчисляването на dP/dt на 2.3×10^{-7} d/yr. Всичките 14 системи с $P > 0.8$ d и $dP/dt < -2.3 \times 10^{-7}$ d/yr бяха селектирани и са представени в табл. 5.4 в дисертацията. Пресметнатите стойности за dP/dt са доста интересни: забелязва се, че двете системи с най-бърз спад в периода имат големи периоди – съответно 1.36 d и 1.70 d. По-нататъшното изследване на тези системи би било доста трудно спрямо системите от Kepler. Обектите от OGLE са значително по-слаби и са в гъсти полета близо до галактичния център.

Броят на известните затъмнително-двойни и наличните наблюдателни данни за тях все още са недостатъчни, за да се търсят систематично прогенитори на червени нови. Все пак, вече могат да се правят извадки от контактни двойни с еволюирала компонента или от такива с намаляващ орбитален период. Индивидуалното изследване на тези системи може да доведе до силен кандидат за звездно сливане. Очаква се настоящи и бъдещи мисии като Gaia и LSST да открият милиони затъмнително-двойни (Prša et al. 2011, например). Така

¹⁴<http://keplerebs.villanova.edu/>

извадките, от които ще се търсят кандидати за звездно сливане, може да се увеличат с $\sim 10^2$ пъти в следващото десетилетие.

5.3 KIC 9832227

Първият и единствен досега опит за предсказване на избухване на червена нова беше направен през 2015 г. Обектът, KIC 9832227 (= NSVS 5597755, $\alpha_{J2000} = 19^h 29^m 15^s.9$, $\delta_{J2000} = +46^\circ 37' 19''$) е затъмнително-двойна от тип W UMa, с орбитален период $P \approx 0.46$ d и амплитуда $A \approx 0.2$ mag. Намира се в оригиналното поле на Kepler, а преди това е наблюдаван и в рамките на обзорите за променливост NSVS и ASAS. Molnar et al. (2015) интерпретират ETV кривата като експоненциално намаляване на орбиталния период от вида

$$P = P_0 \exp\left(\frac{\tau}{t - t_0}\right), \quad (12)$$

подобно на получената зависимост за V1309 Sco от Tytenda et al. (2011). Въз основа на това, Molnar et al. (2015) предсказват, че компонентите на системата ще се слоят и тя ще произведе избухване на червена нова между 2019 и 2022 г.

Моменти на минимумите и $O - C$ ефект

През есента на 2015 г. в сътрудничество с Велимир Попов беше организирана кратка наблюдателна кампания от България. Фотометрични наблюдения бяха извършени в 11 нощи през ноември 2015 г. с 30 cm телескоп IRIDA-South¹⁵, разположен на територията на НАО Рожен. Телескопът е снабден с фокален редуктор и CCD камера АТИК 4000М. Ефективното фокусно разстояние е $F = 1.5$ m, зрителното поле е с размер $38' \times 38'$ и мащабът на изображението е $1.04''/\text{pixel}$.

Основна цел на фотометричните наблюдения беше да се получат точни моменти на наблюдаваните минимуми и по тях да се пресметне $O - C$ ефектът спрямо ефемеридите от Kepler. За мониторинга беше избран Johnson V филтър. В последните две наблюдателни нощи бяха извършени едновременни наблюдения в Johnson B и V (в ред $BVBVBV\dots$), за да се получи и информация за цвета на обекта. Обектът беше наблюдаван в 11 нощи през ноември 2015 г.

