

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук

На правах рукописи

УДК 524.882

Чмырёва Елизавета Георгиевна

**Поиск и исследование вероятных одиночных
черных дыр звездных масс в избранных
областях Галактики**

(01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Архыз – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Научный руководитель: **Бескин Григорий Меерович**
д.ф.-м.н., в.н.с. группы релятивистской астрофизики САО РАН

Официальные оппоненты: **Расторгуев Алексей Сергеевич**
д.ф.-м.н., зав. отд. изучения Галактики и переменных звезд ГАИШ МГУ

Шибанов Юрий Анатольевич
д.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории прикладной математики и математической физики ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южный федеральный университет"

Защита состоится “___”_____ 2022 года в “___” часов на открытом заседании диссертационного совета Д002.203.01 при САО РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан “___”_____ 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.203.01, к.ф.-м.н.

Шолухова О.Н.

Общая характеристика работы

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. Проводится оценка вероятности того, что найденные кандидаты ими являются. Обсуждаются перспективы обнаружения ЧД в различных поисковых программах.

Актуальность темы

Количество изолированных черных дыр (ЧД) звездных масс, согласно современным эволюционным сценариям, составляет приблизительно $\sim 10^8$ для нашей Галактики [1]. Родовым признаком ЧД является наличие горизонта событий. Другими словами, чтобы отождествить исследуемый объект с ЧД, необходимо получать информацию из областей непосредственно прилегающих к горизонту событий, что сделать крайне затруднительно [2]. Даже в выдающемся эксперименте по исследованию ЧД в ядре галактики M87, такого рода информация приходила из зоны, отстоящей от горизонта событий на $2.6 r_g$, где r_g – гравитационный радиус [3]. Как в ядрах галактик, так и в аккреционных дисках двойных систем с ЧД, области вблизи горизонта событий в значительной степени экранируются окружающим веществом. В случае же изолированных ЧД звездных масс, при малой плотности межзвездной среды и стандартной ее структуре, темп аккреции невысок ($10^{-6} - 10^{-9} \dot{M}_{Edd}$, где $\dot{M}_{Edd} \approx 10^{-8} \frac{M_{\odot}}{yr} (\frac{M}{M_{\odot}})$, а M – масса ЧД) [2] и реализуется ее сферический тип [4], причем аккреционный поток практически прозначен для излучения. Это позволяет регистрировать излучение, большая часть которого рождается непосредственно вблизи горизонта событий [5]. Таким образом, обнаружение изолированных ЧД звездных масс позволит исследовать процессы, происходящие именно в этих областях, что позволит протестировать теории гравитации и получить фундаментальную информацию об общей физике ЧД.

Цель и задачи работы

Целью работы является разработка метода поиска кандидатов в одиночные ЧД звездных масс среди галактических объектов и его использование в областях с повышенной вероятностью прямого детектирования излучения аккрецирующего на ЧД газа. К ним относятся окрестности гравлинз в событиях микролинзирования большой длительности и зоны распада двойных систем, состоящих из черной дыры и нейтронной звезды (радиопульсара). Также необходимо провести анализ возможности обнаружения ЧД в рамках различных поисковых программ. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Развитие метода локализации областей распада двойных систем с релятивистскими объектами по кинематике пульсаров: составление выборки пульсаров, пригодных для поиска ЧД, моделирование траекторий их движения в Галактическом потенциале, анализ их возрастов и вероятностей сближения с другими объектами в прошлом на малые расстояния.
2. Отбор кандидатов в ЧД в этих областях по критериям соответствия теоретическим проявлениям ЧД по астрометрическим, фотометрическим и спектральным данным в разных диапазонах длин волн и их кросс-отождествлению.
3. Исследование кандидатов: определение локальных свойств межзвездной среды в их окрестностях (плотности n , температуры T , скорости звука c_s); определение их светимостей L . Оценка допустимых интервалов параметров при которых наблюдаемые проявления соответствуют теоретическим для одиночных ЧД.
4. Определение вероятности принадлежности отобранных объектов к классу ЧД.
5. Оценка светимости излучения аккрецирующего вещества вероятной одиночной ЧД - гравитационной линзы MOA-2011-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462 [6]. Анализ возможности его прямого детектирования с помощью существующих и проектируемых инструментов.

