УДК 524.882

КАТАЛОГ СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР ДЛЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2019 г. Е. В. Михеева^{1*}, В. Н. Лукаш^{1**}, С. В. Репин^{1***}, А. М. Малиновский^{1****}

¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия Поступила в редакцию 29.08.2018 г.; после доработки 10.10.2018 г.

В статье представлен каталог сверхмассивных черных дыр (СМЧД), предназначенный для интерферометрических наблюдений в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн и опирающийся на открытые источники. В каталоге даны название источника, координаты, расстояние по углу, масса, угловой размер, под которым виден гравитационный радиус СМЧД, интегральные потоки от радиоисточника, связанного с СМЧД, в диапазоне 20–900 ГГц, характерных для "Телескопа Горизонта Событий", планируемой космической обсерватории "Миллиметрон" и других миссий и проектов. Каталог предназначен для использования при планировании интерферометрических наблюдений теней СМЧД.

DOI: 10.1134/S0004629919030071

1. ВВЕДЕНИЕ

Черные дыры — один из интереснейших физических объектов во Вселенной. Возможность существования тел, поле тяготения которых столь велико, что даже свет не может покинуть их гравитационную "яму", впервые была рассмотрена Дж. Митчелом в 1783 г. В 1796 г. аналогичные рассуждения были высказаны П.С. Лапласом. Однако вплоть до создания релятивистской теории гравитации идея о существовании "темных звезд" носила умозрительный характер. С появлением общей теории относительности (ОТО) ситуация изменилась. Точное решение уравнения Эйнштейна для точечной массы было получено К. Шварцшильдом на рубеже 1915 и 1916 г. Весной 1916 г. то же самое решение было представлено в дипломной работе И. Дросте, чьим научным руководителем был Х. Лоренц, в виде, который позднее стал стандартным. Вскоре в 1918 г. Г. Райснером и Г. Нордстремом было найдено решение уравнения Эйнштейна для массивного тела с электрическим зарядом. Спустя много лет были найдены решения уравнений ОТО для массивного вращающегося тела (метрика Керра) и такого же тела с зарядом (метрика Керра-Ньюмена).

Параллельно с поиском точных решений уравнений ОТО шло осмысление того, что из себя

представляет тело, описываемое метрикой Шварцшильда (Керра и т.д.). С легкой руки известного острослова Дж.А. Уилера в 1967 г. для обозначения этих тел был предложен термин "черная дыра"¹. За объектами, описываемыми метриками Шварцшильда, Керра и пр. закрепились соответствующие названия: шварцшильдовская черная дыра, керровская черная дыра и т.д. Интересные факты по истории черных дыр можно найти в научно-популярной книге [1], очерках [2, 3] и рецензии [4].

В 1935 г. А. Эйштейном и Н. Розеном была рассмотрена структура, представляющая собой "сшивку" двух черных дыр на гравитационном радиусе (мост Эйнштейна-Розена). Целью создания этой конструкции было решить проблему сингулярности, т.е. избежать появления конфигураций с бесконечной кривизной. Позднее семейство черных дыр обзавелось новыми "родственниками": ими стали белые дыры [5], кротовые норы [6] и черно-белые дыры [7, 8].

Предлагаемая статья ставит своей целью не исследовать, что скрыто под горизонтом черных дыр, а представить разработанный для интерферометрических наблюдений компиляционный каталог известных черных дыр, расположенных в центральных областях галактик. Причина, по которой мы отдаем предпочтение сверхмассивным черным дырам (с массой более $10^4 M_{\odot}$) состоит в том, что

^{*}E-mail: helen@asc.rssi.ru

^{**}E-mail: lukash@asc.rssi.ru

^{****}E-mail: sergerepin10gmail.com

^{*****}E-mail: ingirami@gmail.com

¹Автором термина, по-видимому, является Анна Ивинг, использовавшая его еще в 1964 г. (см. [1], с. 152).

они представляют собой более удобный объект для наблюдений с бо́льшим угловым размером, чем у черных дыр звездных масс.

В настоящее время рассматриваются четыре способа возникновения черной дыры. Во-первых, черная дыра может появиться на финальной стадии эволюции массивной звезды. Такая звезда может принадлежать любому звездному поколению. Вовторых, черная дыра может возникнуть в результате нестабильности газа при прямом коллапсе. Третий путь связан с процессами звездной динамики в скоплениях звезд. Более детальное рассмотрение трех этих возможностей можно найти в [9]. Наконец, черная дыра может возникнуть в результате коллапса области повышенной плотности. В этом случае мы имеем дело с первичной черной дырой.

Широко известно, что черная дыра не излучает в окружающее пространство ничего, кроме излучения Хокинга, имеющего квантовую природу. Поэтому необходимо прояснить, какой смысл вкладывается в понятие "наблюдения черных дыр". На протяжении десятилетий под этим понималось излучение вещества, находящегося в гравитационном поле черной дыры. Конкретнее, это означает излучение, формирующееся внутри/вблизи джета и (или) аккреционного диска. В настоящее время под "наблюдениями черной дыры" понимают также исследования "тени" черной дыры, или ее "силуэта".

