

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной и исследовательской деятельности
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Южный федеральный университет»,
д.т.н., старший научный сотрудник

А. В. Метелица



«августа» 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Южный федеральный университет»
на диссертацию Чмырёвой Елизаветы Георгиевны
«Поиск и исследование вероятных одиночных черных дыр звездных масс в
избранных областях Галактики»
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия

Задача прямого обнаружения горизонта событий черных дыр до сих пор остается нерешенной, поэтому исследования в этой области чрезвычайно актуальны. Одиночные черные дыры звездных масс представляют собой объекты, чей горизонт событий возможно обнаружить, в отличие от черных дыр в двойных системах и в сверхмассивных черных дырах в центрах галактик, где центральные области закрыты аккрецирующим веществом. Проявлениями горизонта событий являются сверхбыстрые вспышки излучения

аккрецирующего на черную дыру вещества, поэтому именно их обнаружение может послужить доказательством того, что исследуемый объект является черной дырой.

Кандидатская диссертация Елизаветы Георгиевны Чмыревой посвящена поиску кандидатов в одиночные черные дыры звездных масс и анализу их наблюдательных проявлений. Для этого в Галактике выделяются области с повышенной вероятностью нахождения черных дыр, к которым относятся места распада массивных двойных систем, состоящих из нейтронных звезд и черных дыр. Для определения таких областей используются известные кинематические данные одиночных пульсаров - их движение прослеживается в прошлое к моменту рождения. В определенных таким образом областях выделяются пекулярные источники излучения разных диапазонов длин волн, чьи характеристики затем сопоставляются с теоретически ожидаемыми для черных дыр. Оценивается вероятность того, что кандидаты являются черными дырами. В работе также проводится анализ свойств черной дыры - микролинзы MOA-191/OGLE-0462. Для нее оценивается темп аккреции и светимость, строится ее теоретический спектр. Показывается, что этот объект можно наблюдать напрямую с помощью нескольких проектируемых телескопов.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Она содержит 113 страниц, 33 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 130 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность обнаружения одиночных ЧД в связи с возможностью наблюдать у них излучение, генерируемое в областях около горизонта событий.

В **первой главе** обсуждается общая проблема обнаружения изолированных черных дыр звездных масс. Описывается развитие этой темы в астрофизике на сегодняшний день, трудности реализации задачи, различные программы поиска этих объектов. Описываются их ожидаемые наблюдательные

проявления, включающие нетепловой спектр без линий в широком диапазоне, оптический блеск до 25 звездной величины, переменность, вспышки, собственное движение. Обосновывается, какие пространственные области имеют повышенную вероятность нахождения черных дыр: зоны распада массивных двойных систем и окрестности событий микролинзирования.

Во **второй главе** описывается установление вероятной гравитационной связи между парами релятивистских объектов в прошлом. Для них моделируются траектории движения в потенциале Галактики и анализируются их сближения в прошлом. Опорные вероятности позволяют оценить степень неслучайности таких сближений. Анализируется кинематика распада системы. По результатам работы найдено 6 пар пульсаров и 2 пары пульсар-остаток сверхновой, вероятно связанных в прошлом.

В **третьей главе** проводится поиск одиночных черных дыр в зонах распада двойных систем в которых они, возможно, состояли с радиопульсарами. Для отобранных пульсаров строились траектории их вероятного движения в прошлом и определялись места их рождения в соответствии с оценкой характеристических возрастов. Области рождения четырех самых молодых пульсаров выборки, которые показали наименьший разброс конечных точек смоделированных траекторий, были выбраны для поиска в них кандидатов в ЧД. В четырех областях, с использованием различных баз данных, исследовались пекулярные объекты во всех диапазонах длин волн, чьи наблюдательные свойства соответствовали теоретическим для одиночной ЧД. По результатам исследования найдено 9 таких объектов.

