

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Чмырёвой Елизаветы Георгиевны

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

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия

Чёрные дыры (ЧД) звёздных масс являются конечным продуктом эволюции звёзд, начальная масса которых превышает 25-30 солнечных. Мало того, что такие звёзды и сами по себе весьма редки – их жизнь до взрыва Сверхновой типа II/Ib/c очень коротка, она не превышает 4-5 млн лет. В нашей и других близких галактиках счёт этих объектов идёт на немногие десятки, возможно, сотни. Однако знание надёжной статистики самых массивных звёзд исключительно важно для глубокого понимания процессов звездообразования и определения его ключевых параметров, таких как начальная функции масс и история звездообразования; выявления физических свойств межзвёздной среды, из которой рождаются эти звёзды, а также для оценки эффективности её обогащения тяжёлыми химическими элементами и интерпретации процессов химической эволюции Галактики. Логично предположить, что важный вклад в статистику самых массивных объектов может внести успешный поиск ЧД звёздных масс. В настоящее время внимание исследователей в основном привлекают двойные системы с компактными компонентами, где ЧД обнаруживают себя благодаря особенностям процессов дисковой аккреции. Кроме того, именно в двойных системах проще всего можно оценить нижний предел массы компактного компонента и более или менее надёжно классифицировать его как чёрную дыру. Надо отметить, что в изучении ЧД есть ещё один немаловажный астрофизический аспект, связанный с горизонтом событий. Считается, что именно у одиночных ЧД благодаря почти сферической аккреции межзвёздного вещества наблюдения позволят «увидеть» излучение, исходящее непосредственно из области вблизи горизонта событий и существенно уточнить наше понимание релятивистской физики ЧД. Эти обстоятельства позволяют считать направление исследований, развитое в диссертации Е.Г. Чмырёвой – а именно разработку и применение методов поиска одиночных чёрных дыр звёздных масс – **актуальным и перспективным.**

В рецензируемой диссертации решаются следующие связанные между собой важные задачи: разработка методов поиска ЧД в тех областях Галактики, где происходит взрывной распад двойных систем с релятивистскими компонентами; отбор найденных кандидатов в

ЧД по теоретическим критериям и всей совокупности наблюдательных данных; детальное астрофизическое исследование кандидатов в ЧД. Основная идея работы проста: если в какой-то области массивного звездообразования рождались пульсары, вполне можно ожидать, что там рождались и ЧД. Диссертация состоит из Введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Во **Введении** даётся краткий обзор проблемы, ставятся задачи исследования, обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются новизна результатов и научно-практическая значимость работы. Перечисляются выносимые на защиту результаты и положения. Даётся краткое содержание глав диссертации, представлен список публикаций и конференций с участием автора и описан личный вклад автора в совместные работы. **В первой главе** – «Проблема обнаружения черных дыр» – представлено современное состояние проблемы, обсуждаются характерные наблюдательные фотометрические и спектральные признаки одиночных ЧД, а также вероятные области их локализации, связанные с распадом двойных и кратных звёзд с релятивистскими компонентами. Показано, что излучение одиночных ЧД должно характеризоваться непрерывным спектром в широком диапазоне от гамма- и рентгена до NIR и милли-микросекундной переменностью (к слову, на основе идей В. Шварцмана поиск таких быстрых вариаций давно ведётся в САО РАН с помощью прибора МАНИЯ). Анализируются сценарии образования одиночных ЧД. При распаде двойной системы за счёт значительной эволюционной потери масс и эффекта пращи ЧД может приобрести скорость в десятки км/с, что делает возможным поиск ЧД в массивных областях звездообразования как слабых в оптике объектов с относительно большими собственными движениями в каталогах миссии GAIA. Обосновывается методика поиска ЧД на типичных расстояниях в несколько пк от мест вылета нейтронных звёзд. **Во второй главе** – «Метод локализации областей распада двойных систем с нейтронными звездами и черными дырами по кинематике пульсаров» – с использованием экстраполяции траекторий молодых пульсаров в прошлое (метод кинематической ассоциации) находятся возможные области распада двойных и кратных систем с релятивистскими компонентами и выделяется 6 пар пульсаров как кандидатов в ранее гравитационно-связанные системы. Вероятность тесного сближения пульсаров в прошлом (до 1-2 млн лет назад) оценивалась методом Монте-Карло моделирования их траекторий в принятом гравитационном потенциале Галактики на разных расстояниях от её центра. Проведён анализ связи минимального расстояния между пульсарами в прошлом и вероятности соответствующего случайного события; результаты расчётов приведены в таблице 2.3 и представлены в графическом виде. Показано отсутствие значимой корреляции между кинематической и «характеристической» оценкой возраста пульсаров. Автор весьма детально описывает «кухню» вычислений,

математические процедуры и использованные методы. Кроме того, по той же методике проанализированы возможные кинематические связи пульсаров со старыми остатками Сверхновых. Более или менее уверенно можно говорить о реальности связи двух пар «пульсар – остаток Сверхновой». Автор диссертации считает, что и поиск ЧД в областях распада двойных систем с помощью такого же метода является весьма перспективным.