За да се премине от относителни в реални звездни величини бяха използвани 10 вторични стандарта от каталога AAVSO Photometric All Sky Survey (APASS) (Henden & Munari 2014). Получената фотометрична калибровка е с

¹⁵вж. <http://www.irida-observatory.org/>

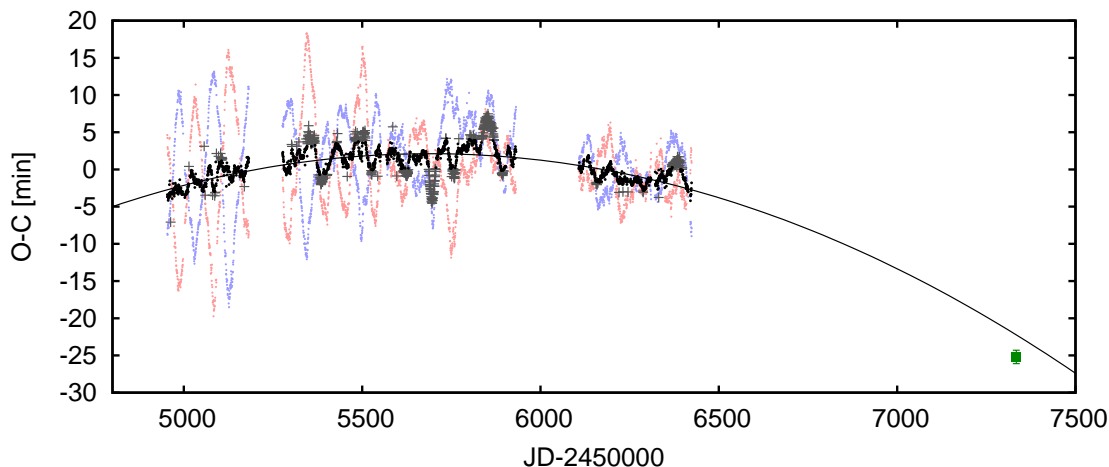
$rms(B_{ins1} - B_{ins2}) = 0.010 \text{ mag}$ и $rms(V_{ins1} - V_{ins2}) = 0.003 \text{ mag}$. Получената крива на блясъка във V е фазирана, използвайки ефемеридите от Kepler: $BJD_0 = 2454953.951368$, $P_0 = 0.4579485 \text{ d}$ (Slawson et al. 2011). На фиг. 5.3 в дисертацията е представена фазираната крива на блясъка във V , заедно с фазираните криви на блясъка от Kepler в целия спектър от $4300 - 8600 \text{ \AA}$. Забелязва се, че нивата на екстремумите и цялостната форма на кривата на блясъка се изменят постепенно. Това обяснява и различните нива на регистрираните екстремуми през ноември 2015 г. Ефектът най-вероятно е породен от некоротационно движение на петна по фотосферата на контактната двойна. Това оказва влияние и на ETV кривата – петната изместват главния и вторичния минимум, обикновено в различни посоки. Това придава допълнителна важност на усредняването на ETV за двата минимума (фиг. 5.2 в дисертацията).

Бяха регистрирани общо 3 главни и 2 вторични минимума. За изчисляване на точните моменти минимумите бяха фитирани с полиноми от 2-ра и от 4-та степен (фиг. 5.4). Ефемеридите от Kepler бяха използвани за изчисляване на стойностите на $O - C$ ефекта за всеки минимум. Моментите на минимумите и съответстващите им $O - C$ стойности, получени с полиномиалните фитове от 2-ра и 4-та степен, са представен в табл. 3. Получената средна стойност за двата минимума, по двата метода, е $O - C = -25.2 \pm 0.9 \text{ min}$ – стойността, която нанасяме на усреднената ETV крива.

Таблица 3: Изчислените моменти на минимума на KIC 9872223 и съответните $O - C$ стойности спрямо ефемеридите от Kepler. Наблюдателните данни са фитирани с полиноми от 2-ра (pol2) и 4-та (pol4) степен.

