

УТВЕРЖДАЮ  
Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки  
Главной (Пулковской)  
астрономической обсерватории  
Российской академии наук  
(ГАО РАН)  
доктор физ.-мат. наук Ихсанов Н. Р.



« 18 » марта 2024 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН) на диссертационную работу Соболева Андрея Владимировича «Структура магнитогидродинамических течений в полярных», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия.

Диссертационная работа Соболева Андрея Владимировича посвящена МГД моделированию структуры течения в синхронных и асинхронных полярных с целью интерпретации наблюдательных данных, полученных в отношении этого класса объектов. В диссертации на основе результатов трёхмерного численного моделирования выполнен анализ дрейфа горячих пятен в основании аккреционной колонки вблизи магнитных полюсов белого карлика, а также синтезированы кривые блеска, позволяющие построить структуру течения аккреционного потока в исследуемых системах.

Полученные в диссертационной работе результаты, несомненно, обладают высокой научной ценностью и новизной. В работе впервые выполнено трёхмерное моделирование процесса обмена веществом между компонентами полярной, непосредственное наблюдение которого сильно затруднено в силу удалённости и малых угловых размеров данных объектов. Для исследования структуры течения был использован уникальный МГД код на основе разностной схемы Роу-Эйнфельдта-Ошера повышенного пространственного разрешения с адаптивной расчётной сеткой, позволяющий получить детальное представление о движении и аккреции вещества. Автором диссертации разработан программный комплекс для обработки результатов численных МГД расчётов течения вещества в двойной системе, позволяющий синтезировать карты дрейфа горячих пятен и кривые блеска, а также выполнить оценку темпа аккреции, реализуемого в рассматриваемых системах. Кроме того, в диссертации представлена оригинальная методика оценки конфигурации магнитного поля на основе наблюдаемых кривых блеска объектов, позволяющая определить степень смещения магнитного диполя относительно центра звезды на основе наблюдаемого соотношения светимостей горячих пятен.

#### Содержание работы

Во **Введении** представлен краткий обзор предмета исследования и содержания диссертационной работы. Определены ее актуальность, цели, задачи, научная новизна полученных результатов, их научная значимость. Представлена информация об апробации результатов на всероссийских и международных конференциях, публикациях полученных данных в рецензируемых изданиях, а также о личном вкладе автора в диссертационную работу.

В **Главе 1** приводится описание постановки задачи моделирования полярных в рамках физической, математической и численной моделей. Физическая модель, принятая в диссертации,

содержит ряд упрощений, необходимых для достижения поставленных целей диссертационной работы. В частности, рассмотрение ограничено текущим эволюционным состоянием полярных, изменения газодинамических параметров в аккреционной колонке вследствие ударной волны в её основании полагаются несущественными, и химический состав вещества струи ограничен водородной компонентой.

В рамках математической модели приведено описание используемой системы координат, а также методики синтеза кривых блеска и построения температурных карт поверхности белого карлика.

Численная модель основана на уравнениях модифицированной магнитной гидродинамики, которые описывают усредненные характеристики течения в рамках волновой МГД турбулентности. В ней учитывается ряд динамических эффектов, связанных с наличием сильного магнитного поля белого карлика: диффузия магнитного поля, процессы радиационного нагрева и охлаждения. Подробно изложена разностная схема Роу-Эйнфельдта-Ошера, алгоритма для решения МГД уравнений и обсуждается возможность использования результатов расчётов на основе представленной модели полярной для интерпретации наблюдений.

**В Главе 2** приведены результаты расчёта структуры течения для типичного синхронного полярного V808 Aur. Численные расчёты проводились для четырёх значений темпа массообмена в интервале от  $10^{-8}$  до  $10^{-11} M_{\odot}/\text{год}$ , соответствующих различным состояниям активности двойной системы. Проведенное исследование подтвердило предположение о том, что состояния полярной определяются темпом аккреции, который, в свою очередь, определяется темпом массообмена. Показано также, что существенные изменения яркости во вторичном минимуме могут быть вызваны прогревом оболочки донора рентгеновским излучением, генерируемым в зонах аккреции. Расчёты демонстрируют рост длины баллистической части аккреционной струи с увеличением темпа массообмена, где поток вещества контролируется в основном гравитацией и силами инерции (центробежная сила и сила Кориолиса). Это приводит к изменению пространственной конфигурации потока и заметному дрейфу горячих пятен на поверхности белого карлика.

Проведённое исследование распределения горячих пятен по поверхности аккретора в зависимости от темпа массообмена обнаружило формирование двух зон аккреции, сосредоточенных около северного (основная зона) и южного (вторичная зона) магнитных полюсов белого карлика. Южная зона аккреции оказывается гораздо менее интенсивной, поскольку формируется за счет потока вещества из околосредней оболочки. Форма, интенсивность, а также расположение северного горячего пятна существенно зависят от темпа аккреции. При переходе к высокому состоянию это пятно смещается как по долготе, так и по широте.

