



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Диссертация «Поиск и исследование вероятных одиночных черных дыр звездных масс в избранных областях Галактики», представляемая на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия выполнена в группе релятивистской астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Чмырёва Елизавета Георгиевна работала в САО РАН в должности младшего научного сотрудника.

В 2006 г. окончила физический факультет федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» по специальности «Астрономия» и ей присвоена квалификация АСТРОНОМ. Соискатель окончила аспирантуру физического факультета МГУ по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», направленности 01.03.02 «Астрофизика и радиоастрономия».

Научный руководитель — д.ф.-м.н. Бескин Григорий Меерович является руководителем группы релятивистской астрофизики САО РАН в должности ведущего научного сотрудника.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Работа посвящена поиску изолированных черных дыр (ЧД) в областях Галактики, где вероятность их обнаружения относительно высока. Анализируются характеристики и локализация таких областей, в них отбираются объекты, чьи наблюдательные проявления соответствуют теоретически предсказанным для одиночных аккрецирующих ЧД звездных масс. Оцениваются вероятности того, что найденные кандидаты ими являются. Обсуждаются перспективы обнаружения ЧД в различных поисковых программах.

Тема обнаружения одиночных ЧД звездных масс очень актуальна, поскольку именно у одиночных ЧД может быть реализована возможность наблюдать излучение из областей вблизи горизонта событий - родового признака черных дыр, что позволит тестировать теории гравитации. В отличие от ЧД в рентгеновских двойных системах, где эти области экранируются аккреционным диском, в случае одиночной ЧД аккреция сферическая, что позволяет исследовать области на расстоянии 1-2  $r_g$ . Наблюдательные

проявления, ожидаемые от такой ЧД включают излучение в широком диапазоне частот (от ИК до гамма), нетепловой спектр без линий, оптический блеск  $16^m - 25^m$  (при расстоянии до объекта 100-300 пк), медленную переменность (от часов до лет), быструю переменность ( $10^{-6} - 10^{-3}$  с, при вспышках до  $\sim 10\%$  потока), собственное движение. Так как большинство звезд рождаются в двойных и кратных системах, то вероятность обнаружить одиночную ЧД выше в областях распада тесных двойных систем, состоящих из ЧД и нейтронной звезды (пульсара).

Установление вероятной гравитационной связи релятивистских объектов в прошлом возможно при их известной кинематике и расстояниях. В работе моделируются траектории движения в галактическом потенциале пар одиночных пульсаров, а также пар пульсар - остаток сверхновой и анализируются их сближения в прошлом. С помощью опорных вероятностей, вычисленных в предположении о чисто случайном сближении объектов (с учетом распределения пульсаров в Галактике и их независимых скоростей), оцениваются достоверности связи этих объектов при их общем происхождении. По результатам моделирования найдено 6 пар пульсаров (J0543+2329/ J0528+2200, J1453-6413/J1430-6623, J2354+6155/J2321+6024, J1915+1009/ J1909+1102, J1832-0827/J1836-1008 и J1917+1353/J1926+1648) и 2 пары пульсар-остаток (J1829-1751/G16.2-2.7, J1833-0827/G24.7-0.6), чьи сближения на малые расстояния в прошлом нельзя считать случайными, а, следовательно, есть основания полагать, что они были гравитационно связаны, учитывая особенности оценки их кинематических характеристик и возрастов.

Поиск одиночных черных дыр проводился в ограниченных пространственных областях, найденных в предположении о том, что они состояли в тесных двойных системах с ныне-одиночными пульсарами. Для выборки одиночных радиопулсаров, подходящих по возрастам и параллаксам для поиска их возможных компаньонов-ЧД в прошлом, были определены места рождения. Области рождения четырех пульсаров (J0139+5814, J0922+0638, J0358+5413, J1935+1616), показавших наиболее точные результаты, были исследованы на предмет кандидатов в ЧД. Исследовались пекулярные объекты как с жесткой спектральной составляющей, так и без нее, чьи наблюдательные проявления соответствовали теоретически ожидаемым для одиночной ЧД. Для отбора кандидатов были использованы данные фотометрии, спектроскопии, кинематики, морфологии в разных диапазонах частот. По результатам отбора найдено 9 кандидатов в ЧД. Данные о межзвездном покраснении позволили получить оценку столбцовой концентрации водорода в направлении на объекты. Производная по расстоянию дает для кандидатов локальные плотности межзвездной среды, которые вычислялись как средневзвешенные значения в диапазоне допустимых расстояний. Полученные значения плотности позволили оценить температуры и скорости звука в локализации кандидатов. Эти оценки были использованы для определения их светимости и видимых величин в предположении о сферической аккреции. Также получены диапазоны параметров, при которых наблюдательные проявления кандидатов соответствуют таковым для ЧД.

Распределения масс и скоростей для популяции одиночных ЧД из распавшихся двойных систем в стандартной модели эволюции населения диска Галактики использовались для построения поля их теоретической двумерной плотности вероятности. Это поле сопоставляется с полученными диапазоном допустимых значений для отобранных кандидатов, определяемым неопределенностями входящих параметров. Интегрирование в пределах области допустимых значений показало, что восемь из девяти кандидатов (J035738.16+525934.4, J035757.63+525928.7, J035717.10+511525.4, J035239.08+513344.1, J193559.98+205305.7, J193433.81+203117.1, J193415.78+190004.2, J034803.12+505358.7) имеют вероятности принадлежности к ЧД в пределах 1.2-13.9%. Вероятность получить среди них хотя бы одну ЧД составила 36%.