минимум	t_{min} (pol2)	$(O - C)$ (pol2)	t_{min} (pol4)	$(O - C)$ (pol4)
	$JD - 2457300$	[min]	$JD - 2457300$	[min]
главен	30.22955	-23.88	30.22996	-23.18
вторичен	32.28920	-25.49	32.28939	-25.11
главен	34.34982	-25.70	34.34911	-26.72
вторичен	38.24141	-27.10	38.24094	-27.69
главен	40.30560	-22.17	40.30515	-22.86

ETV кривите от Kepler (фиг. 15) са доминирани от нискочестотни вариации (с характерно време $\sim 100 \text{ d}$), вероятно породени от несинхронизираните петна. Те пораждат видима антикорелация между $O - C$ стойностите на главните и вторичните минимума. Усредняването на стойностите за главните и вторичните минимума изглажда ETV кривата и параболичната ѝ форма става видима. Тази усреднена ETV крива беше фитирана с парабола. Около 21% от фитираните точки бяха отхвърлени като outlier-и и останалите бяха фитирани



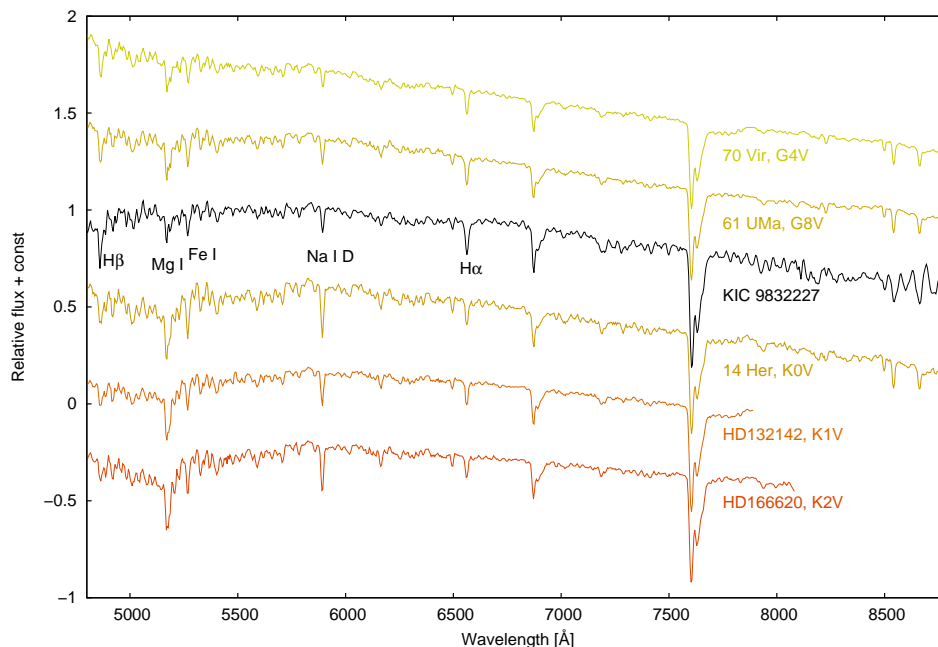
Фигура 15: ETV крива на KIC 9832227. Данните от Kepler са изобразени вляво. Стойностите на $O - C$ ефекта за главните (бледосини кръгове) и вторичните (бледочервени кръгове) минимуми се различават значително – забелязва се силна антикорелация, вероятно породена от магнитната активност. Усреднената ETV крива (черни кръгове) е значително по-гладка. Тя беше фитирана с парабол след отстраняване на outlier-и (точките, отдалечени от фита, сиви кръстчета). Екстраполирайки до $JD=2457334$, параболата надвишава получената $O - C$ стойност (зеления квадрат долу вдясно). Това е в съответствие с хипотезата, че орбиталният период се съксява с ускорение. Изпратено за публикуване в *Astronomische Nachrichten* (Kurtenkov & Popov 2016).

отново. Вторият параболичен фит (фиг. 15) е с rms от 1.0 min и по формула 11 дава темп на промяна на периода $dP/dt = -2.11 \pm 0.03 \times 10^{-6}$ d/yr (в случай, че ЛТТ ефектът е пренебрежим). Екстраполирайки параболата до $JD = 2457334$ (средна стойност за регистрираните 5 минимума през ноември 2015 г.) се получава очаквана стойност на избързване на минимумите $O - C = -22.6 \pm 0.5$ min. Наблюдаваната стойност $O - C = -25.2 \pm 0.9$ min е значително по-ниска ($c > 2.5\sigma$), което отхвърля възможността наблюдаваният ефект да е породен единствено от пренос на маса между компонентите, тъй като в този случай би се наблюдавала параболична ETV крива. Резултатът е в съгласие с хипотезата на Molnar et al. (2015), но не е достатъчен, за да се отхвърли друга възможност – ЛТТ ефектът.