Характеристики кандидатов анализируются в **четвертой главе**. Получены оценки локальных свойств межзвездной среды в их окрестностях, светимостей и видимых величин при сферической аккреции. Данные о скоростях и массах одиночных ЧД рожденных в двойных системах из стандартной модели эволюции населения диска Галактики были использованы для оценки

соответствия наблюдательных проявлений 9 кандидатов для черных дыр. У восьми из девяти кандидатов вероятности принадлежности к классу ЧД лежат в интервале 1.2-13.9%, а вероятность присутствия среди них хотя бы одной ЧД составила 36%.

В пятой главе анализируется одиночная черная дыра - микролинза MOA-191/OGLE-0462. Доступная информация о ее локализации, поперечной скорости и массе была использована для определения параметров межзвездной среды в ее окрестностях (плотность, скорость звука, температура). Для объекта были получены темп аккреции, светимость, видимая величина. Его теоретический спектр строится на основе модели сферической аккреции, а также оценивается уровень вспышек в разных диапазонах длин волн. Теоретический спектр был сопоставлен с уровнями чувствительности различных телескопов и миссий. Сделан вывод о возможности детектировать излучение объекта некоторыми инструментами (SKA, JWST, TMT, GMT, ELT, Athena, Миллиметрон). Проводится анализ детектируемости разных видов излучения в различных спектральных диапазонах.

В заключении обобщаются результаты работы и обсуждается ее дальнейшее развитие.

По нашему мнению, диссертацию можно охарактеризовать как **актуальное**, тщательно выполненное разностороннее исследование. Обнаружение и исследование одиночных ЧД звездных масс является важной задачей в астрофизике. Эти объекты позволили бы изучать области, прилегающие к горизонту событий, что, в свою очередь, даст возможность получить фундаментальные данные о физике черных дыр.

Проведенный массовый анализ кинематики релятивистских объектов (черных дыр, нейтронных звезд) с помощью разработанного метода позволяет определять области их рождения и оценивать вероятности их гравитационной связанности в прошлом. Разработанный подробный алгоритм отбора объектов-

кандидатов в ЧД позволит быстро выявлять пекулярные объекты для дальнейшего исследования. Представленный метод определения локальных свойств межзвездной среды в местах локализации кандидатов позволяет определять для них темп аккреции и светимость. Предложенная процедура сравнения наблюдаемых параметров кандидатов с теоретическими позволяет получить вероятностную оценку их принадлежности к ЧД. Применение разработанной процедуры к гравитационной линзе MOA-191/OGLE-0462 позволило впервые определить ее теоретическую светимость и спектр, а также оценить возможность ее наблюдения различными инструментами. В этом состоит **научная новизна** работы.

Достоверность и обоснованность научных результатов диссертации определяется проведением тщательных вычислений искомых параметров, в том числе и авторскими методами, всесторонним анализом полученных результатов и их сопоставлением с результатами других авторов. В работе использовались принятые в астрофизике строгие методы. Из 94 изначально отобранных кандидатов в ЧД было оставлено 8, что подчеркивает тщательность проведенного исследования. По теме диссертации опубликовано 11 статей в научных изданиях, 6 из которых включены в список ВАК. Все представленные к защите результаты прошли апробацию на 12 всероссийских и международных конференциях.

Практическая ценность и научная значимость работы состоят в возможности быстрого определения мест рождения релятивистских объектов, оценке вероятности их гравитационной связи в прошлом, а также в четком алгоритме отбора кандидатов в ЧД по фотометрическим, спектральным, кинематическим данным в разных диапазонах и определении их параметров. Микролинза MOA-2011-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462 представляет огромный интерес для науки как один из лучших кандидатов в одиночные ЧД звездных масс. Полученные оценки ее светимости и спектра позволят

планировать наблюдательные программы по ее исследованию.

Основные замечания к представленному тексту диссертации имеют, в основном, технический характер.

