

ПОИСК И ОТКРЫТИЕ ЧЕРНЫХ ДЫР ПРОМЕЖУТОЧНЫХ МАСС ПРИ ПОМОЩИ КРУПНЫХ НАЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ И ДАННЫХ ВИРТУАЛЬНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ



ГОРАДЖАНОВ Владимир Сергеевич¹,

ТОПТУН Виктория Алексеевна¹,

ЗОЛОТУХИН Иван Юрьевич,

доктор физико-математических наук

КАТКОВ Иван Юрьевич²,

кандидат физико-математических наук

ЧИЛИНГАРЯН Игорь Владимирович³,

доктор физико-математических наук

*Государственный астрономический институт
им. П. К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова*



DOI: 10.7868/50044394820050011

Что такое черные дыры промежуточных масс? Наблюдаемые сегодня черные дыры принято класси-

фицировать по их массе на три типа. Первый тип – это черные дыры звездных масс. Массы таких черных дыр ле-

¹ Также *физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.*

² Также *Нью-Йоркский университет в Абу-Даби, ОАЭ.*

³ Также *Астрофизическая обсерватория Смитсоновского института, США.*



Сверхмассивная черная дыра в центре молодой галактики в представлении художника. Рисунок NASA

жат в пределах около 3–100 солнечных масс, и сценарий их образования хорошо изучен. Второй тип – сверхмассивные черные дыры, имеющие массу, в миллионы и миллиарды раз превышающую солнечную. Третьим типом являются черные дыры промежуточных масс. Именно они будут рассматриваться в этой статье.

Вопрос о том, как формируются сверхмассивные черные дыры, наблюдающиеся в центрах многих галактик, в том числе и Млечного Пути, остается открытым до сих пор. Из моделирования: черной дыре с начальной массой в 50 масс Солнца не хватит и миллиарда лет, чтобы набрать массу вплоть до миллиарда солнечных масс, т. к. существует предельная скорость падения массы на черную дыру, определяемая эддингтоновской светимостью аккреционного диска. Это говорит о том, что существование черных дыр массой более миллиарда масс Солнца в ранней Вселенной в случае их образования посредством простой аккреции вещества возможно только в случае очень большой, сверхэддингтоновской скорости аккреции. Данную проблему могут решить другие гипотезы. Одна из гипотез гласит, что сверхмассивные черные дыры могут образовываться из огром-

ных газовых облаков на заре формирования Вселенной. Еще один вероятный сценарий – формирование сверхмассивных черных дыр непосредственно в результате слияния менее массивных черных дыр, которые тяжелее типичных черных дыр звездных масс, но существенно более легкие, чем сверхмассивные черные дыры, вместе с аккрецией вещества на них. Иными словами, одновременная аккреция материи на черные дыры и их слияние также могли бы объяснить существование сверхмассивных черных дыр на больших красных смещениях. В результате этого выдвинуто предположение о существовании еще одного типа черных дыр – черных дыр промежуточных масс. Эти черные дыры имеют массу порядка 100–100 000 масс Солнца. Они слишком массивны, чтобы образоваться в результате гравитационного коллапса одиночной звезды, но при этом слишком легкие, чтобы считаться сверхмассивными. Раньше такие объекты считались гипотетическими, но сейчас открыты уже сотни кандидатов в черные дыры промежуточных масс, что подтверждает подобный сценарий формирования сверхмассивных черных дыр.

К настоящему моменту существуют три основных гипотезы формирования черных дыр промежуточных масс. Первая предполагает образование черных дыр промежуточных масс в результате слияния нескольких черных дыр звездных масс. Важное свидетельство в пользу этой гипотезы поступило от гравитационно-волновой обсерватории LIGO. В 2016 г. эта обсерватория объявила о первом обнаружении гравитационных волн⁴. Детекторы уловили сигнал от слияния двух

⁴ См. ст. B.P. Abbott (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // Physical Review Letters: Journal. 2016. Vol. 116. No. 6.