В диссертационной работе также была проанализирована недавно обнаруженная методом микролинзирования вероятная одиночная ЧД MOA-191/OGLE-0462. С помощью известных данных о ее координатах, массе и поперечной скорости, были оценены параметры межзвездной среды в ее окрестностях (плотность, скорость звука, температура) и темп аккреции. Ее светимость составила  $5.14 \times 10^{29}$  эрг·с<sup>-1</sup>, а оценка видимой величины - приблизительно 28<sup>m</sup>. Построен теоретический спектр MOA-191/OGLE-0462 в модели сферической аккреции и получена оценка уровня (5.5%) предполагаемых вспышек в жестком диапазоне. Проведено сравнение построенного спектра с чувствительностью настоящих и будущих телескопов и миссий в различных диапазонах. Оценки показывают, что прямое детектирование излучения этого объекта доступно для ряда будущих инструментов, таких как SKA, JWST, TMT, GMT, ELT, Athena, Миллиметрон.

Научная новизна работы заключается в проведении массового анализа возможности рождения в двойных системах ныне одиночных молодых радиопульсаров. Получены оценки вероятности их гравитационной связанности в прошлом. Найдено 6 пар пульсаров и 2 пары пульсар-остаток сверхновой вероятно состоявших в двойных системах. Впервые разработана методика отбора кандидатов в одиночные ЧД звездных масс по совокупности фотометрических, спектральных, кинематических данных полученных в разных диапазонах электромагнитного излучения. Разработана процедура оценки параметров локальной межзвездной среды в окрестностях кандидатов, что позволяет оценить их светимость. Оценены вероятности того, что кандидаты являются ЧД. В качестве зон локализации вероятных одиночных ЧД были впервые исследованы области рождения 4 пульсаров. С помощью разработанной методики в них найдено 8 кандидатов. Определены допустимые диапазоны их параметров и оценены вероятности их принадлежности к классу ЧД, а также вероятность того, что хотя бы один из найденных кандидатов является ЧД. Для вероятной ЧД - микролинзы MOA-2011-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462 впервые получены оценки свойств локальной межзвездной среды; на основании этих данных найдена ее аккреционная светимость. Построен теоретический спектр в широком диапазоне частот. Проанализирована возможность прямого детектирования этого излучения.

Научная и практическая значимость работы состоит в разработке процедуры моделирования движения релятивистских объектов (нейтронных звезд, ЧД) в прошлом, которая позволяет локализовать места их рождения и оценить вероятность того, что они состояли в тесных двойных системах. Разработанный метод позволяет отбирать объекты-кандидаты в ЧД по фотометрическим, спектральным, кинематическим данным и получать для них допустимые диапазоны параметров (светимости, темпа аккреции, массы, скорости, локальной плотности межзвездной среды, температуры среды, скорости звука, видимой величины) в предположении, что они являются ЧД. По результатам поиска одиночных ЧД в областях рождения 4 пульсаров было выделено 8 кандидатов. Развита метод определения соответствия наблюдательных характеристик кандидатов их теоретическим оценкам для одиночных ЧД и его вероятности. Получены оценки параметров и теоретического спектра вероятной ЧД - микролинзы MOA-2011-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462. Показана возможность прямого детектирования ее излучения рядом инструментов.

Личный вклад автора заключается в формировании выборки пульсаров, определении локализаций их рождения и вероятности гравитационной связи в прошлом, отборе кандидатов в ЧД и анализе их характеристик, определении светимости и построении теоретического спектра MOA-191/OGLE-0462, оценке возможности детектирования ее излучения, а также в подготовке публикаций совместно с соавторами.

Все результаты, выносимые на защиту, аргументированы и подробно изложены в 11 статьях соискателя, 6 из которых опубликованных в рецензируемых журналах списка ВАК. Представленные результаты и выводы обсуждались на 12 международных и всероссийских конференциях.

По докладу автора на Ученом совете САО РАН были заданы вопросы, на которые докладчик исчерпывающе ответил.

В выступлениях Моисеев А.В. и Пустильник С.А. отметили очень четкое представление результатов диссертационной работы. Моисеев А.В. также предложил указать какие данные и параметры выборки использовались, общее представление о данном направлении исследований и месте работы в этом направлении. Пустильник С.А. отметил, что диссертационная работа Чмыревой Е.Г. продолжает идеи В.Ф. Шварцмана, и очень приятно видеть продолжение его работ. Бескин Г.М. отметил сложность темы, выбранной автором диссертации, объем проделанной работы, полученные результаты и их важность для будущих исследований. Валявин Г.Г. отметил большой объем проделанной работы и положительно оценил диссертацию.

Ученый совет пришел к заключению, что представляемая диссертация является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой. Выполненная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, паспорту научной специальности, а соискатель заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Поиск и исследование вероятных одиночных черных дыр звездных масс в избранных областях Галактики» Чмырёвой Елизаветы Георгиевны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия.

Заключение принято на заседании Ученого совета САО РАН 20 июня 2022 года.  
Присутствовало на заседании 15 членов Ученого совета.  
Результаты голосования: «за» – единогласно, протокол №404 от 20 июня 2022 г.

Председатель Ученого совета,  
директор САО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук

Ученый секретарь САО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук

  
 /Валявин Г. Г./

  
 /Кайсина Е. И./