В случай, че маргиналната $O - C$ вариация е породена от ЛТТ ефект от трета компонента, можем да поставим долна граница за нейния орбитален период. Чрез синусоидални фитове на ETV кривата беше поставено ограничение $P \gtrsim 17$ yr. Ако приемем, че общата маса на затъмнително-двойната е в интервала $1.0 - 3.0 M_{\odot}$, характерен за системите от тип W UMa, за голямата полюс можем да поставим ограничението $a \gtrsim 7$ AU (от III Закон на Кеплер). Ако $O - C$

стойностите продължат да намаляват с ускорение, органиченията за параметрите на системата, наложени при ЛТТ хипотезата ще стават все по-строги в предстоящите години.

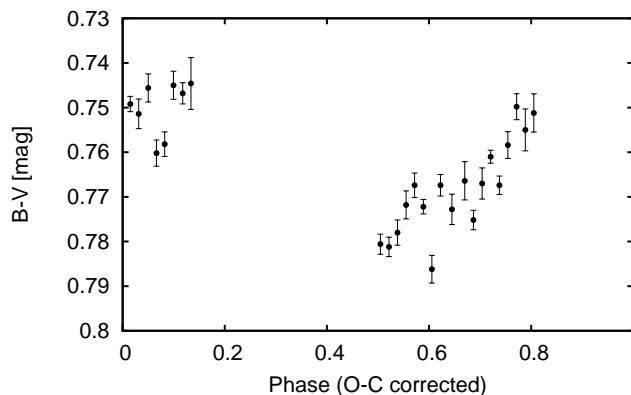
Спектроскопия и цвeтова температура



Фигура 16: Спектърът на KIC 9832227 от 2mRCC, сравнен с примерни спектри от библиотеката STELIB. Спектрите от STELIB са отместени вертикално за визуализация и са с изкуствено занижени мащаб и резолюция (с процедурите DISPCOR и GAUSS). Калибровката в относителен поток не е надеждна при $\lambda < 5000 \text{ \AA}$. При големи дължини на вълната ($\lambda > 7500 \text{ \AA}$) спектърът е замърсен от фринджинг. Видно е, че абсорбционната ивица на TiO при $\sim 5000 - 5250 \text{ \AA}$ не присъства в спектърта. Изпратено за публикуване в *Astronomische Nachrichten* (Kurtenkov & Popov 2016).

Спектър на KIC 9832227 беше получен с фокалния редуктор FoReRo2 на 2mRCC на НАО Рожен на 5 декември 2015, при реалната фаза в интервала 0.83 – 0.87. Полученият спектър (фиг. 16) е типичен за звезда от спектрален клас G. Бяха идентифицирани силните абсорбционните линии на $H\alpha$, $H\beta$, Na I D 5890 \AA , триплета на Mg I, както и Fe I 5270 \AA . Не бяха детектирани слабите TiO абсорбционни ивици налични при звездите от клас K. Няма засечени емисионни линии. Сравнение с примерни спектри от библиотеката STELIB (Le Borgne et al. 2003) показва най-добро съвпадение със спектрален клас $G8 \pm 1$. Все пак, тази класификация до голяма степен се базира на формата на континуума. Не се забелязват видими деформации на спектърта от трета светлина, така че ако

трета компонента поражда ЛГТ ефекта, тя е или много слаба, или може да се очаква също да е G звезда.



Фигура 17: Бинирана и фазирана крива на $B - V$ индекса на KIC 9832227 по фотометрични данни от 14 и 17 ноември 2015 г. Цветовете са характерни за G8V звезда. Изпратено за публикуване в *Astronomische Nachrichten* (Kurtenkov & Popov 2016).