Научная новизна работы

1. Впервые проведен массовый анализ 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, для которых вероятности общего происхождения существенно превышают опорные, полученные в предположении о чисто случайном сближении объектов.
2. Впервые разработан алгоритм 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 получить для них темп аккреции и светимость.
3. К качеству зон локализации вероятных одиночных ЧД были впервые исследованы области рождения 4 пульсаров. С помощью разработанной методики в них найдено 8 пекулярных объектов-кандидатов. Определены допустимые диапазоны их параметров и оценены вероятности их принадлежности к ЧД, а также вероятность того, что хотя бы один из найденных кандидатов является ЧД.
4. Для вероятной ЧД - микролинзы MOA-2011-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462 впервые получены оценки параметров межзвездной среды (плотности и температуры) в ее окрестности; на основании этих данных оценены темп аккреции \dot{m} межзвездного газа на ЧД, его светимость L и построен теоретический спектр его излучения в широком диапазоне частот. Проанализирована возможность прямого детектирования этого излучения.

Научная и практическая ценность

1. Разработанный алгоритм моделирования движения релятивистских объектов в прошлом позволяет локализовать места их рождения и оценить вероятность их гравитационной связи в тесных двойных системах.

2. Разработанный метод позволяет отбирать объекты-кандидаты в ЧД по фотометрическим, спектральным, кинематическим данным в разных диапазонах и получить допустимые диапазоны параметров для кандидатов (L , \dot{m} , m_V , M и скорости V) и межзвездной среды в их окрестности (n , T , c_s) в предположении, что они являются ЧД.
3. В выделенных областях рождения 4 пульсаров были найдены 8 пекулярных объектов-кандидатов в ЧД.
4. Развита метод определения степени соответствия наблюдательных характеристик кандидатов их теоретическим оценкам для одиночных ЧД.
5. Получены оценки параметров среды в области локализации вероятной ЧД - микролинзы MOA-2011-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462. На их основании построен теоретический спектр ее излучения в широком диапазоне частот. Показана возможность прямого детектирования ее излучения разных типов с помощью существующих и проектируемых инструментов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод поиска вероятных ассоциаций одиночных релятивистских объектов, входивших в состав распавшихся двойных систем, с использованием их кинематических характеристик. Обнаружение с высокой вероятностью их связи в 6 парах пульсаров и 2 парах пульсар - остаток сверхновой.
2. Методика отбора объектов-кандидатов в одиночные ЧД звездных масс по совокупности теоретически предсказанных для них наблюдательных проявлений. Формирование выборки этих объектов на основании кросс-отождествления баз данных в разных диапазонах.
3. Обнаружение 8 пекулярных объектов-кандидатов в одиночные ЧД в областях вероятного распада четырех двойных систем, состоящих из релятивистских объектов. Доказательство, что с вероятностью около $\sim 30\%$ хотя бы один из них является ЧД.

4. Теоретический анализ наблюдательных проявлений вероятной ЧД-микрولينзы MOA-191/OGLE-0462. Доказательство возможности прямого детектирования излучения аккрецирующего на нее газа в наблюдениях с помощью существующих и проектируемых телескопов разных диапазонов.

Апробация результатов работы

Результаты диссертации представлялись диссертантом в виде докладов на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. “Многоликая Вселенная: теория и наблюдения - 2022”, Нижний Архыз, САО-РАН, 23-27.05.2022 - устный доклад, “Пекулярные объекты в областях рождения радиопульсаров: кандидаты в черные дыры звездных масс”, Чмырёва Е.Г., Бескин Г.М.
2. “Всероссийская астрономическая конференция: Астрономия в эпоху многоканальных исследований”, Москва, ГАИШ МГУ, 23-28.08.2021 - стендовый доклад, “Пекулярные объекты из вероятных областей рождения радиопульсаров - кандидаты в черные дыры звездных масс”, Чмырёва Е.Г., Бескин Г.М.
3. “12th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics”, Врдник, Сербия, 03-07.06.2019 - стендовый доклад, “On some aspects of galactic featureless-spectrum sources”, L.Chmyreva, G. Beskin.
4. “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”, Москва, ИКИ РАН, 18-21.12.2018 - стендовый доклад, “Поиск одиночных черных дыр звездных масс - компонентов в распавшихся двойных системах”, Чмырёва Е.Г., Бескин Г.М.
5. “14th INTEGRAL/BART Workshop”, Карловы Вары, Чехия, 03-07.04.2017 - стендовый доклад, “Searching for isolated stellar-mass black hole candidates by analyzing the kinematics of their former companions in disrupted binary systems”, L.Chmyreva, G. Beskin, S.Karpov
6. “Физика звезд: от коллапса до коллапса”, Нижний Архыз, САО РАН, 05-07.10.2016 - стендовый доклад, “The search for isolated stellar-mass black hole candidates based on kinematics of pulsars