черных дыр, массы которых – 29 и 36 солнечных масс. Хотя масса возникшей черной дыры недостаточна, чтобы отнести ее к черной дыре промежуточных масс – всего 62 массы Солнца, – это многообещающий результат. Помимо этого, есть все основания полагать, что черные дыры промежуточных масс формируются в плотных ядрах шаровых скоплений посредством слияния звезд и последующего коллапса. На основе этого предположения долгое время проводились наблюдательные кампании, нацеленные на поиск признаков черных дыр в центрах звездных скоплений, однако они не давали положительных результатов. Третья гипотеза гласит, что черные дыры промежуточных масс могут являться результатом слияний первичных черных дыр или непосредственно самими первичными черными дырами, образованными в момент начала расширения Вселенной.



Один из детекторов LIGO. Фото LIGO

НАБЛЮДАЕМЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА

Поиск кандидатов в черные дыры промежуточных масс – непростая задача. Сверхмассивные черные дыры могут иметь вокруг себя аккреционные диски – плотные газовые диски, которые в результате трения и непрерывного падения на черную дыру выделяют колоссальное количество энергии. Эта энергия высвечивается в виде теплового излучения крайне высокой температуры, поэтому регистрация рентгеновского излучения является весомым аргументом в пользу наличия аккрецирующего диска черной дыры. Такое

явление называется активностью ядра галактики.

Первые свидетельства существования черных дыр промежуточных масс были получены в двух независимых исследованиях Д. Кунта⁵ и А. Филлипенко в конце 1980-х гг⁶. В исследовании были измерены звездные массы двух карликовых галактик с активными ядрами: Rox 52 – карликовой эллиптической галактики и NGC4395 – спиральной галактики низкой светимости. Звездные массы этих галактик приблизительно в миллиард раз превышают солнечную, а значения масс центральных черных дыр в них оцениваются в 300 000 масс Солнца. Однако сейчас эти черные дыры классифицируются как сверхмассивные из-за слишком большой массы.

⁵ Kunth, D. et al. A spectroscopic survey of emission-line objects in two fields // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. Vol. 44. May 1981. P. 229–239.

⁶ Fillipenko, Alexei V., Ho, Luis C. A Low-Mass Central Black Hole in the Bulgeless Seyfert 1 Galaxy NGC4395 // *The Astrophysical Journal*. Vol. 588. Iss. 1. P. L13–L16.



Галактика ESO 243–49. Кругом отмечен объект HLX-1 – первая подтвержденная черная дыра промежуточных масс. Фото Hubble

Один из первых кандидатов в черные дыры промежуточных масс – HLX-1 (Hyper-Luminous X-ray source 1). Австралийский астроном Шон Фаррелл в 2009 г. с помощью обсерватории XMM-Newton Европейского космического агентства обнаружил этот объект на окраинах галактики ESO 243-49⁷. В результате проведенных исследований в 2012 г., использующих космический телескоп имени Хаббла и обсерваторию *Swift*, также было обнаружено свидетельство наличия скопления молодых голубых звезд вокруг этого объекта. Это скопление напоминает околоядерное скопление, которое обычно существует вокруг центральных черных дыр в ядрах галактик. Возможно, когда-то HLX-1 был центром галактики-карлика, которую поглотила большая галактика ESO 243-49.

В связи с тем, что аккреционный поток не является постоянным, парциальность падающей на черную дыру материи вызывает некоторые вариации в световом потоке от черной дыры.

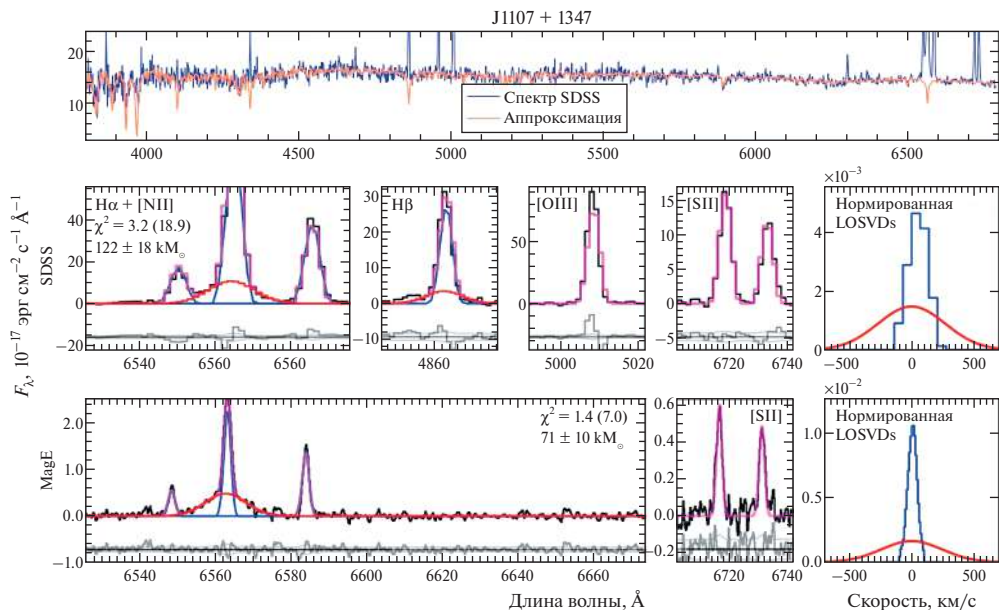
⁷ Farrell, Sean A. et al. An intermediate-mass black hole of over 500 solar masses in the galaxy ESO243-49 // *Nature*. Vol. 460. Iss. 7251. P. 73–75 (2009).

