

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ
НА ДИССЕРТАЦИЮ ЧМЫРЕВОЙ ЕЛИЗАВЕТЫ ГЕОРГИЕВНЫ
«Поиск и исследование вероятных одиночных черных дыр звездных масс в избранных
областях Галактики»

Черные дыры (ЧД) являются идеальными полигонами для тестирования релятивистских теорий гравитации, поскольку лишь в их окрестностях в зонах предельно сильных гравитационных полей расхождения в предсказаниях этих теорий становятся обнаружимыми.

В то же время собственно существование черных дыр как особых топологических образований, лишенных поверхности и ограниченной полупроницаемой мембраной («горизонтом событий»), является необходимым атрибутом лишь некоторых «выживших» (согласно тестам в слабых полях) теорий гравитации. Обнаружение проявлений именно горизонта событий в особых свойствах генерируемого в его окрестности излучения аккрецируемой черной дырой межзвездной плазмы является *experimentum crucis*. Речь идет о регистрации всплесков электромагнитного излучения различных частот, чьи характеристики несут информацию о структуре пространства-времени в непосредственной окрестности горизонта событий (поверхности компактного объекта в некоторых альтернативных теориях гравитации), тем самым позволяя доказать его наличие или отсутствие.

Однако как в ядрах галактик, так и в тесных двойных системах с дисками, эти прилежащие к горизонту событий зоны в значительной степени экранируются аккрецирующим веществом. В случае же изолированных ЧД звездных масс при малой плотности межзвездной среды и стандартной ее структуре, темп аккреции невысок и реализуется ее сферический тип, причем аккреционный поток практически прозачен для излучения. Это позволяет регистрировать излучение, большая часть которого рождается непосредственно вблизи горизонта событий, и доказать или опровергнуть его существование, а также протестировать теории гравитации.

Таким образом, обнаружение одиночных черных дыр звездных масс является исключительно важной задачей современной астрофизики. Начальным этапом ее решения является широкий круг исследований, предваряющих проведение собственно *experimentum crucis*, — анализ возможных наблюдательных проявлений таких черных дыр, определение областей в Галактике, где вероятность регистрации этих проявлений повышена, развитие методов выбора объектов-кандидатов на основе изучения существующих баз данных пекулярных источников излучения различных диапазонов, оценка вероятности отождествления кандидатов с черными дырами и возможности в некоторых случаях прямого обнаружения излучения аккрецирующего на черную дыру вещества с помощью существующих и создаваемых инструментов.

Этим исследованиям посвящена кандидатская диссертация Елизаветы Георгиевны Чмыревой.

На основе существующих представлений о физике черных дыр диссертантка обобщила основные наблюдательные проявления этих объектов. К ним относятся излучение в широком диапазоне частот (от ИК до гамма), нетепловой спектр без линий, оптический блеск в интервале от 16 до 25 зв. вел. (при расстоянии до объекта 100-300 пк), стохастические вариации блеска на временах от часов до лет, значимое собственное движение и, наконец, главный отличительный признак черной дыры звездной массы - стохастическая сверхбыстрая переменность в диапазоне от микро- до миллисекунд. Обсуждается возможность выделения в пространстве Галактики областей, где вероятность локализации таких объектов повышена, а именно, окрестностей объектов-гравитационных линз 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.

Чтобы определить их локализацию Елизавета Георгиевна разработала метод моделирования траекторий движения одиночных радиопульсаров из этих областей с использованием современных кинематических параметров и характеристических возрастов. Для его тестирования были рассмотрены пары пульсаров в контексте их возможной гравитационной связи в прошлом. Помимо определения места распада системы (места рождения пульсаров), оценивались лучевые скорости объектов, их реальные возрасты и кинематика разлета. У нескольких пар из базы данных ATNF моделировались траектории движения в галактическом потенциале и анализировались их сближения в прошлом на временах, согласованных с возрастом более молодого пульсара. С помощью опорных вероятностей, определенных в предположении о чисто случайном сближении объектов на малые расстояния (с учетом распределения пульсаров в Галактике), оценены достоверности связи этих объектов при их общем происхождении в тесных двойных системах. В конечном итоге были выделены 6 пар пульсаров и 2 пары пульсар-остаток сверхновой, чьи сближения на малые расстояния в прошлом нельзя считать случайными, а следовательно, есть основания полагать, что они были гравитационно связаны.