Вид тени черной дыры определяется несколькими параметрами. Два из них связаны с самой черной дырой. В рамках ОТО это масса и момент вращения. Остальные описывают источник рассеивающихся фотонов. Если это аккреционный диск, то важно распределение интенсивности по телу диска и угол между нормалью к диску и лучом зрения. Тем не менее для широкого диапазона параметров тень можно считать круглой, а ее диаметр аппроксимировать выражением (см. [10, 11])

$$\theta_{\rm shadow} \simeq 10.4 \frac{r_g}{D_A},$$
(1)

где r_g — гравитационный радиус (здесь $r_g \equiv GM/c^2$), D_A — расстояние (по угловому размеру) до черной дыры. Подставив в эту зависимость значения параметров, характерных для черных дыр звездных масс и черных дыр, расположенных в центральной части удаленной галактики, и сравнивая получившиеся θ_{shadow} , получаем, что тени СМЧД гораздо более надежны для наблюдений, чем тени черных дыр звездных масс. Для черной дыры, находящейся в центре нашей галактики, оценка углового размера тени составляет $\theta_{shadow} \simeq 53$ микросекунд дуги.

Расстояние по угловому размеру зависит от параметров космологической модели и достигает максимума $D_A \simeq 1750$ Мпк при $z \simeq 1.6$ для

значений постоянной Хаббла $H_0 = 70 \text{ км/(с-Мпк)}$, космологической плотности вещества $\Omega_m = 0.3$ и плотности Λ -члена 0.7. Задав угловой масштаб "Миллиметрона" (в интерферометрической моде) как угловой размер тени, можно вывести из (1), что "Миллиметрон" сможет детектировать все имеющиеся во Вселенной СМЧД с массой более $10^9 M_{\odot}$, при условии, что они достаточно ярки. Черные дыры такой массы можно назвать "гипермассивными". Конечно, детектированию на "Миллиметроне" будут доступны черные дыры и меньших масс, расположенные поблизости.

Несмотря на отсутствие опубликованных данных по наблюдениям теней черных дыр, их уже планируется использовать для тестирования ОТО в сильных гравитационных полях (см., например, [12]). Теорема "об отсутствии волос", очевидно, станет ключом к проверке ОТО. Особые надежды эксперты связывают с наблюдениями в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [10, 13]. При этом наблюдения в субмиллиметровом диапазоне имеют преимущество, связанное с тем, что с увеличением частоты уменьшается влияние процессов рассеяния на межзвездной/межгалактической среде [14], что крайне важно для восстановления изображения при интерферометрических наблюдениях.

2. СТРУКТУРА КАТАЛОГА СМЧД

К настоящему времени существует несколько каталогов СМЧД. К основным можно отнести работы [15–18]. Однако темп набора данных весьма велик и имеет смысл постоянно обновлять такие каталоги.

Содержательная часть и формат каталогов определяются задачами исследователей. Первоначальной целью создания нашего каталога был отбор СМЧД, тени которых могли бы быть разрешены при наблюдениях на космической обсерватории "Миллиметрон", что накладывает ограничения не только на угловой размер СМЧД, но также на их координаты и поток в частотных каналах "Миллиметрона". Таблица с 20 лучшими кандидатами для наблюдений содержится в [19].

Планируется, что обсерватория "Миллиметрон" будет работать в широких частотных диапазонах, центрированных на 22, 43, 100, 240 и 350 ГГц, а также, возможно, 600 и 800 ГГц [20]. По мере работы с материалом оказалось, что для большого числа СМЧД потоки излучения в этом диапазоне неизвестны, а для некоторых источников ближайшие наблюдательные точки отстоят по частоте на несколько порядков величины. По этой причине, а также ввиду возможного изменения орбиты "Миллиметрона", мы приняли решение составить возможно более полный каталог черных дыр, что и было выполнено.

В настоящее время наблюдения теней черных дыр планируются и на других телескопах. Наиболее перспективным является проект "Телескоп Горизонта Событий"², который представляет из себя несколько обсерваторий, работающих в режиме интерферометра. За счет большей площади приемных зеркал чувствительность такого интерферометра лучше, чем у "Миллиметрона", однако его разрешающая способность принципиально ограничена тем, что максимальная проекция базы наблюдений не превышает диаметра Земли. Таким образом, список доступных для наблюдений теней составляет всего несколько объектов. В первую очередь это черная дыра в центре Галактики, известная как источник Sgr A*, и активное ядро галактики М 87. Ожидаемые размеры двух этих теней различаются в два раза и составляют $\simeq 50$ и $\simeq 20$ мкс дуги.