Фотометричните наблюдения на 14 и 17 ноември 2015 г. са извършени едновременно във филтри B и V . По тях беше построена крива на цветовия индекс, обхващаща значителна част от фазовия интервал (фиг. 17). Пресметнатият $B - V$ индекс варира между 0.74 и 0.78 mag. Непочервененият цвят също е в съответствие със спектрален клас G8-9V. Сумарното почервяване от праха в галактиката по лъча на зрение в тази посока е $E(B - V) = 0.08$ mag. Взимайки го в предвид, и на базата на фотометричните и спектралните данни, можем да оценим фотосферната температура на $T_{eff} = 5400_{-100}^{+300}$ K. Резултатът е по-нисък от оценката на (Pinsonneault et al. 2012) от 5854 K, включена в Kepler Input Catalog.

На този етап природата на KIC 9832227 все още не може да се определи еднозначно, но по всичко личи, че вече има сериозен кандидат за звездно сливане. Проследяването на ETV кривата в близко бъдеще ще е ключово за разгадаването на този обект. Всички оригинални резултати, представени в Глава 5.3 са описани и интерпретирани в ръкопис, изпратен за публикуване в *Astronomische Nachrichten* (*The stellar merger progenitor candidate KIC 9832227: observations in late 2015*, Kurtenkov & Popov, AN submitted).

6 Научни приноси на дисертанта

Научните приноси на дисертанта по темата на настоящата работа са включени в Глави 3, 4 и 5.

В групата за изследване на нови в М31 (Глава 3) ролята на дисертанта е второстепенна. В периода 2013-2016 г. тя включва основно наблюдателно планиране и извършване на фотометрични наблюдения с телескопите на НАО Рожен и САО Плана, а в някои случаи и работа по оформяне на публикацията – вкл. и за Ovcharov et al. (2014b, *VlgAJ*, 21, 19). В отделни, редки случаи дисертантът е извършвал фотометрична обработка и интерпретация на наблюдаваното явление. С участие на дисертанта са публикувани фотометрични наблюдения на 19 кандидата за нови в М31 (отбелязаните с “+” в табл. 1 в приложението на дисертацията).

За изследването на червената нова M31LRN 2015 (Глава 4) ролята на дисертанта е водеща. Тя включва:

- Фотометрични и спектрални наблюдения на обекта с 2mRCC.
- Организиране на оптичния мониторинг, описан в Глава 4.2, и наблюдателно планиране (подбор на експозиции, филтри, гризми) посредством лична кореспонденция с множество наблюдатели (с над 200 получени и изпратени e-mail-a в периода януари-март 2015 г.).
- Редукция на някои от фотометричните и спектралните наблюдения, както е описано в Глава 4.2.
- Извършване на цялата астрометрия и фотометрия в оптичния диапазон, описани в Глава 4.2, по 160 кадъра в *BVRI* филтри от девет телескопа. Интерпретация на кривите на блясъка и цветовите индекси и оценка на времената t_2 в *BVR* филтри.
- Предварителната обработка на спектрите от GTC за изготвяне на ATel#7150.
- Участие в дискусията за цветовия ексцес и спектралната класификация. Изготвяне на фигурите, съдържащи резултати от спектралните наблюдения, с отчитане на оценените цветови ексцес.
- Оценяване на светимостта на M31LRN 2015 по време на оптичния максимум (секция 4.2.4).

- Участие в планирането на наблюденията в NIR диапазона, представени в Глава 4.3.
- Апертурната фотометрия на прогенитора (в края на Глава 4.4).

В резултат на тази работа е съобщено първото наблюдение на червена нова в M31 от 26 години насам. M31LRN 2015 вече е една от малкото добре изследвани червени нови – с добре известна спектрална еволюция, характерна за класа, оценка за светимостта, регистриран инфрачервен експес и предполагаем прогенитор. На базата на оптичния мониторинг, описан от Kurtenkov et al. (2015c, A&A, 578, L10), е изготвен моделът за сливане на MacLeod et al. (2016). Данни от мониторинга са използвани и в теоретичното изследване на Pejcha et al. (2016).

