

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

**Чмырёвой Елизаветы Георгиевны**

на тему: «Поиск и исследование вероятных одиночных черных дыр звездных масс в избранных областях Галактики» по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

Впервые идея о возможности обнаружения и исследовании одиночных черных дыр звездной массы по их излучению в результате аккреции межзвездного вещества была высказана около 50 лет Виктором Шварцманом. По современным эволюционным представлениям наша Галактика должна насчитывать порядка  $10^8$  таких объектов. Однако на практике идентифицировать эти объекты оказалось намного труднее по сравнению с черными дырами в двойных звездных системах или сверхмассивными черными дырами в центрах галактик. Сообщение о первом достоверном обнаружении одиночной черной дыры с массой около семи масс Солнца, благодаря наблюдениям с помощью Хаббловского телескопа длинного, порядка 270 дней, события микролинзирования MOA-2011-BLG 191/OGLE-2011-BLG-0462 появилось, лишь в этом году. Из более 10 тысяч выявленных случаев микролинзирования имеется около десятка кандидатов, где линзами могут являться нейтронные звезды или черные дыры. Однако твердых оснований считать, что они обусловлены черными дырами нет, и активные поиски новых надежных отождествлений продолжаются. В связи с этим, **исследования, проведенные в диссертации, в частности, направленные на сужение областей пространственной локализации возможных одиночных черных дыр и разработки новых методик отбора кандидатов в эти объекты, несомненно являются актуальными.**

Работа в целом сфокусирована на важном канале формирования черных дыр при гравитационном коллапсе более массивных компаньонов в массивных

двойных звездных системах. Они становятся одиночными в результате последующего взрыва сверхновой менее массивного компаньона, приводящего к образованию вылетевшей нейтронной звезды и распаду системы. Скорости оставшихся одиночными черных дыр не велики и их положения могут быть локализованы путем определения мест рождения сравнительно молодых нейтронных звезд. Наиболее благоприятную возможность для этого предоставляют радиопульсары, собственные движения, возрасты и расстояния которых определены достаточно точно.

### **Рассмотрим положения, выносимые на защиту.**

**Положение 1** основано на разработанном в диссертации моделировании траекторий релятивистских объектов, таких как пульсары, с учетом неопределённостей их наблюдаемых кинематических параметров, возрастов и расстояний, а также параметров Галактического гравитационного потенциала. Метод апробирован и применен для массового анализа возможностей рождения в двойных системах ныне одиночных молодых радиопульсаров, а также поиска ассоциаций пульсаров с остатками взрывов сверхновых. Найдено 6 пар пульсаров и 2 пары пульсар-остаток сверхновой, для которых вероятности общего происхождения существенно превышают опорные, полученные в предположении о чисто случайном прошлом сближении объектов. Далее разработанный метод использован для получения результатов **Положений 2-3**.

**Положение 3** рапортует об обнаружении 8-ми пекулярных оптических объектов-кандидатов в одиночные черные дыры в областях вероятного распада четырех двойных систем в процессе рождения в них пульсаров (J0139+5814, J0358+5413, J1935+1616 и J0922+0638), предположительно покинувших двойные системы с черными дырами. Определены размеры областей рождения пульсаров, которые на небе составляют от 1-го до 16 градусов и около 1 кпк вдоль луча зрения. Как сказано в в Главе 3 диссертации, расчеты проводились для еще 12 пульсаров с измеренными

параллаксами и собственными движениями, но для них неопределенности областей рождения оказались на порядок большими.

**Положение 2** основано на разработанном в работе алгоритме отбора кандидатов в одиночные черные дыры звездных масс по совокупности фотометрических, спектральных, кинематических данных, полученных в разных диапазонах электромагнитного излучения. Согласно теоретическим предсказаниям оптические спектры излучения одиночных черных дыр должны быть нетепловыми, то есть, обладать пекулярными цветами и не содержать спектральных линий. Они также могут излучать в радио, рентгеновском и гамма диапазонах. Исходя из этого с помощью доступных каталогов в областях рождения четырех пульсаров, упомянутых выше в при рассмотрении **Положении 3**, из нескольких тысяч наблюдаемых было отобрано 9-ть пекулярных оптических объектов – кандидатов в черные дыры. Далее проведено сопоставление наблюдательных характеристик этих объектов с их теоретическими оценками, в предположении, что они излучают как одиночные черные дыры в результате аккреции газа из межзвездной среды. Получены области допустимых масс и скоростей для всех 9-ти кандидатов, которые сравнены с теоретической картой вероятности значений масса-скорость для одиночных черных дыр, рожденных в распавшихся двойных системах и оценены вероятности того, что кандидаты являются черными дырами. В результате осталось 8 объектов с вероятностями между 1.2% и 13.9%. Полная вероятность того, что среди выделенных кандидатов присутствует хотя бы одна черная дыра составила 36%.