Подобные вариации потока проще зарегистрировать от черных дыр малой массы. Переменность блеска свойственна самому яркому рентгеновскому источнику галактики M82 – M82 X-1. Изменение яркости согласуется с предсказанием модели переменности блеска черной дыры промежуточных масс. Эти изменения яркости зависят от массы черной дыры и вызваны движением материи аккреционного диска. В результате исследования, проведенного в 2014 г. по архивным данным спутника НАСА Rossi X-Ray Timing Explorer (RXTE), в котором были рассмотрены конкретные вариации яркости рентгеновского излучения, было установлено, что масса M82 X-1 составляет около 400 масс Солнца. Однако проведенные в 2020 г. исследования с помощью одновременных наблюдений на обсерваториях *Chandra* и *NuSTAR*, описанные в работе Брайтмана и коллег⁸, показывают, что M82 X-1 не является черной дырой промежуточных масс.

В 2018 г. в результате долгих исследований нашей научной группой была опубликована статья “A Population of Bona Fide Intermediate-mass Black Holes Identified as Low-luminosity Active Galactic Nuclei”⁹, в которой представлена обработка данных обзора SDSS (Sloan Digital Sky Survey). Два наблюдаемых феномена позволяют находить центральные черные дыры в большом числе галактик и оценивать их массы: (1) высокие скорости вращения или дисперсии скоростей звезд и газа в околоядерных областях галактик; (2) активность ядер галактик и явление квазаров, причиной появления которых является падение вещества из аккреционного диска на черную дыру. В результате обработки,

⁸ Brightman, Murray et al. Spectral Evolution of the Ultraluminous X-Ray Sources M82 X-1 and X-2 // *The Astrophysical Journal*. Vol. 889. Iss.1. Id. 71.

⁹ *The Astrophysical Journal*. 863 (1): 799–808.



Пример обработки методом NBursts спектра галактики J1107+1347 из каталога SDSS, а также декомпозиции эмиссионных линий

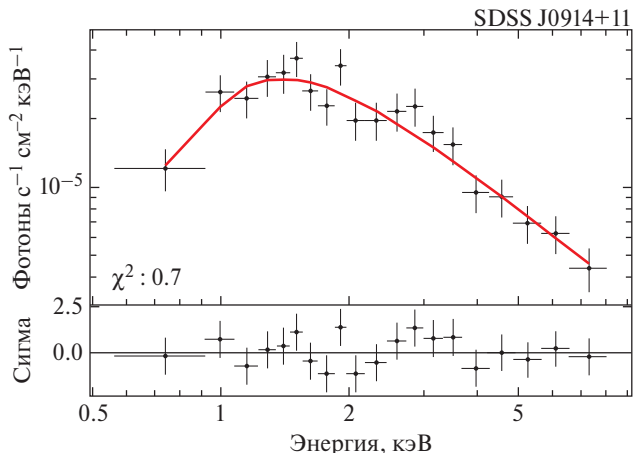
принципиальные элементы которой будут изложены ниже, нами было выявлено 305 кандидатов в черные дыры промежуточных масс в ядрах галактик, что является на сегодняшний день самой большой подобной выборкой. По новым данным обзора SDSS, вышедшим в конце 2018 г., нами были найдены еще несколько десятков кандидатов в черные дыры промежуточных масс.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