**В Главе 3** исследована структура течения в асинхронном полярном CD Ind в предположении дипольной конфигурации магнитного поля белого карлика со смещённым относительно центра звезды диполем. Изучение структуры проводилось в рамках стационарной модели для десяти фаз периода биений при постоянном темпе массообмена. Выполненные численные расчёты позволили выделить такие особенности системы, как дрейф горячих пятен на поверхности белого карлика, зависимость структуры течения от фазы периода биений, процесс переключения течения между магнитными полюсами.

По результатам расчетов были синтезированы болометрические и оптические кривые блеска с целью анализа динамики потока излучения от полярной в течение орбитального периода и периода биений. Полученные синтетические кривые блеска в оптическом диапазоне с учетом всех необходимых факторов (V-фильтр, прогрев донора рентгеновским излучением из зон аккреции, поглощение излучения веществом аккреционной струи) вполне согласуются с наблюдаемыми кривыми, приведенными в работе.

**Глава 4** посвящена трехмерному численному МГД моделированию структуры течения в асинхронном полярном CD Ind в моменты переключения струи между магнитными полюсами аккректора. Для изучения процессов переключения использовался нестационарный тип численной модели, учитывающий собственное асинхронное вращение аккректора. Численное моделирование выявило качественные изменения структуры течения в процессах переключения аккреции. В частности, наблюдалось увеличение сечения струи в начале магнитной части траектории и формирование арки плотного вещества во внутренней области магнитосферы белого карлика, обращенной к донору. С развитием процесса внутренний радиус арки уменьшается, способствуя сближению горячих пятен на поверхности аккректора, что постепенно приводит к переходу аккреции в однополюсный режим. Выполнены оценки длительности переключений аккреции между полюсами и построены карты температуры поверхности первичного компонента, указывающие на дрейф горячих пятен.

Анализ темпа аккреции, требуемый для объяснения данных наблюдений, выявил эффект возможного накопления вещества в моменты переключения.

**В Заключении** представлены основные результаты диссертационной работы. Даны рекомендации для дальнейшего развития темы диссертации.

#### **Замечания по диссертационной работе**

Диссертационная работа представляет собой законченное научное исследование, она логично построена и хорошо структурирована. Тем не менее есть ряд замечаний по содержанию проведенного исследования и форме представления полученных результатов.

1. Задачи, решенные в диссертации, носят достаточно рафинированный характер в силу принятых упрощающих предположений, полный список которых приводится в диссертации. Сделанные упрощения безусловно оправданы с точки зрения оптимизации численной модели, однако их допустимость с точки зрения физической модели обсуждается лишь частично и на качественном уровне.

2. Для удобства сравнения результатов модели с наблюдениями следовало бы привести в явном виде спектральную плотность излучения каждого из источников, присутствующих в системе. Значения интегральной светимости этих источников, приведенные в диссертации, носят, скорее, информативный характер и затрудняют тонкую настройку численной модели течения вещества в системе.

3. Особый интерес представляет результат, связанный с накоплением газа в магнитосфере в момент переключения процесса аккреции между полюсами белого карлика в асинхронном полярном. Это, однако, предполагает появление дополнительного источника излучения в области торможения падающего потока, излучение которого может также воздействовать на внешние части аккреционной струи. Вместе с тем, в диссертации не указано каким образом в модели учитывается воздействие этого дополнительного источника на параметры излучения внешних частей аккреционной струи.

4. Из разряда пожеланий по форме представления результатов хотелось бы отметить неоправданный избыток графического материала в Главах 2-4 и большое количество промежуточных вычислений в основном тексте Главы 1, которые затрудняют восприятие основной линии рассуждений автора и которые было бы уместно представить в форме приложений.

Вместе с тем, указанные замечания не затрагивают основные положения и выводы диссертационной работы, не снижают ее значимости и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

## Заключение

Диссертация Соболева Андрея Владимировича «Структура магнитогидродинамических течений в полярках» является законченной работой, актуальность и достоверность которой не вызывает сомнений. Результаты, полученные в диссертационной работе, вносят заметный вклад в понимание физических процессов, связанных с аккрецией и обменом веществом в тесных двойных системах, содержащих в своем составе белые карлики с сильным магнитным полем, и могут быть использованы в ГАО РАН, КрАО РАН, САО РАН, ИКИ РАН, ГАИШ МГУ и других астрономических учреждениях.

Автореферат диссертации в полном объеме отражает основные результаты, полученные в работе. Диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Автор диссертационной работы заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Отзыв подготовлен старшим научным сотрудником ГАО РАН, кандидатом физико-математических наук Ниной Георгиевной Бескровной и обсужден на заседании Объединенного астрономического семинара Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Протокол № 10 от 13 марта 2024 г.

Старший научный сотрудник,  
канд. физ.-мат. наук

Бескровная Н.Г.

Подпись Бескровной Н.Г. заверяю

Ученый секретарь ГАО РАН,  
канд. физ.-мат. наук



Барсунова О.Ю.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория  
Российской академии наук (ГАО РАН)  
196140, Россия, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе д. 65 кор. 1

тел.+7(812)363-7207 факс:+7(812)363-7175

e-mail: [map@gaoran.ru](mailto:map@gaoran.ru)