- their former companions in disrupted binaries”, L.Chmyreva, G. Beskin, V.Dyachenko
7. “IAU Symposium 324: New Frontiers in Black Hole Astrophysics”, Любляна, Словения, 12-16.09.2016 - стендовый доклад, “The search for isolated stellar-mass black hole candidates based on kinematics of pulsars - their former companions in disrupted binaries”, L.Chmyreva, G.Beskin, V.Dyachenko, S.Karpov
 8. “Всероссийская молодежная астрономическая конференция: Наблюдаемые проявления эволюции звезд”, Нижний Архыз, САО-РАН, 15-19.10.2012 - устный доклад, “Поиск компонентов распавшихся двойных систем (пар пульсар-пульсар и пульсар-SNR)”, Чмырёва Е.Г., Бескин Г.М., Бирюков А.В.
 9. “25th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics”, Гейдельберг, Германия, 06-10.12.2010 - стендовый доклад, “Search for pairs of isolated radio pulsars - components in disrupted binary systems”, G.Beskin, L.Chmyreva, A.Biryukov
 10. “25th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics”, Гейдельберг, Германия, 06-10.12.2010 - стендовый доклад, “Search for connections between isolated radio pulsars and supernova remnants”, G.Beskin, A.Biryukov, L.Chmyreva
 11. “Всероссийская астрономическая конференция: От эпохи Галилея до наших дней”, Нижний Архыз, САО-РАН, 13-18.09.2010 - устный доклад, “Изучение механизмов рождения радиопульсаров на основе их кинематических характеристик”, Чмырёва Е.Г., Бескин Г.М., Бирюков А.В.
 12. “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”, Москва, ИКИ РАН, 24-26.12.2008 - стендовый доклад, “Поиск пар одиночных радиопульсаров входивших в состав распавшихся двойных систем”, Чмырёва Е.Г., Бескин Г.М., Бирюков А.В.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации изложены в 6 работах, опубликованных в рецензируемых российских и зарубежных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. **Е.Г.Чмырева**, Г.М.Бескин: “О возможности прямого детектирования излучения микролинзы MOA-2011-BLG-191/OGLE-2011-BLG-0462 - вероятной черной дыры”, *Астрофизический бюллетень*, 77, 3, 250-257 (2022)
2. **L.Chmyreva**, G.Beskin “Peculiar objects in the birthplaces of radio pulsars — stellar-mass black hole candidates”, *Astrophysical Bulletin*, 77, 1, 65-77 (2022)
3. **L.Chmyreva**, G.Beskin: “On the possible connection between galactic featureless-spectrum sources and stellar-mass black holes”, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, 50, 1, 235-243 (2020)
4. **L.Chmyreva**, G.Beskin, S.Karpov: “Searching for isolated stellar-mass black hole candidates by analyzing the kinematics of their former companions in disrupted binary systems”, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso*, 47, 137-142 (2017)
5. **L.Chmyreva**, G.M.Beskin, A.V.Biryukov: “Search for possible connections between isolated radio pulsars and supernova remnants”, *Astrophysical Bulletin*, 67, 2, 160-176 (2012)
6. **L.Chmyreva**, G.M.Beskin, A.V.Biryukov: “Search for pairs of isolated radio pulsars - components in disrupted binary systems”, *Astronomy Letters*, 36, 2, 116-133 (2010).

