

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
Волкова Игоря Михайловича
на тему «Исследование затменных систем с эллиптическими орбитами»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия**

Диссертация Игоря Михайловича Волкова посвящена комплексному изучению физических свойств более сотни звезд, являющихся компонентами затменных систем с эллиптическими орбитами. Именно исследования таких систем позволяют с максимальной точностью определить основные физические параметры звезд самых различных масс и светимостей. В свою очередь, знание точных физических параметров представительной выборки звезд различных масс, светимостей и возрастов позволяет проверить и ограничить различные модели звездной эволюции и в конечном счете построить общую теорию происхождения и эволюции звезд. В связи с этим, совместный анализ спектральных данных и длительных высокоточных многополосных фотометрических наблюдений представительной выборки затменных систем с эллиптическими орбитами, представленный в диссертации, обеспечивает **актуальность** избранной темы диссертации.

Диссертация структурно состоит из Введения, семи глав, Заключения и Списка литературы. Во **Введении** описана краткая история начала исследований затменных звездных систем, обоснована актуальность изучения затменных систем с эллиптическими орбитами, сформулированы основные цели исследования таких систем, приведен список решенных научных задач, описаны методы наблюдений и обработки данных, приведены девять положений, выносимых на защиту, отмечена научная новизна, определены теоретическая и практическая значимость, подробно обсуждена степень достоверности полученных результатов.

Обсуждая содержание отдельных глав, позволю себе одновременно делать замечания. В частности, во Введении (в разделе Краткое содержание, структура и объем диссертации) неверно указан общий объем диссертации

(229 вместо 239 страниц) и количество литературных ссылок (161 вместо 164).

В первой главе под названием «История исследований затменных звезд», сделан акцент на обнаружении и основных возможных интерпретациях эффекта аномального апсидального движения в эллиптических затменных системах DI Her и AS Cam. Автор отмечает, что для объяснения этого эффекта необходимо использовать качественные, однородные и продолжительные фотометрические наблюдения представительной выборки затменных систем с эллиптическими орбитами. Именно такие фотометрические наблюдения и были осуществлены автором на различных обсерваториях, таких как Тянь-Шанская обсерватория ГАИШ, Крымская наблюдательная станция ГАИШ, Симеизская обсерватория ИНАСАН и др.

Вторая глава, «Методы наблюдений», полностью посвящена особенностям процедуры широкополосных фотометрических измерений, выполненных с различным навесным оборудованием на различных инструментах и обсерваториях, учету влияния воздушной массы и изменяемости прозрачности атмосферы, редукации инструментальных наблюдений к стандартной фотометрической системе, исследованию характеристик приемной аппаратуры и некоторым дополнительным подходам, которые позволяют повысить точность результирующих оценок блеска исследуемых объектов до нескольких тысячных долей звездной величины. Особенно впечатляет процедура повышения точности результирующих оценок блеска с учетом небольших систематических сдвигов, которые имеют место быть от ночи к ночи (или от одного сета к другому) даже в случае космических наблюдений TESS, и которую диссертант именуется процедурой «ночных поправок». Хотелось бы сделать два небольших уточнения. На стр. 46 автор утверждает, что «Метод многоцветной фотометрии является наиболее грубым методом спектральных наблюдений». С этим высказыванием можно согласиться только отчасти,

если речь идет исключительно о форме континуума спектра. Современные спектральные наблюдения высокого разрешения в первую очередь нацелены на исследования профилей различных спектральных линий, измерение их эквивалентных ширин и лучевых скоростей. Измерения таких параметров спектральных линий широкополосная фотометрия обеспечить не может. На стр. 50 автор использует в уравнении перехода от инструментальной фотометрической системы к стандартной показатель цвета $B-V$ и утверждает, что другие показатели цвета для таких преобразований использовать нет смысла, так как «... *никаких преимуществ это не дает*». Такое утверждение справедливо только отчасти, когда идет речь относительно классической фотометрии с использованием различных ФЭУ. Применение для фотометрии современных ПЗС приемников показало, что большинство любительских и полупрофессиональных матриц (которые чаще всего используются наших обсерваториях) имеют низкую чувствительность в полосе B по сравнению с такими полосами как V или R . По этой причине, фактическая точность ПЗС-измерений показателя цвета $B-V$ всегда хуже, чем точность измерений показателя цвета $V-R$ или $V-I$. С учетом этого, при использовании ПЗС-наблюдений для определения коэффициентов редукции к стандартной системе или для вычисления абсолютных звездных величин (U, B, V, R, I) исследуемых объектов (слабее 12 звездной величины) в соответствующих формулах лучше использовать показатель цвета $V-R$ или $V-I$.