Разработанный метод был использован для поиска областей вероятной локализации объектов-кандидатов в одиночные черные дыры. В выборке одиночных радиопульсаров 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 предполагаемого рождения (зону распада системы), а следовательно, местонахождение ЧД — бывших компаньонов этих пульсаров. В четырех установленных таким путем зонах исследовались пекулярные объекты как с жесткой компонентой спектра, так и без нее, чьи наблюдательные характеристики соответствовали теоретически предсказанным для одиночной ЧД. При отборе кандидатов использовались данные фотометрии, спектроскопии, астрометрии, оценки расстояний и морфологические характеристики объектов в разных диапазонах частот из баз данных ROSAT, FERMI, XMM-Newton, FIRST, SDSS, DSS, GAIA. В конечном итоге были выделены 9 кандидатов в ЧД с блеском 19-21 зв. величина.

Отличительной (и исключительно важной!) особенностью исследования Е.Чмыревой является анализ наблюдательных характеристик отобранных кандидатов и оценка вероятности их близости к ожидаемым у одиночных ЧД звездных масс. Данные о межзвездном покраснении позволили получить оценки столбцовой концентрации водорода в направлении на 9 кандидатов, вошедших в итоговую выборку, локальные плотности и температуры газа в их окрестностях. Эти значения, оценки скоростей и расстояний, а также распределения масс и скоростей для популяции одиночных ЧД из распавшихся двойных систем в стандартной модели эволюции населения диска Галактики были использованы при оценке вероятности соответствия наблюдаемых характеристик кандидатов и их теоретических значений у ЧД. Эти вероятности лежат в интервале от 1.2 до 13.9%, а вероятность присутствия среди них хотя бы одной ЧД составила 36%. Этот вывод обосновывает необходимость активных наблюдений по поиску сверхбыстрой переменности у отобранных объектов.

Как еще одна астрономическая ситуация, в которой прямое обнаружение горизонта событий является возможным, диссертантка рассмотрела событие микролинзирования с участием вероятной одиночной ЧД MOA-191/OGLE-0462. С помощью известных данных о

ее координатах, массе и поперечной скорости, определяются параметры межзвездной среды в ее окрестностях (плотность, скорость звука, температура), темп аккреции и светимость. Построен 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 создаваемых инструментов в различных диапазонах. Оценки показывают, что прямое детектирование излучения этого объекта возможно с помощью ряда новых инструментов, таких как SKA, JWST, TMT, GMT, ELT, Athena, Миллиметрон. 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.

Результаты, полученные Е.Г. Чмыревой являются абсолютно новыми и в определенной степени неожиданными. Развитый ею подход к поискам ЧД вселяет надежду на их уверенное обнаружение и возможности прямых исследований экстремальных гравитационных полей. Они обсуждались на 12 международных и всероссийских конференциях, опубликованы в 11 статьях, 6 из которых входят в список ВАК. Таким образом научная и практическая ценность диссертации Е.Г.Чмыревой не вызывает сомнений.

В процессе подготовки диссертации Е.Г.Чмырева проявила себя в качестве творческого, очень работоспособного, сформировавшегося исследователя, способного ставить и решать оригинальные задачи.

Считаю, что диссертационная работа Е.Г.Чмыревой «Поиск и исследование вероятных одиночных черных дыр звездных масс в избранных областях Галактики» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия.

Научный руководитель,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник САО РАН

 Г.М.Бескин

Подпись Г.М. Бескина заверяю:
Ученый секретарь САО РАН,
кандидат физико-математических наук





Е.И. Кайсина