Другие работы, опубликованные автором по теме диссертации:

7. **L.Chmyreva**, G.Beskin: “Peculiar objects in the probable pulsar birthplaces — stellar-mass black hole candidates”, *Proceedings of the VAK-2021 conference*, 262 (2021)
8. **L.Chmyreva**, G.Beskin, V.Dyachenko, S.Karpov: “The search for isolated BH candidates based on kinematics of pulsars - their former companions in disrupted binaries”, *IAU Symposium proceedings*, 324, 39-40 (2017)
9. **L.Chmyreva**, G.M.Beskin, V. Dyachenko: “The search for isolated stellar-mass black hole candidates based on pulsar kinematics”, *ASP Conference Series*, 317, (2017)

10. G.Beskin, **L.Chmyreva**, A.Biryukov: “Search for pairs of isolated radio pulsars - components in disrupted binary systems”, Proceedings of the 25th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics (2010)
11. G.Beskin, A.Biryukov, **L.Chmyreva**: “Search for connections between isolated radio pulsars and supernova remnants”, Proceedings of the 25th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, (2010).

Личный вклад автора

В перечисленных работах автору принадлежат:

- В работах [5,6,10,11]: отбор пар пульсаров и пар пульсар-остаток сверхновой; моделирование траекторий и определение вероятности связи совместно с соавторами. Обсуждение результатов и подготовка статей с соавторами.
- В работах [2,3,4,7,8,9]: формирование выборки радиопульсаров, определение областей их рождения. Отбор кандидатов в ЧД и вычисление n , T , c_s , L , m_V . Анализ соответствия наблюдательных характеристик теоретическим и определение вероятностей совместно с соавторами. Обсуждение результатов и написание статей с соавторами.
- В работе [1]: Определение параметров (L , \dot{m} , m_V , V , n , T , c_s) ЧД-микрولينзы MOA-191/OGLE-0462. Построение теоретического спектра. Сопоставление с чувствительностью разных инструментов. Совместное с соавторами написание статьи.

Структура и объем диссертации

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

Во **введении** обсуждается актуальность обнаружения одиночных ЧД. В отличие от ЧД в рентгеновских двойных системах, где горизонт событий (родовой признак ЧД) экранируются аккреционным диском, в случае одиночной ЧД аккреция является сферической, что позволяет наблюдать излучение, генерируемое на расстоянии $1-2 r_g$. Поэтому важно обнаружение именно одиночных ЧД звездных масс,

поскольку в этом случае может быть реализована возможность исследовать области в непосредственной близости горизонта событий, что позволило бы протестировать теории гравитации и получить фундаментальную информацию о физике ЧД. Формулируются цели и задачи работы, описывается ее научная новизна и практическая ценность, а также основные положения, выносимые на защиту. Приводится список публикаций, содержащих основные результаты исследования и описывается их апробация.

В **первой главе** содержится изложение общей проблемы обнаружения изолированных черных дыр звездных масс. Описывается текущее состояние развития данной темы в астрофизике, приводится описание трудностей, связанных с реализацией задачи, а также достигнутые на сегодняшний день результаты. Обсуждаются методы и программы поиска одиночных черных дыр. 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. Обсуждается возможность выделения в пространстве областей, где вероятность нахождения таких объектов повышена: окрестностей гравлинз в событиях микролинзирования большой длительности, а также зон распада двойных систем, состоящих из ЧД и нейтронной звезды (пульсара). Так как подавляющее большинство массивных звезд рождается в двойных и кратных системах, то вероятность обнаружить одиночную ЧД в областях распада таких систем относительно высока.

Во **второй главе** описывается установление вероятной гравитационной связи между парами релятивистских объектов в прошлом. Помимо определения места распада системы (места рождения пульсара), это позволило оценить лучевые скорости объектов, их настоящие возраста и кинематику разлета. Из базы данных ATNF¹ выделяются пары молодых пульсаров с хорошо измеренными кинематическими данными и расстояниями, на небольшом удалении друг от друга, с малой разницей возрастов. Также рассматриваются пары пульсар - остаток сверхновой. Для них моделируются траектории движения в галактическом потенциале и анализируются их сближе-

¹<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/expert.html>

ния в прошлом на временах, согласованных с возрастом более молодого объекта в паре. С помощью опорных вероятностей, вычисленных в предположении о чисто случайном сближении объектов на малые расстояния (с учетом распределения пульсаров в Галактике и их независимых скоростей), оцениваются достоверности связи этих объектов при их общем происхождении в тесных двойных системах. По результатам работы выделено 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 сверхновой (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 в прошлом были гравитационно связаны, учитывая особенности оценки их кинематических характеристик и возрастов.