В XXI веке технологическое и инструментальное развитие приводит к высокому росту объемов получаемых астрономических данных. В результате лишь малая часть получаемой информации детально анализируется и в дальнейшем используется в исследованиях. Например, при наблюдении конкретного, интересующего объекта, в поле зрения телескопа может попасть еще некоторое число объектов, которые в данном исследовании не ис-

пользуются. В связи с этим данные наблюдений необходимо делать публично открытыми для ученых и организовать удобную инфраструктуру доступа к ним. Для хранения, систематизации и последующей обработки наблюдательных данных используются каталоги и архивы. Потенциал существующих астрономических архивов и баз данных для совершения открытий реализован не полностью. В современной астрономии существует международная инициатива Виртуальной Обсерватории, заключающаяся в наиболее удобной систематизации уже имеющихся астрономических данных.

Благодаря наблюдениям, полученным из обзора SDSS, а именно спектрам галактик, и проводя последующую обработку этих спектров, нашей научной группой был создан спектрофотометрический каталог галактик RCSED (<http://rcsed.sai.msu.ru/>), включающий в себя около 800 тысяч спектров галактик. Первая версия каталога



Пример спектра рентгеновского излучения. Красная линия – его аппроксимация

RCSSED была опубликована в 2017 г. и сейчас ведется активная разработка второй. Используя специальный разработанный нами метод NBursts для определения параметров галактик по их спектрам, у сотен тысяч галактик были определены такие параметры, как: красное смещение, дисперсия скоростей, средний возраст звезд, содержание тяжелых элементов, энергетические потоки в эмиссионных линиях и многое другое.

После определения параметров хозяйской галактики косвенно измеряется масса центральной черной дыры. С помощью нашего метода анализа оптических спектральных линий мы можем оценить массу черной дыры, аккреция на которую и порождает феномен активности ядра.

Рентгеновское излучение, порождаемое активным ядром галактики, ионизирует газ в радиусе нескольких килопарсеков от источника этого излучения. Вокруг черной дыры с аккрецирующим горячим диском, испускающим рентгеновское излучение, обращаются плотные облака газа, переизлучающие рентгеновское излучение

в эмиссионных линиях в оптическом диапазоне. Таким образом, в спектре галактики появляются яркие эмиссионные линии. Близкие к центру облака вирилизированы и обладают большими скоростями: сотни-тысячи км/с. Они по эффекту Доплера образуют в оптических эмиссионных линиях водорода широкие компоненты. Поэтому эта область называется областью формирования

широких линий. Характерный размер этой области – 0.01 парсек, т. е. около 2000 а.е. По ширине и потоку таких широких разрешенных рекомбинационных линий можно оценить вириальную массу черной дыры. Более далекие от источника ионизирующего излучения облака, вращающиеся с существенно меньшими скоростями, образуют эмиссионные линии, которые благодаря эффекту Доплера уширены незначительно. Регионы, в которых находятся такие облака, называются областями узких линий. Размеры этих областей – порядка 100 парсек. Мы поставили важную задачу – отделить узкий компонент эмиссионной линии от широкого компонента.

Помимо наблюдаемых рекомбинационных эмиссионных линий водорода обнаруживаются также и запрещенные линии, такие как: дважды ионизованного кислорода (яркий дуплет 495.9 нм и 500.7 нм), единожды ионизованного азота (дуплет 654.8 нм и 658.3 нм) и единожды ионизованной серы (дуплет 671.6 нм и 673.1 нм). Несмотря на то что облака газа являются плотными, запрещенные линии в них все равно наблюдаются, так как плотности облаков недостаточно, для того чтобы происходило ударное снятие возбуждения ионов.

Предполагается, что аккреционный диск вокруг центральной черной дыры окружен пылевым тором, из-за ориентации которого можно наблюдать либо только области узких линий, либо одновременно области узких и широких линий. Согласно исследованиям Тристрама и Шартмана, этот тор имеет радиус вплоть до 20 парсек¹⁰. В случае одновременного наблюдения этих областей активные ядра галактик принято классифицировать как тип I. Если же из-за ориентации пылевого тора наблюдаются только области узкой линии, такие активные ядра галактик классифицируют как тип II. Для определения массы центральной дыры, как писалось выше, необходимым условием является наличие в спектре широкой компоненты эмиссионной линии. Таким образом, интересующий нас тип активных ядер галактик – это тип I.