1. Следовало бы более подробно описать, почему для поиска ЧД были выбраны именно эти пульсары, хотя их возраст достигает нескольких сотен тысяч лет. На наш взгляд, недостаточно подробно изложена проблема достоверности характеристических возрастов пульсаров, использованных в работе.

2. Двумерная плотность вероятности для масс и скоростей ЧД охватывает значения, которые могут в том числе подходить и для других объектов, например, обычных звезд. Полезным было бы учитывать это при отборе кандидатов и привести более детальное описание совокупности свойств, присущих только ЧД. В работе говорится, что один из 9 кандидатов был отброшен по причине несоответствия его наблюдаемых характеристик теоретическим - но на Рис.4.6 видно, что он все-же попадает в область значений ЧД, хоть и вблизи ее границы.

3. Для микролинзы MOA-2011-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462 следовало бы более четко подчеркнуть, что речь идет скорее об оценках светимости сверху и объект может быть более слабым.

4. В работе присутствуют стилистические недочеты. Все обозначения на рисунках и некоторые единицы в тексте приводятся на английском языке; например, миллисекунды дуги на стр.68 - в виде "mas уг⁻¹". Есть некоторая путаница в обозначениях в разных главах работы - например, для собственного движения и модуля расстояния. Не расшифрованы обозначения телескопов на Рис.5.3, тем более, что некоторые из них даже не упоминаются в тексте.

Перечисленные замечания не снижают практическую и научную ценность результатов и не влияют на положения, выносимые на защиту. Нужно отметить значительный вклад диссертантки в совместные работы и полученные ею

результаты. Диссертанткой совместно с соавторами разработаны новые методы определения свойств межзвездной среды, определения связи одиночных релятивистских объектов в двойных системах в прошлом, а также отбора кандидатов в черные дыры. В диссертации детально описан анализ наблюдательных свойств одиночных черных дыр, который позволил отобрать 8 кандидатов, а также содержатся новые сведения об уже обнаруженной ЧД-микролинзе, что является весьма значимым перспективным достижением. Результаты работы Чмыревой Елизаветы Георгиевны могут представлять интерес для астрономов САО РАН, ГАИШ МГУ, ЮФУ и других российских и международных организаций. Автореферат в полной мере отражает содержание и структуру диссертации.

Следует подчеркнуть, что в целом работа Е.Г. Чмыревой относится к числу рискованных исследований, чьи результаты трудно предсказать, однако дающих возможность взглянуть на давно существующие астрофизические проблемы с оригинальной точки зрения и открывающие возможности существенных продвижений в их решении.

Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям и является законченным научным исследованием, которое основано на самом тщательном анализе и интерпретации полученных данных, а автор, Чмырева Елизавета Георгиевна, несомненно, **заслуживает присуждения** ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия.

Отзыв подготовлен к.ф.-м.н., доцентом (01.03.02. - астрофизика и звездная астрономия), зав. кафедрой физики космоса Южного федерального университета Ачаровой Ириной Александровной (344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42, тел. 8(928)1046770, email: iaacharova@sfedu.ru).

Отзыв обсужден и утвержден на заседании объединенного астрофизического семинара кафедры физики космоса Южного федерального

университета и отдела радиофизики и космических исследований Научно-исследовательского института физики Южного федерального университета 23 августа 2022 г., протокол № 2.

Зав.кафедрой физики космоса
Южного федерального университета
кандидат физ.-мат. наук, доцент,
председатель семинара

 Ирина Александровна Ачарова

Сведения о ведущей организации

344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42,

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования "Южный федеральный университет"

Тел.: +7(863) 305-19-90,

факс: +7(863) 263-87-23,

email: info@sfedu.ru



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Личную подпись <u>Ачаровой И.А.</u>
ЗАВЕРЯЮ:
Ведущий специалист по управлению персоналом <u>И.И. Луцкибалова</u> И.И. «30» августа 2022г.