В **третьей главе** проводится поиск одиночных черных дыр 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, строились наборы траекторий с различными реализациями начальных скоростей. Они прослеживались в прошлое на время, соответствующее характеристическим возрастам пульсаров. Конечные точки траекторий определяли в пространстве трехмерную область их предполагаемого рождения (зону распада системы). Области рождения четырех пульсаров (J0139+5814, J0922+0638, J0358+5413, J1935+1616) с наиболее точными характеристиками были отобраны для поиска кандидатов в ЧД (Рис.1).

В этих зонах исследовались пекулярные объекты как с жесткой спектральной составляющей, так и без нее, чьи наблюдательные проявления соответствовали теоретически ожидаемым для одиночной ЧД. Для отбора кандидатов использовались данные фотометрии, спектроскопии, астрометрии, расстояния и морфологии в разных диапазонах частот. Используемые базы данных включают ROSAT²,

²<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/rosat/rosat.html>

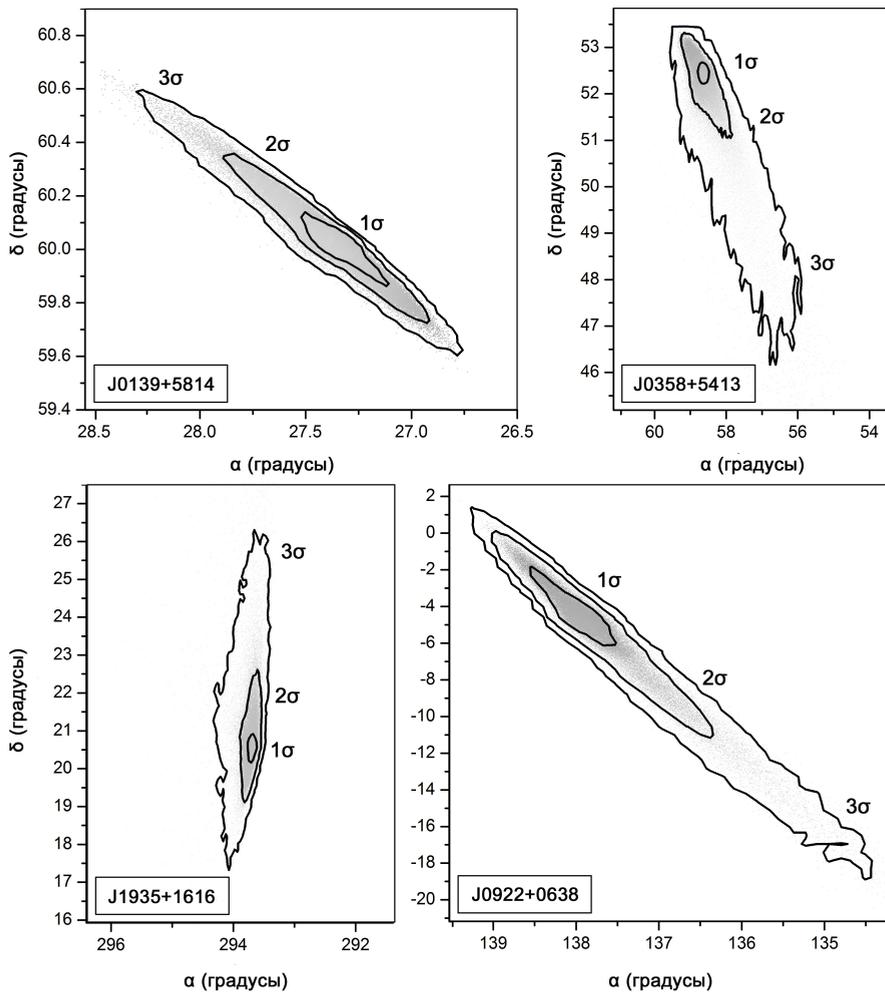


Рис. 1: Проекция на небесную сферу областей рождения пульсаров J0139+5814, J0358+5413, J1935+1616 и J0922+0638, где проводился поиск кандидатов в ЧД. Координаты приведены в градусах. Серые точки представляют собой конечные точки смоделированных траекторий движения пульсаров, соответствующие их характеристическим возрастам. Контуры уровней 1, 2 и 3- σ выделены черным.