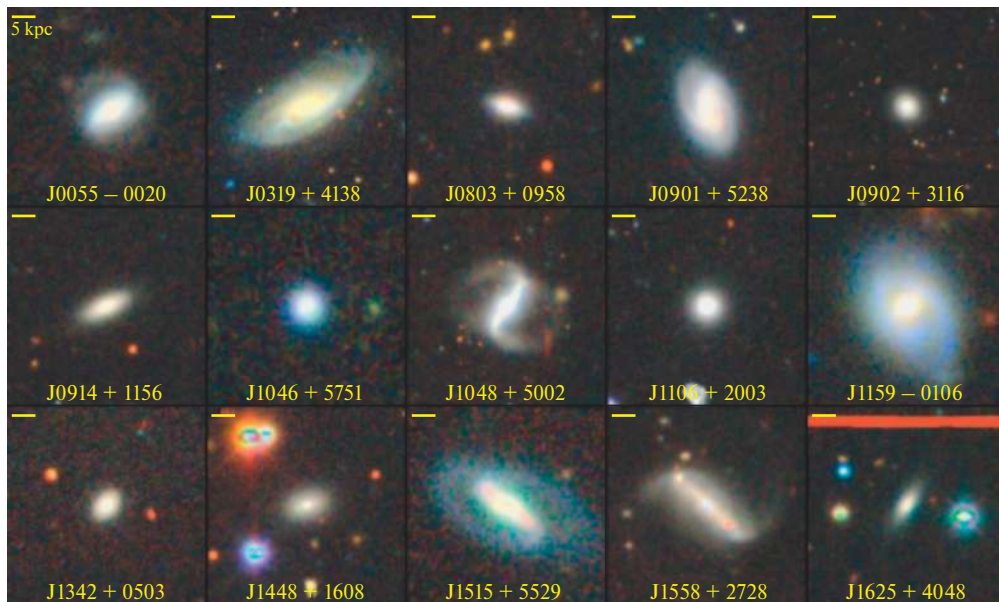
Для разделения узкого и широкого компонента эмиссионных линий используется разработанный нами метод непараметрического анализа узкого компонента. В результате такого модельного описания узкой компоненты эмиссионной линии разность между реальным спектром и его аппроксимацией оказывается минимальной в линиях серии Бальмера. Также этот метод позволяет выделить более слабые широкие компоненты эмиссионной линии. После выделения широкой и узкой компонент мы вычисляем отношение потоков узких компонент эмиссионных линий: $[OIII]/H\beta$ и $[NII]/H\alpha$. Используя ВРТ-анализ (Baldwin-Phillips-Terlevich), мы определяем в каких галактиках из нашего набора причиной ионизации является активное ядро, а в каких – звез-

дообразование. Отобрав только галактики, у которых ионизация происходит от активного ядра, мы оценили их массы. После применения фильтра, отсеивающего галактики с центральными черными дырами, имеющими массу более чем 200 тысяч масс Солнца, галактики, имеющие спектры с низким отношением сигнал/шум, и галактики со статистически незначимыми измерениями в целом, а затем отфильтровав выборку по относительной силе и ширине узких и широких компонентных линий, мы получили 305 кандидатов в черные дыры промежуточных масс. В отличие от других подобных работ по поиску черных дыр промежуточных масс, мы искали кандидаты в черные дыры промежуточных масс сразу в большом массиве из 800 тысяч галактик, а затем выделяли наиболее успешные кандидаты согласно описанному выше фильтру.

Используя спектральные данные, полученные в 2018 г. из каталога SDSS проекта eBOSS (Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey), мы обработали выборку из 154 тысяч галактик и по изложенному выше принципу нашли еще 18 кандидатов в черные дыры промежуточных масс.

После того как кандидаты в черные дыры промежуточных масс найдены, необходимо проверить, действительно ли они являются черными дырами промежуточных масс. Подтверждение таких кандидатов – следующая важная задача в изучении этих крайне редких объектов. Так как черные дыры промежуточных масс являются активными ядрами галактик, испускающими мощное рентгеновское излучение, наличие этого излучения является критерием достоверности кандидата. Поэтому нам необходимо измерить рентгеновскую светимость, регистрируемую рентгеновскими орбитальными обсерваториями. В начале проводится проверка на наличие

¹⁰ Tristram, K. R. W.; Schartmann, M. On the size-luminosity relation of AGN dust tori in the mid-infrared // *Astronomy & Astrophysics*. Vol. 531. Id. A99. P. 9.