Всички представени оригинални резултати в Глава 5 са с водещо участие на дисертанта. В Глава 5.1 е направен опит за селекция на контактни двойни системи със сходни наблюдателни параметри (температура, период) на V1309 Sco. В Глава 5.2 са селектирани контактни двойни, които вероятно са с намаляващ орбитален период. За системите, селектирани в секции 5.1 и 5.2 са необходими допълнителни наблюдения, за да се потвърди или отхвърли възможността да са в еволюционен стадий непосредствено преди сливане. Резултатите и дискусията са приети за публикуване в том 26 на BlgAJ (Kurtenkov 2016). Секция 5.3 е посветена на най-вероятния кандидат за сливане – KIC 9832227. Представените фотометрични наблюдения (~ 3100 кадъра в B и V) са извършени от В. Попов, а обработката и анализа им, както и спектралните наблюдения, са извършени от дисертанта. В резултат от тях е измерена стойността на $O - C$ през ноември 2015 г., която потвърждава, че първата и втората производна на $O - C$ са отрицателни. Това показва, че стационарен пренос на материя между компонентите не може да обясни наблюденията. В случай, че ефектът е породен от движение около общ център на масите с трето тяло, са поставени груби ограничения за орбитата му. Оценена е и фотосферната температура на контактната двойна. Резултатите са изпратени за публикуване в *Astronomische Nachrichten*.

Литература

- Adams, S., Kochanek, C. S., Dong, S., & Wagner, R. M. 2015a, *The Astronomer's Telegram*, 7468
- Adams, S., Kochanek, C. S., Dong, S., & Wagner, R. M. 2015b, *The Astronomer's Telegram*, 7485
- Afanasiev, V. L. & Moiseev, A. V. 2005, *Astronomy Letters*, 31, 194
- Ahn, C. P., Alexandroff, R., Allende Prieto, C., et al. 2012, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 203, 21
- Applegate, J. H. 1992, *The Astrophysical Journal*, 385, 621
- Azimlu, M., Marciniak, R., & Barmby, P. 2011, *The Astronomical Journal*, 142, 139
- Binnendijk, L. 1970, *Vistas in Astronomy*, 12, 217
- Bond, H. E., Henden, A., Levay, Z. G., et al. 2003, *Nature*, 422, 405
- Borucki, W. J., Koch, D., Basri, G., et al. 2010, *Science*, 327, 977
- Boschi, F. & Munari, U. 2004, *Astronomy & Astrophysics*, 418, 869
- Boyajian, T. S., von Braun, K., van Belle, G., et al. 2013, *The Astrophysical Journal*, 771, 40
- Сера, J. 1998, *Astrophysics and Space Science*, 263, 369
- Conroy, K. E., Prša, A., Stassun, K. G., et al. 2014, *The Astronomical Journal*, 147, 45
- Eggleton, P. P. 1983, *The Astrophysical Journal*, 268, 368
- Evans, A., Geballe, T. R., Rushton, M. T., et al. 2003, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 343, 1054
- Fabrika, S., Barsukova, E. A., Valeev, A. F., et al. 2015, *The Astronomer's Telegram*, 6985
- Gazeas, K. D. & Niarchos, P. G. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 370, L29
- Geier, S. & Pessev, P. 2015, *The Astronomer's Telegram*, 8220
- Hamuy, M., Suntzeff, N. B., Heathcote, S. R., et al. 1994, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 106, 566
- Hamuy, M., Walker, A. R., Suntzeff, N. B., et al. 1992, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 104, 533
- Henden, A. & Munari, U. 2014, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 43, 518
- Huemmerich, S. & Bernhard, K. 2012, *Peremennye Zvezdy Prilozhenie*, 12
- Jester, S., Schneider, D. P., Richards, G. T., et al. 2005, *The Astronomical Journal*, 130, 873