FERMI³, XMM-Newton⁴, FIRST⁵, SDSS⁶, DSS⁷, GAIA⁸. По резуль-

³<https://fermi.gsfc.nasa.gov/>

⁴<https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton>

татам процедуры найдено 9 кандидатов в ЧД.

В **четвертой главе** проводится анализ наблюдательных характеристик кандидатов и оценивается вероятность того, что они являются ЧД. Данные о межзвездном покраснении [7] позволили получить оценку столбцовой концентрации водорода в направлении 9 кандидатов, вошедших в итоговую выборку. Производная этой величины по расстоянию дает для кандидатов локальные плотности межзвездной среды n , которые вычислялись как средневзвешенные значения в диапазоне допустимых расстояний. Полученные значения плотности позволили оценить температуру среды в областях локализации кандидатов по эмпирической зависимости $T(n)$ [8]. Скорости звука были получены с использованием этих значений. Эти оценки были использованы для определения светимостей и видимых величин кандидатов. На основании классических соображений об аккреционных механизмах [9, 4], теоретическую светимость одиночной ЧД в режиме сферической аккреции можно представить в виде [2]:

$$L = 9.6 \times 10^{33} M_{10}^3 n^2 (V^2 + c_s^2)_{16}^{-3} \text{ эрг с}^{-1}, \quad (1)$$

где M_{10} – масса ЧД в единицах $10M_{\odot}$, n – плотность среды в единицах см^{-3} , а V и c_s – полная пространственная скорость ЧД и скорость звука, нормированные на 16 км с^{-1} .

Для оценки соответствия диапазонов параметров, полученных для кандидатов, ожидаемым у одиночных ЧД, используются распределения масс M и скоростей V для популяции одиночных ЧД из распавшихся двойных систем в стандартной модели эволюции населения диска Галактики [1]. Эти распределения были преобразованы в двумерную плотность вероятности, на которую были нанесены интервалы допустимых значений параметров, полученных для 9 отобранных кандидатов (Рис.2). Размеры этих областей зависят от неопределенности оценок параметров. Интегрирование в пределах допустимых значений показало, что у восьми 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) вероятности принадлежности к ЧД лежат в интервале 1.2-13.9%, а вероятность присутствия

⁵<http://sundog.stsci.edu/>

⁶<https://www.sdss.org/>

⁷<https://irsa.ipac.caltech.edu/data/DSS/>

⁸<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia>

среди них хотя бы одной ЧД составила 36%. Обнаружение сверхбыстрой переменности у кандидатов позволило бы однозначно отнести их с черным дырам.