Новые галактики, центральные черные дыры которых являются подтвержденными кандидатами в черные дыры промежуточных масс

найденных кандидатов в рентгеновских обзорах неба. Основная проблема состоит в том, что на данный момент рентгеновскими наблюдениями покрыта малая часть неба – всего несколько процентов, так как существующие рентгеновские обсерватории ориентированы на детальные наблюдения за конкретными источниками, а не на широкомасштабные обзоры. Для получения данных мы использовали каталоги и архивные наблюдения обсерваторий *XMM-Newton*, *Chandra*, *Swift* и *ROSAT*, а также наши собственные наблюдения на *Chandra* и *XMM-Newton*.

Основной задачей является определение светимости интересующих объектов. Однако стоит помнить, что в рентгеновском диапазоне светимость галактики складывается не только из излучения аккреционного диска центральной черной дыры, но и из излучения звездного населения галактики. Из старого звездного населения

в рентгене излучают маломассивные рентгеновские двойные. Время жизни этих объектов очень велико, поэтому их количество, а значит, и общий вклад в светимость галактики – пропорционально количеству старых звезд. Другой источник рентгеновского излучения в галактиках относится к молодому звездному населению – это массивные рентгеновские двойные. Из-за их малого времени жизни количество таких двойных связано с темпом звездообразования. Таким образом, зная суммарную массу звездного населения и темп звездообразования из каталога GSWLC, можно рассчитать рентгеновскую светимость звездного населения галактики. Если полученная рентгеновская светимость из наблюдений превышает рассчитанную светимость от звездообразования, то еще одним источником рентгеновского излучения является аккреционный диск центральной черной дыры галактики.

Как показал Питер Фриман¹¹, помимо светимости, если источник достаточно яркий в рентгеновском диапазоне, можно также получить и его рентгеновский спектр. Форма спектра указывает на природу источника и подтверждает, что это не что иное, как излучение аккреционного диска черной дыры.

В результате описанной выше работы в статье 2018 г. наблюдениями в рентгеновском диапазоне были подтверждены, как достоверные, 5 новых черных дыр промежуточных масс. Для них были выполнены наблюдения второй эпохи спектроскопических оптических наблюдений на 6.5-метровом телескопе «Магеллан» в Чили в целях получения информации с большим спектральным разрешением. После редукции данных, полученных на спектрографе телескопа «Магеллан», мы извлекаем более подробную информацию об эмиссионных линиях спектров галактик с центральными черными дырами – кандидатами в черные дыры промежуточных масс. В связи с нашими новыми наблюдениями и публикацией новых рентгеновских каталогов, число подтвержденных кандидатов увеличилось на 15 объектов, что значительно увеличило выборку известных на данный момент достоверных черных дыр промежуточных масс.

На основе полученных результатов можно сделать выводы о возможных

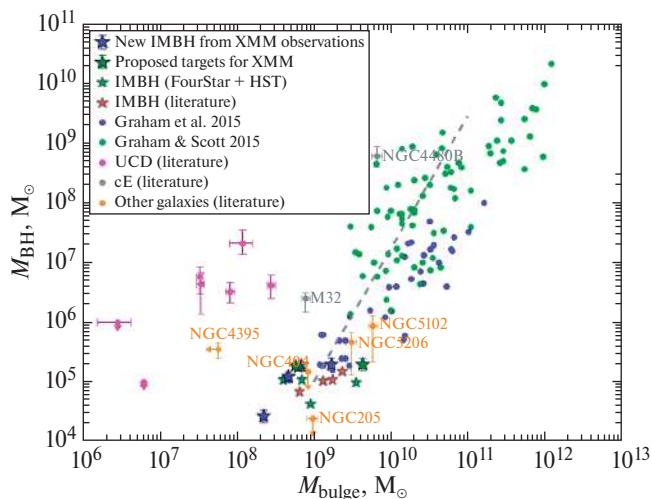


График зависимости массы центральной черной дыры галактики от массы балджа галактики. Нанесены как сверхмассивные черные дыры, так и описанные в работе черные дыры промежуточных масс. Синими звездами отмечены IMBH (Intermediate Mass Black Hole) – черные дыры промежуточных масс из каталога наблюдений XMM-Newton. Крупными зелеными звездами отмечены те черные дыры промежуточных масс, которые наблюдались нами на обсерватории XMM-Newton. Зелеными звездами меньше показаны кандидаты в черные дыры промежуточных масс, которые наблюдались нами на FourStar – одном из спектрографов телескопа Магеллан и HST (Hubble Space Telescope) – космическом телескопе имени Хаббла. Красными звездами отмечены уже известные черные дыры промежуточных масс, полученные другими исследованиями. Кружками помечены другие галактики