В третьей главе под названием «Математический аппарат», описаны основные математические формулы и вычислительные процедуры, которые автор использовал в данном исследовании. В частности, обсуждаются: зависимость угловой скорости вращения линии апсид от приливной и вращательной деформации компонент двойной системы, релятивистский вклад во вращение линии апсид для массивных звезд, метод решения кривых блеска, формулы для расчета апсидального движения и орбиты третьего тела. В этой главе уделено значительное внимание сравнению результатов определения звездной массы по кривой лучевых скоростей и с помощью

косвенного метода, когда для оценки массы используются температуры и относительные размеры компонентов.

Четвертая глава, «Физические характеристики звезд», содержит информацию о физических параметрах исследованных звезд, которые входят в 61 затненную систему с эллиптическими орбитами и об основных орбитальных параметрах этих систем, вычисленных в результате решений фотометрических кривых блеска. Отмечается, что для 6 систем впервые получены высокоточные многоцветные кривые блеска, а для 29 систем впервые измерена скорость апсидального вращения. Далее автор обсуждает наиболее интересные затненные системы и разделяет их на несколько категорий: системы, которые позволяют исследовать внутреннее строение звезд, системы с преобладающим релятивистским вкладом в апсидальное вращение, системы со значительным эксцентриситетом ($e > 0.4$), системы с компонентами типа δ Щита и β Цефея, кратные системы, которые состоят из трех и даже четырех компонент, системы со значительным межзвездным поглощением, и некоторые другие. Вне всяких сомнений, такое деление затненных систем на несколько категорий весьма полезно для классификации этих систем и планирования дальнейших исследований в зависимости от поставленных целей и задач.

Вместе с тем, приходится сделать несколько замечаний относительно манеры изложения информации в этой главе и отметить некоторые опечатки. (1) В самом начале главы нет ни одного вводного или поясняющего предложения о структуре и содержании Таблиц II, III и IV. (2) Примечания к таблицам начинаются раньше, чем появляются сами таблицы. (3) Нет описания, обсуждения и самих ссылок на Рис. 14 и 15. (4) На рис. 16 приведена неверная шкала по оси ординат, судя по тексту, указанные значения ΔV надо разделить на 10. (5) В разделе 4.2.6 (Тройные и четверные системы) на стр. 129 приведена фраза, смысл которой понимается с трудом: *«Критерием для выбора перспективной для поиска невидимого спутника служило наличие в кривой блеска затненной системы третьего света,*

особенности изменения показателей цвета в минимумах [96]». (6) На стр. 130 предложение «Графики изменений $O - C$ для некоторых объектов приведены на Рис. 20,» скорее всего не закончено и должно выглядеть примерно так: «Графики изменений $O - C$ для некоторых объектов приведены на Рис. 20, 21 и 22». (7) На стр. 137 два раза вместо символа M_0 напечатан только символ Солнца (\odot) и (8) в фразе «... получим оценку наклонности его орбиты...» лучше написать «наклона» или «наклонения». (9) На стр. 138, при обсуждении свойств EQ Boo, отмечено, что скорость апсидального движения 0.13 (наблюдаемая) и 0.37 (теоретическая), а в Таблице III для этой звезды указаны 0.013 и 0.037 соответственно. (10) Совершенно не обязательно вводить еще один подраздел 4.2.10 (*Быстрое апсидальное вращение*), в котором читатели находят всего лишь одно предложение: «Особый интерес представляют двойные эллиптические орбиты, прецессирующие гораздо быстрее большинства звезд списка». (11) В подразделе 4.2.11 (*Конфликтные системы*), который состоит только из 3-х предложений, автор пишет, что: «На примере этих объектов в данном разделе мы более подробно рассмотрим наш метод исследования затменных систем вообще». Можно предположить, что автор хотел сказать здесь примерно следующее: "На примере этих объектов в следующих трех главах мы более подробно рассмотрим наш метод исследования затменных систем вообще".