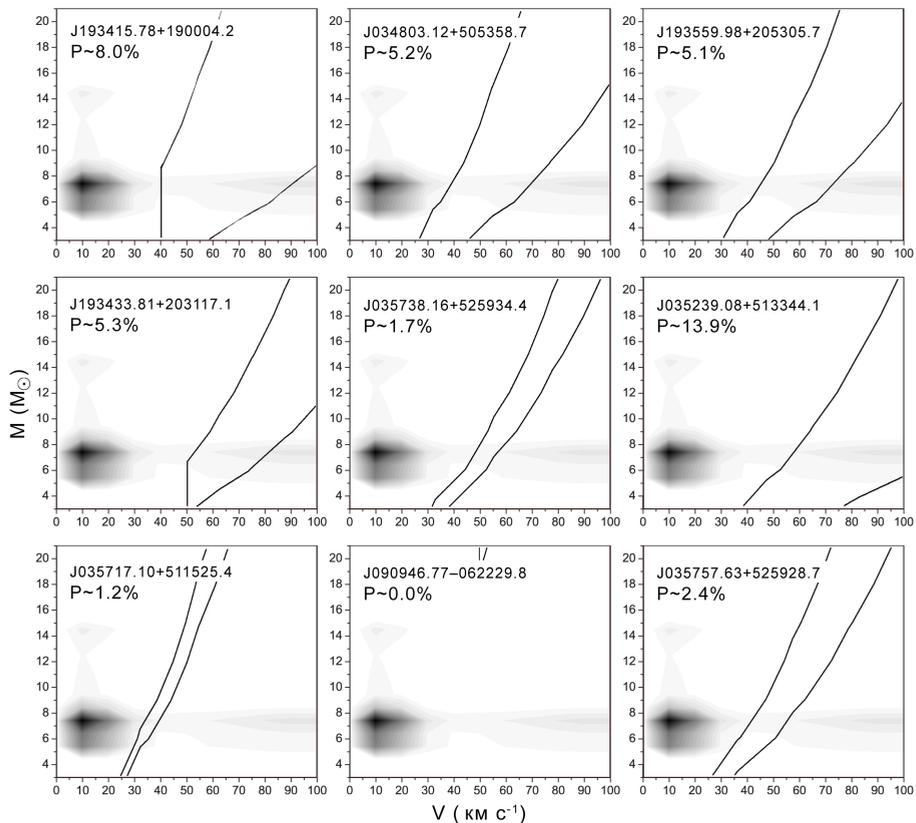


Рис. 2: Плотность вероятности для масс M и скоростей V теоретических одиночных ЧД. Более темная градация серого соответствует наиболее вероятным значениям. Диапазоны параметров полученные для девяти кандидатов, при которых наблюдаемые характеристики согласуются с теоретическими, показаны очерченными полосами. Слева полосы ограничены минимальными значениями скоростей, соответствующими наблюдаемой поперечной скорости V_{tr} каждого объекта. Вероятности того, что кандидат является ЧД, указаны в левом верхнем углу каждой панели.

В пятой главе рассматривается вероятная одиночная ЧД MOA-191/OGLE-0462, обнаруженная методом микролинзирования [6]. С

помощью известных данных о ее координатах, массе и поперечной скорости, определяются параметры межзвездной среды в ее окрестностях (плотность, скорость звука, температура) и темп аккреции. Ее светимость составила 5.14×10^{29} эрг с^{-1} , а оценка видимой величины - приблизительно 28^m . Построен ее теоретический спектр в модели сферической аккреции и оценивается предполагаемый уровень вспышек в жестом диапазоне - он составил 5.5% потока. Проведено сравнение построенного спектра с чувствительностью существующих и будущих телескопов и миссий в различных диапазонах. Оценки показывают, что прямое детектирование излучения этого объекта доступно для ряда новых инструментов, таких как SKA, JWST, TMT, GMT, ELT, Athena, Миллиметрон (Рис.3). Стационарное излучение представляется возможным наблюдать в радио, оптическом и рентгеновском диапазонах, слабые вспышки - в оптике и в рентгене, а самые мощные короткие вспышки - во всем диапазоне частот кроме гамма. Критическим экспериментом является обнаружение и исследование таких вспышек - это позволит сделать вывод о том, что у объекта есть горизонт событий, т.е. он является черной дырой.

В заключении подводятся итоги и обсуждаются основные результаты, полученные в рамках данного исследования. Также обсуждается планируемый следующий этап работы - составление трехмерной карты распределения зон, где возможно наблюдение проявлений горизонта событий.