- Jockers, K., Credner, T., Bonev, T., et al. 2000, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel Supplement*, 3, 13
- Kasliwal, M. M., Kulkarni, S. R., Arcavi, I., et al. 2011, *The Astrophysical Journal*, 730, 134
- Kopal, Z. 1955, *Annales d'Astrophysique*, 18, 379
- Kubiak, M., Udalski, A., & Szymanski, M. K. 2006, *Acta Astronomica*, 56, 253
- Kulkarni, S. R., Ofek, E. O., Rau, A., et al. 2007, *Nature*, 447, 458
- Kurtenkov, A. 2016, ArXiv e-prints [1609.06595]
- Kurtenkov, A., Ovcharov, E., Nedialkov, P., et al. 2015a, *The Astronomer's Telegram*, 6941
- Kurtenkov, A., Tomov, T., Fabrika, S., et al. 2015b, *The Astronomer's Telegram*, 7150
- Kurtenkov, A. A., Pessev, P., Tomov, T., et al. 2015c, *Astronomy & Astrophysics*, 578, L10
- Le Borgne, J.-F., Bruzual, G., Pelló, R., et al. 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 402, 433
- Li, L. & Zhang, F. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 369, 2001
- Lipunov, V., Kornilov, V., Gorbovskoy, E., et al. 2010, *Advances in Astronomy*, 2010, 349171
- MacLeod, M., Macias, P., Ramirez-Ruiz, E., et al. 2016, ArXiv e-prints [1605.01493]
- Magnier, E. A., Lewin, W. H. G., van Paradijs, J., et al. 1992, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 96, 379
- Martini, P., Wagner, R. M., Tomaney, A., et al. 1999, *The Astronomical Journal*, 118, 1034
- Mason, E., Diaz, M., Williams, R. E., Preston, G., & Bensby, T. 2010, *Astronomy & Astrophysics*, 516, A108
- Massey, P., Olsen, K. A. G., Hodge, P. W., et al. 2006, *The Astronomical Journal*, 131, 2478
- Molnar, L. A., Van Noord, D. M., Steenwyk, S. D., Spedden, C. J., & Kinemuchi, K. 2015, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, Vol. 225, American Astronomical Society Meeting Abstracts, 415.05
- Mould, J., Cohen, J., Graham, J. R., et al. 1990, *The Astrophysical Journal Letters*, 353, L35
- Munari, U. & Henden, A. 2005, in *American Institute of Physics Conference Series*, Vol. 797, *Interacting Binaries: Accretion, Evolution, and Outcomes*, ed. L. Burderi, L. A. Antonelli, F. D'Antona, T. di Salvo, G. L. Israel, L. Piersanti, A. Tornambè, & O. Straniero, 331–336
- Munari, U., Henden, A., Kiyota, S., et al. 2002, *Astronomy & Astrophysics*, 389, L51
- Oke, J. B. 1990, *The Astronomical Journal*, 99, 1621
- Ovcharov, E., Enikova, P., Kurtenkov, A., et al. 2013a, *The Astronomer's Telegram*, 5569