В пятой главе под названием «Решение проблемы апсидального вращения в системе AS Жирафа (AS Cam)», приведен обзор предыдущих исследований этой затменной системы, обсуждены возможные причины заметного расхождения наблюдаемой скорости апсидального движения от теоретического значения и выполнен новый подробный анализ всех доступных на сегодняшний день фотометрических и спектральных данных. В результате этого анализа автор показал, что орбитальный и осевой моменты в системе AS Cam синхронизированы, а скорость апсидального движения довольно близка к ее теоретическому значению: $\dot{\omega}_{\text{obs}} = 0.38^\circ \pm 0.02^\circ / \text{год}$ и $\dot{\omega}$

$\omega_{\text{theor}} = 0.44^\circ \pm 0.01^\circ / \text{год}$. В заключении к этой главе приводятся оценки параметров апсидального движения и орбиты третьего тела системы AS Cam.

Шестая глава, « α Северной Короны (α CrB)», посвящена анализу фотометрических и спектральных наблюдений ярчайшей затменной системы с замедленным апсидальным вращением и значительным релятивистским вкладом в движение линии апсид. Автор подтверждает тот факт, что наблюдаемое апсидальное движение ($\dot{\omega}_{\text{obs}} = 0.019^\circ / \text{год}$) почти в два раза медленнее теоретического ($\dot{\omega}_{\text{theor}} = 0.034^\circ / \text{год}$) и показывает, что этот эффект может быть связан с наклоном оси вращения главного компонента относительно плоскости орбиты. На стр. 188 имеется небольшая опечатка: отношение $\dot{\omega}_{\text{GR}} / \dot{\omega}_{\text{GR}}$ надо заменить на $\dot{\omega}_{\text{GR}} / \dot{\omega}_{\text{N}}$. В тексте нет ссылки на Рис. 40.

В седьмой главе под названием «Четверная система BU Малого Пса (BU CMi)», идет речь о результатах исследования кратной системы, которая состоит из двух затменных эллиптических систем. Автору удалось идентифицировать такой сложный состав системы BU CMi благодаря изучению интенсивных фотометрических наблюдений TESS. Совместный анализ всех доступных фотометрических наблюдений и спектральных данных высокого разрешения ($R \sim 35000$) позволил диссертанту определить физические характеристики всех четырех компонент этой системы, элементы орбит и периоды апсидального вращения каждой из затменных систем. Обнаружено быстрое апсидальное вращение и небольшие нутационные колебания долготы периастра в обеих затменных системах.

В Заключении приводятся основные результаты проделанной работы и некоторые важные выводы для будущих исследований. Список литературных источников состоит из 164 наименований, общий объем диссертации – 239 стр. Диссертация содержит 55 рисунков и 26 таблиц.

Впечатляющий объем однородных высокоточных фотометрических наблюдений (около 100 тыс. оценок блеска), аккуратная процедура исследования инструментальных фотометрических систем, единый алгоритм

первичной обработки наблюдений и решения кривых блеска, а также привлечение к анализу спектральных данных демонстрируют высокую эффективность авторского комплексного подхода к исследованию свойств затменных систем с эллиптическими орбитами. Без всяких сомнений, все положения, выносимые автором на защиту, научные выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, являются **новыми** и хорошо **обоснованными**.

Достоверность полученных результатов обусловлена высокой точностью фотометрических измерений (заведомо лучше 0.01 звездной величины), адекватностью методов первичной обработки наблюдений и последующего анализа кривых блеска, использованием различных методик для определения того или иного физического параметра, а также успешным сравнением с результатами других авторов.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации. Основные результаты исследования были доложены диссертантом на 16 международных конференциях и изложены в 37 статьях, в 11 из которых И.М. Волков является единственным автором.

Вместе с тем, указанные выше замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Волков Игорь Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, заведующий отделом физики звезд Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук» (КрАО РАН), ведущий научный сотрудник лаборатории звездной эволюции Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук» (КрАО РАН)

Гранкин Константин Николаевич

12 сентября 2024 г.

Подпись сотрудника ФГБУН КрАО РАН

К.Н. Гранкина удостоверяю:

Начальник о/к ФГБУН КрАО РАН

12 сентября 2024 г.

А.С. Семенова

Контактные данные:

тел.: +7-(36554)-71115, e-mail: konstantin.grankin@craocrimea.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом

защита диссертация:

1.3.1. Физика космоса, астрономия

Адрес места работы:

298409, Республика Крым, Бахчисарайский р-н, пгт Научный, КрАО РАН

Тел.: +7-(36554)-71161; e-mail: arost@craocrimea.ru