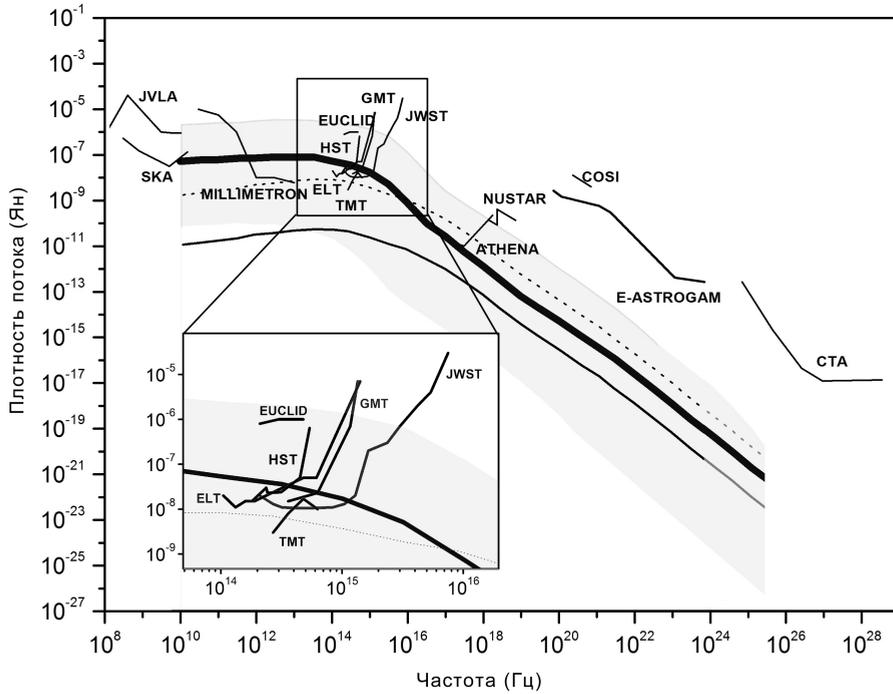


Рис. 3: Теоретический спектр черной дыры с параметрами MOA-11-191/OGLE-11-0462: $M=7.1\pm 1.3 M_{\odot}$, $D=1.58\pm 0.18$ кпк, $V_{tr} \sim 45$ км с⁻¹, $n=0.7\pm 0.4$ см⁻³, $T=6350\pm 4189$ К, $c_s=6.8\pm 3.6$ км с⁻¹, $L = 5.14^{+0.72}_{-0.70} \times 10^{29}$ эрг с⁻¹, $\dot{m} = 1.19^{+5.35}_{-0.80} \times 10^{-7}$. Показана плотность потока в янских в зависимости от частоты в герцах, серая область ограничивает полный диапазон ее значений, соответствующий интервалам значений характеристик объекта и межзвездной среды. Толстая черная линия показывает спектр при $V=60$ км с⁻¹ ($m_V = 27.87$). Максимальная амплитуда (5.5%) возможных вспышек показана тонкой линией, пунктир показывают ее неопределенность сверху. Также показаны предельные чувствительности будущих и функционирующих наблюдательных миссий в разных диапазонах. Оптическая область выделена отдельно для наглядности.

Список литературы

- [1] Grzegorz Wiktorowicz, Łukasz Wyrzykowski, Martyna Chruslinska, Jakub Klencki, Krzysztof A. Rybicki, and Krzysztof Belczynski. Populations of Stellar-mass Black Holes from Binary Systems. *ApJ*, 885(1):1, November 2019.
- [2] G. M. Beskin and S. V. Karpov. Low-rate accretion onto isolated stellar-mass black holes. *A&A*, 440(1):223–238, Sep 2005.
- [3] Event Horizon Telescope Collaboration. First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. *ApJ*, 875(1):L1, April 2019.
- [4] V. F. Shvartsman. Halos around “Black Holes”. *Soviet Ast.*, 15:377, Dec 1971.
- [5] G. Beskin, A. Biryukov, S. Karpov, V. Plokhotnichenko, and V. Debur. Observational appearances of isolated stellar-mass black hole accretion Theory and observations. *Advances in Space Research*, 42(3):523–532, August 2008.
- [6] Kailash C. Sahu, Jay Anderson, Stefano Casertano, Howard E. Bond, Andrzej Udalski, and et al. An Isolated Stellar-Mass Black Hole Detected Through Astrometric Microlensing. *arXiv e-prints*, page arXiv:2201.13296, January 2022.
- [7] Gregory M. Green, Edward Schlafly, Catherine Zucker, Joshua S. Speagle, and Douglas Finkbeiner. A 3D Dust Map Based on Gaia, Pan-STARRS 1, and 2MASS. *ApJ*, 887(1):93, December 2019.
- [8] N. G. Bochkarev. *The interstellar medium and star formation*, pages 265–325. 1981.
- [9] H. Bondi and F. Hoyle. On the mechanism of accretion by stars. *MNRAS*, 104:273, January 1944.

Чмырёва Елизавета Георгиевна

Поиск и исследование вероятных одиночных черных дыр звездных
масс в избранных областях Галактики

Подписано в печать _____ . Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл.печ.л.1. Тираж 100 экз.

Типография _____