Третья глава диссертации названа «Поиск кандидатов в одиночные ЧД в местах рождения пульсаров» и посвящена использованию метода кинематической ассоциации уже для выделения объектов – кандидатов в ЧД. Предполагается, что полное число одиночных ЧД в Галактике велико и может составлять порядка 100 млн, что делает их поиски оправданными. В этой главе на основе ряда фотометрических и спектральных критериев из первоначально большой выборки «подозрительных» объектов оставлено девять пекулярных объектов, ассоциируемых с четырьмя областями рождения молодых (менее 1 млн лет) пульсаров, найденных по кинематике пульсаров. Для этого использованы наблюдательные данные, полученные наземными и космическими обсерваториями в рентгеновском и оптическом диапазонах, а также астрометрические данные миссии GAIA. **В четвёртой главе** – «Анализ наблюдательных проявлений кандидатов в ЧД» – оцениваются физические параметры межзвёздной среды вблизи найденных кандидатов в ЧД и их светимости в предположении сферической аккреции. Полученные оценки автор сравнила с тем, что даёт популяционный синтез населения одиночных ЧД, представленный в недавней интересной работе Wiktorowicz et al. (2019). На этой основе вероятность наличия хотя бы одной ЧД среди 9 кандидатов оценена в 36%, что можно рассматривать как весьма оптимистический результат. **В пятой главе** – «Возможность прямого детектирования излучения ЧД MOA-191/OGLE-0462» – представлен очень «свежий» материал, опубликованный в препринтах arXiv в 2022 г. и непосредственно связанный с темой диссертации. Речь идёт об открытии явления гравитационного микролинзирования, где масса невидимой линзы оценивается в (7.1 ± 1.3) солнечных (Sahu et al. 2022). Исходя из большой массы, этот объект рассматривается в качестве вероятного кандидата в одиночные ЧД. В рамках теории сферической аккреции для интервала значений параметров межзвёздной среды в диссертации сделана оценка её светимости, спектра и обсуждаются возможности будущих прямых наблюдений ЧД на крупных телескопах (в оптике объект слабее 28 mag). **В Заключении** суммируются основные результаты работы. В диссертации 114 страниц текста; в списке литературы 130 наименований.

Характеризуя кандидатскую диссертацию Е.Г. Чмырёвой в целом, отмечу, что она представляет собой законченное исследование, в котором решен ряд актуальных задач, связанных с поиском и исследованием одиночных ЧД. Предложена универсальная методика,

которая может быть использована для решения этих задач и в других областях Галактики. С моей точки зрения представляется перспективным её применение к богатым звёздным ОБ-ассоциациям, для значительной части которых по данным миссии GAIA определены кинематические возрасты и, следовательно, «места рождения» массивных звёзд. Автором диссертации Е.Г. Чмырёвой **впервые** разработан эффективный алгоритм поиска «мест обитания» одиночных ЧД, проведены поиски кандидатов в ЧД в этих областях, разработаны критерии классификации изучаемых объектов на основе вероятностного подхода и сделаны оценки их фотометрических потоков. Уверен, что разработанная в диссертации методика даст ценный исходный материал для наблюдений одиночных ЧД на крупнейших наземных телескопах недалёкого будущего, таких как E-ELT, TMT, LSST и космических телескопах Миллиметрон и JWST. Совершенно очевидно, что полученные в диссертации результаты отличаются **новизной и оригинальностью** и имеют большое **теоретическое и практическое значение**. Автор диссертации обнаружила отличное знание современного состояния проблемы, она прекрасно владеет методами теоретической астрофизики и проявила себя как сложившегося специалиста в области релятивистской астрофизики и астрофизики чёрных дыр; она также хорошо знакома с современным наблюдательным материалом для релятивистских объектов, охватывающих диапазон от гамма- и рентгена до ИК. **Достоверность** результатов диссертации обеспечена чёткостью и логикой постановки задач исследования, умением использовать наблюдательные данные, адекватностью применения методов теоретической астрофизики и статистических методов анализа данных, а также публикацией результатов в рецензируемых журналах.

Должен сделать ряд замечаний по рецензируемой работе. Часть из них носит чисто редакторский характер, другие требуют уточнить некоторые аспекты работы, а некоторые можно рассматривать как советы на будущее. Заранее скажу, что эти замечания ничуть не влияют на общую высочайшую оценку диссертации.