способах формирования сверхмассивных черных дыр. При помощи фотометрического моделирования снимков галактик и соотношения между их звездной массой и светимостью были получены массы балджей галактик. Это позволило построить зависимость массы центральной черной дыры от массы балджа галактики – и как видно на

¹¹ Freeman, Peter et al. Sherpa: a mission-independent data analysis application // Astronomical Data Analysis, Jean-Luc Starck; Fionn D. Murtagh; Eds. Proc. SPIE. Vol. 4477. P. 76–87.

графике, черные дыры промежуточных масс хорошо ложатся на зависимость, полученную для сверхмассивных черных дыр. То, что вместе с ростом центральных черных дыр наблюдается рост балджа, говорит о том, что наиболее вероятным механизмом образования сверхмассивных черных дыр являются слияния менее массивных черных дыр.

Помимо этого, нами было обнаружено, что у некоторых объектов из выборки черных дыр светимость в рентгеновском диапазоне очень велика – 7–10 % от предельной, эддингтоновской светимости. Если переводить это значение в болометрическую светимость, получится, что черная дыра излучает с максимально возможной мощностью, что говорит о невероятно сильном темпе аккреции, а значит, и о высокой скорости роста. Причины подобного эффекта все еще требуют размышлений.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Для того чтобы узнать больше о таких загадочных и при этом важных объектах, как черные дыры промежуточной массы, и их роли в формировании Вселенной (такой, какая она есть сейчас), необходимо расширять выборки кандидатов в черные дыры и выборки подтвержденных объектов.

В дальнейшем нами планируется глобальное расширение каталога RCSED, в который будут включены после обработки все спектры из обзора SDSS, а также спектры других массовых обзоров, таких как 2dFGRS, 6dFGS, ZTF, CFA, NESTOSPEC, LAMOST, LEGA-C, DEEP2, DEEP3, WIGGLEZ, GAMA DR3. Новая версия RCSED будет использовать улучшенный метод обработки спектров галактик NBursts, параметры будут определяться с большей точностью, а количество определяемых параметров возрастет: например, в результате обработки спектров будет определяться относительное

содержание альфа-элементов в галактиках. В результате RCSED2 будет представлять собой однородный каталог спектров галактик из множества каталогов, количество галактик увеличится в 6 раз и будет найдено куда больше кандидатов в черные дыры промежуточных масс.

В целях получения информации с большим спектральным разрешением для кандидатов в черные дыры промежуточных масс и проведения второй эпохи спектроскопических оптических наблюдений также планируется использовать двухлучевую спектрограф TDS Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ.

Кроме того, большой проблемой для подтверждения кандидатов в черные дыры является недостаток данных в рентгеновском диапазоне. Будет продолжена наша наблюдательная программа на рентгеновских орбитальных обсерваториях *XMM-Newton* и *Chandra*. Мы рассчитываем на получение данных еще как минимум для десяти объектов при помощи *XMM-Newton*. Мы регулярно подаем заявки на наблюдательное время на обсерватории *Chandra*, а полная выборка из 305 кандидатов в черные дыры промежуточных масс была принята *Chandra* для наблюдения нескольких объектов в год. Помимо этого, с недостатком данных в рентгеновском диапазоне в ближайшем будущем должна справиться российская орбитальная обсерватория «Спектр-РГ», запущенная летом 2019 г. и оснащенная двумя рентгеновскими телескопами: ART-XC (Россия) и eROSITA (Германия). В планы миссии входит обзор всей небесной сферы с высокой точностью – в мае 2020 г. обсерватория исследовала уже три четверти всего неба, захватила множество ранее неизученных областей. Благодаря данным, которые будут получены в результате работы этого проекта, количество подтвержденных кандидатов в черные дыры промежуточных масс увеличится в разы и даже в десятки раз.