**Положение 4** отражает проведенный в работе анализ возможных непосредственных наблюдательных проявлений одиночной черной дыры-микролинзы MOA-191/OGLE-0462, упомянутой в начале данного отзыва. С использованием параметров объекта и окружающей среды, полученных из анализа события микролинзирования и 3-х мерных карт межзвездной экстинкции, предсказаны яркость и спектр его излучения в диапазонах от радио до рентгена в рамках подхода, использованного в **Положении 2**.

Показана возможность прямого детектирования оптического-инфракрасного излучения аккрецирующего на дыру газа с помощью действующих Хаббловского и Джеймс Уэбб телескопов и проектируемых телескопов нового поколения во всех диапазонах спектра электромагнитного излучения.

**Все Положения являются достаточно обоснованными.** Автором проделана большая и трудоемкая работа. Особо отметим разработанный алгоритм моделирования траекторий движения релятивистских объектов в прошлом, который является базой для первых трех Положений. Это моделирование дополнительно позволяет оценить кинематический возраст пульсара, который совместно с характеристическому возрасту позволяет более надежно ограничить его реальный возраст. Последний является важным параметром для исследования физики и эволюции нейтронных звезд. Также отметим разработанный и примененный метод отбора кандидатов в черные дыры с использованием доступных астрофизических каталогов. Он позволил выделить в 4-х достаточно протяженных зонах предполагаемой локализации черных дыр 8 наиболее вероятных кандидатов. Также вызывает уважение оперативный отклик на первое достаточно надежное обнаружение черной дыры в результате события микролинзирования и оригинальные оценки возможности ее прямого детектирования.

**У рецензента имеются следующие вопросы и замечания.**

1. Я не нашел, как распределены 8 отобранных кандидатов в одиночные черные дыры по найденным областям рождения 4-х пульсаров. Хорошо было бы пометить их на картах этих областей, представленных на Рис. 3.1.
2. Интересно было бы увидеть, как согласуются широкополосные спектры этих 8-ми достаточно ярких кандидатов с соответствующим ожидаемым спектрами предполагаемых черных дыр (например, в стиле Рис. 5.3).
3. Можно ли подобрать пульсар, который составлял в прошлом возможную пару черной дыре MOA-191/OGLE-0462 ?
4. Что обозначают белые кружки на диаграмме цвет-цвет на Рис. 3.2 ?

Перечисленные замечания имеют в основном рекомендательный характер и не умаляют высокой значимости диссертационного исследования.

**Диссертация Е.Г. Чмырёвой представляет значимый вклад в исследования одиночных черных дыр.** Её результаты могут быть использованы при отборе кандидатов в черные дыры для наблюдений на наземных и орбитальных телескопах и интерпретации наблюдений. Основные результаты диссертации изложены в 6-ти работах, опубликованных в рецензируемых российских и зарубежных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ и апробированы на 12-ти российских и международных конференциях.

Диссертационная работа Чмырёвой Е.Г. «Поиск и исследования вероятных одиночных черных дыр звездных масс в избранных областях Галактики» соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - «астрофизика и звездная астрономия». Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, соискатель Е.Г. Чмырёва безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник  
лаборатории «Прикладной математики и математической физики ФТИ им  
Иоффа РАН»

Шибанов Юрий Анатольевич

16.09.2021

Контактные данные:

тел.: 7(612)2927180, e-mail: [shib@astro.ioffe.ru](mailto:shib@astro.ioffe.ru) Специальность, по  
которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01 03.02 –  
Астрофизика и звездная астрономия

Адрес места работы:

195021 г.С.Петербург, Политехническая ул., д. 26  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
лаборатория Прикладной математики и математической физики,  
Тел.: +7 812-2927180; e-mail: [shib@astro.ioffe.ru](mailto:shib@astro.ioffe.ru)



Подпись Шибанова Ю.А. удостоверяю  
зав. отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе

УБВ / Н.С. Буцкерю