- 1) На стр. 20 упоминаются «континуальные спектры»; здесь же есть опечатки в фразе «сверх быстрой переменностью», а на стр. 39 в слове «осмысленны».
- 2) В главе 2 на стр. 26 принято значение расстояния 8.5 кпк до центра Галактики, взятое из относительно старого учебника Михаласа и Бинни (1981). Следовало бы сослаться на более современные работы, в т.ч. основанные на изучении движений звёзд вблизи СМЧД в центре Млечного Пути, где расстояние несколько меньше (8.1-8.3 кпк); впрочем, это вряд ли влияет на результаты диссертации. То же самое относится к выбору вида гравитационного потенциала Галактики из старых работ (1987-1989 г.), хотя можно было бы найти и более современные подходы, например, заложенные в Безансонскую модель Галактики (Robin et al. 2003).

3) Фрагмент раздела 3.2 (стр. 71) во многом повторяет содержание подраздела 2.1.2.1. Возможная область рождения пульсара J0922+0638, в отличие от трёх других, показанных в таблице 3.1 и на рисунке 3.1, лежит высоко над галактической плоскостью ($l \sim 235^\circ$, $b \sim +29^\circ$), где вряд ли следовало ожидать наличия следов молодых объектов; тем не менее, как указано в разделе 3.3.1, в эту область попало чуть ли не рекордное число «подозрительных» объектов (87 рентгеновских, 257 радио- и 2 гамма-источника). Это противоречие следовало бы обсудить отдельно.

4) В разделе 3.3.2 (и также в таблице 4.1) автор не указывает, что за расстояния GAIA использованы для отбраковки объектов («наивные» оценки вида $1/\pi^2$, Байесовские геометрические или фотогеометрические расстояния или что-то другое). Там же приводится спорное утверждение, что малое собственное движение (менее ~ 2 мсд/год) не даёт основания считать эти объекты галактическими. Это не совсем так, поскольку дисперсия скоростей (соответственно и компонентов собственных движений) даже в диске Галактики велика и во многих областях галактики включает и нулевые значения.

5) На левом рисунке 4.1 по горизонтальной оси отложен модуль расстояния, но в качестве единиц измерения на оси почему-то указаны парсеки, а не звёздные величины.

6) Хотелось бы, чтобы для читателя – не специалиста в теории аккреции автор пояснила, насколько движение ЧД со скоростью, достигающей 100 км/с (рисунок 4.3) меняет свойства излучения ЧД в рамках модели сферической аккреции.

7) Первая статья из списка работ автора приведена на стр. 10 в русском варианте, тогда как вторая – в английском, хотя обе они опубликованы в *Астрофизическом Бюллетене*.

Диссертация хорошо оформлена, написана ясным языком, читается с большим интересом; её структура логична и хорошо продумана. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации. Все результаты диссертации, выносимые на защиту, изложены в шести статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертаций, а также в пяти трудах конференций международного уровня; они докладывались на 12 конференциях. Отмечу, что в большинстве публикаций Е.Г. Чмырёва является первым автором. Личный вклад автора в совместные работы чётко обозначен. Полученные в работе результаты могут быть востребованы в астрономических учреждениях России, таких как СПбГУ, МГУ, ЮФУ, УФУ, ИНАСАН, ИКИ РАН, АКЦ РАН, САО РАН и др., а также за рубежом.

Диссертация Е.Г. Чмырёвой «Поиск и исследование вероятных одиночных черных дыр звездных масс в избранных областях Галактики» удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым ВАК при Минобрнауки РФ (согласно критериям п.9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого

постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013 г.), а её автор, Елизавета Георгиевна Чмырёва, безусловно, заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия.

Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом изучения Галактики и переменных звёзд Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова)

Расторгуев Алексей Сергеевич

02 сентября 2022 г.

Почтовый адрес:

119234, Москва, Университетский проспект, д.13,

Государственный астрономический институт

имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова

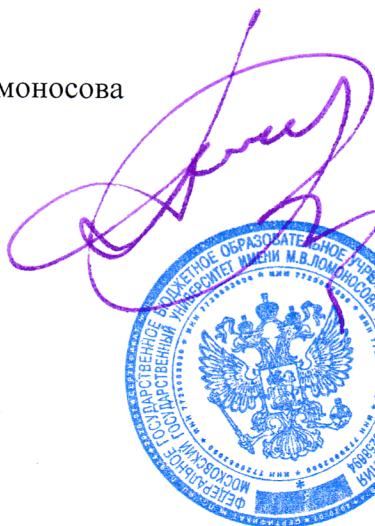
Телефон: +79165705693

Эл. адрес: alex.rastorguev@gmail.com

Подпись А.С. Расторгуева заверяю.

Директор ГАИШ МГУ имени М.В. Ломоносова

член-корреспондент РАН



К.А. ПОСТНОВ