- Ovcharov, E., Kostov, A., Kurtenkov, A., Valcheva, A., & Nedialkov, P. 2015a, *The Astronomer's Telegram*, 7065
- Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Bozhilov, V., et al. 2015b, *The Astronomer's Telegram*, 8071
- Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Enikova, P., et al. 2013b, *The Astronomer's Telegram*, 5558
- Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Nikolov, G., et al. 2013c, *The Astronomer's Telegram*, 5475
- Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Valcheva, A., & Nedialkov, P. 2014a, *The Astronomer's Telegram*, 6689
- Ovcharov, E., Kurtenkov, A., Valcheva, A., & Nedialkov, P. 2015c, *The Astronomer's Telegram*, 6924
- Ovcharov, E., Minev, M., Kurtenkov, A., Nedialkov, P., & Valcheva, A. 2015d, *The Astronomer's Telegram*, 7564
- Ovcharov, E., Minev, M., Kurtenkov, A., Nedialkov, P., & Valcheva, A. 2015e, *The Astronomer's Telegram*, 7586
- Ovcharov, E. P., Kurtenkov, A., Metodieva, Y., et al. 2014b, *Bulgarian Astronomical Journal*, 21, 19
- Paczynski, B. 1976, in *IAU Symposium, Vol. 73, Structure and Evolution of Close Binary Systems*, ed. P. Eggleton, S. Mitton, & J. Whelan, 75
- Pejcha, O., Metzger, B. D., & Tomida, K. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455, 4351
- Peshev, P., Geier, S., Kurtenkov, A., Nielsen, L. D., & Tomov, T. 2015a, *The Astronomer's Telegram*, 7272
- Peshev, P., Geier, S., Stritzinger, M., Kurtenkov, A., & Tomov, T. 2015b, *The Astronomer's Telegram*, 8059
- Peshev, P., Geier, S., Stritzinger, M., Kurtenkov, A., & Tomov, T. 2015c, *The Astronomer's Telegram*, 7624
- Pinsonneault, M. H., An, D., Molenda-Żakowicz, J., et al. 2012, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 199, 30
- Podsiadlowski, P. 2001, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 229, Evolution of Binary and Multiple Star Systems*, ed. P. Podsiadlowski, S. Rappaport, A. R. King, F. D'Antona, & L. Burderi, 239
- Prša, A., Pepper, J., & Stassun, K. G. 2011, *The Astronomical Journal*, 142, 52
- Rasio, F. A. 1995, *The Astrophysical Journal Letters*, 444, L41
- Rich, R. M., Mould, J., Picard, A., Frogel, J. A., & Davies, R. 1989, *The Astrophysical Journal Letters*, 341, L51

- Roeser, S., Demleitner, M., & Schilbach, E. 2010, *The Astronomical Journal*, 139, 2440
- Schlafly, E. F. & Finkbeiner, D. P. 2011, *The Astrophysical Journal*, 737, 103
- Shporer, A., Brown, T., Lister, T., et al. 2011, in *IAU Symposium*, Vol. 276, *The Astrophysics of Planetary Systems: Formation, Structure, and Dynamical Evolution*, ed. A. Sozzetti, M. G. Lattanzi, & A. P. Boss, 553–555
- Shumkov, V., Lipunov, V., Gorbovskoy, E., et al. 2015, *The Astronomer's Telegram*, 6911
- Slawson, R. W., Prša, A., Welsh, W. F., et al. 2011, *The Astronomical Journal*, 142, 160
- Soker, N. & Kashi, A. 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462, 217
- Sparks, W. B., Bond, H. E., Cracraft, M., et al. 2008, *The Astronomical Journal*, 135, 605
- Srivastava, M., Ashok, N. M., Banerjee, D. P. K., & Venkataraman, V. 2015, *The Astronomer's Telegram*, 7236
- Tylenda, R. 2005, *Astronomy & Astrophysics*, 436, 1009
- Tylenda, R., Hajduk, M., Kamiński, T., et al. 2011, *Astronomy & Astrophysics*, 528, A114
- Tylenda, R. & Soker, N. 2006, *Astronomy & Astrophysics*, 451, 223
- Udalski, A. 2003, *Acta Astronomica*, 53, 291
- Valcheva, A., Kurtenkov, A., Ovcharov, E., et al. 2016a, *The Astronomer's Telegram*, 9559
- Valcheva, A., Kurtenkov, A., Ovcharov, E., et al. 2016b, *The Astronomer's Telegram*, 9264
- Valcheva, A., Ovcharov, E. P., & Nedialkov, P. 2010, *Publications de l'Observatoire Astronomique de Beograd*, 90, 187
- von Zeipel, H. 1924, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 84, 665
- Webbink, R. F. 1976, *The Astrophysical Journal*, 209, 829
- Williams, S. C., Darnley, M. J., Bode, M. F., & Steele, I. A. 2015, *The Astrophysical Journal Letters*, 805, L18
- Worthey, G. & Lee, H.-c. 2011, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 193, 1