Предлагаемый каталог черных дыр содержит 353 объекта, что гораздо больше, чем упомянутый нами предварительный список из 20 источников. Это связано как малыми угловыми размерами большей части известных СМЧД, так и с отсутствием какой-либо информации о потоках в субмиллиметровом диапазоне.

Каталог доступен на сайте Астрокосмического центра ФИАН³. Ниже описана схема организации каталога.

2.1. НАЗВАНИЕ ИСТОЧНИКА

В первом столбце приведено название источника, иногда два названия — для удобства поиска дополнительной информации по базам данных. Как видно из названий СМЧД, часть из них ядра близких галактик, часть — активные галактические ядра (квазары и сейфертовские галактики).

2.2. Масса СМЧД

Во втором столбце указана масса черной дыры в единицах $10^8 M_{\odot}$, мы называем эту величину "параметр массы".

Диапазон масс объектов довольно велик. Наиболее массивные, единичные СМЧД имеют параметр массы более 100, нижняя граница массы СМЧД, по определению, не ниже 10⁻⁴. Для ряда черных дыр имеется несколько измерений массы, которые разнятся между собой в несколько раз. Статистическая ошибка (в каталоге не указана) разнится от объекта к объекту и для большинства СМЧД составляет около 30%, для единичных объектов неопределенность измерений массы составляет несколько порядков величины. Для 15% СМЧД имеется только верхняя оценка массы.

На сегодняшний день существует несколько способов определения массы черной дыры: по динамике звезд, по газодинамике, по мазерам, реверберационный метод [11], и несколько статистических методов. В [11] был предложен еще один способ — по размеру тени черной дыры. По очевидной причине это метод еще ни разу не использовался.

Гистограмма на рис. 1 представляет распределение СМЧД по массе. Нормированное число СМЧД показано как функция параметра массы.

2.3. Расстояние до объекта

В третьем столбце каталога указано расстояние до объекта, выраженное в мегапарсеках.

Как известно, в космологии используется несколько типов расстояний: метрическое, по светимости, по угловому масштабу. Часто в каталогах указывается только красное смещение объекта. В каталогах СМЧД, как правило, тип представленного расстояния не указывается, но зачастую используется метрическое расстояние.

Наш каталог нацелен на наблюдения теней черных дыр. Таким образом, мы предпочитаем использовать расстояние по угловому масштабу, поскольку именно его мы берем для вычисления углового масштаба тени. Расстояние по угловому масштабу нетрудно вычислить, зная красное смещение источника излучения и задав космологическую модель. Мы использовали следующий набор параметров: величина постоянной Хаббла $H_0 = 70$ км/(с·Мпк), космологическая плотность вещества $\Omega_m = 0.3$, плотность Λ -члена $\Omega_{\Lambda} = 0.7$. Эти значения параметров несколько отличаются от так называемых "планковских" значений космологических параметров, но использовать последние было бы избыточной точностью.

Гистограмма на рис. 2 демонстрирует зависимость среднего внутри сферического слоя числа СМЧД как функцию расстояния по углу D_A . Шаг по расстоянию непостоянный (01–10, 10–25, 25– 50, 50–100, 100–150, 150–200, 200–300, 300– 500, 500–1000, 1000–1750 Мпк).

²Event Horizon Telescope, http://eventhorizontelescope.org. ³http://millimetron.ru/index.php/en/scientificprogram/thecatalog-of-supermassive-black-holes



Рис. 1. Нормированное число СМЧД как функция параметра массы.



Рис. 2. Осредненное по сферическому слою число СМЧД как функция расстояния по углу.

2.4. Угловой размер СМЧД

В четвертом столбце указан угол, выраженный в микросекундах дуги, под которым должен быть виден гравитационный радиус наблюдаемой черной дыры. Подчеркнем, что это именно гравитационный радиус в контексте выражения (1), а угловой диаметр тени примерно в 10 раз больше. Рис. 3 демонстрирует зависимость нормированного количества СМЧД по угловому размеру.

2.5. Координаты объекта

В пятом и шестом столбцах даны координаты координаты СМЧД в экваториальной системе координат на эпоху J2000. Для большинства источников мы ограничились точностью в секунду дуги. Этого более чем достаточно для определения проекции базы при планировании интерферометрических наблюдений теней.



Рис. 3. Нормированное число СМЧД как функция углового размера гравитационного радиуса.

2.6. Частота

В седьмом столбце приведены центральные частоты каналов (выраженные в ГГц), на которых проводились наблюдения СМЧД. Поскольку наш каталог "заточен" под интерферометрические наблюдения теней в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, где ожидается отсутствие значительного самопоглощения излучения, мы старались ограничиться диапазоном частот 22—800 ГГц. Однако для некоторых источников наблюдательных точек оказалось мало, в этом случае мы заносили в каталог данные по ближайшим частотам. Например, для источника PG 0052+251 в настоящее время не имеется наблюдательных данных в интервале 22—800 ГГц, так что мы приводим значения потоков для ближайших частот, 9 и 1764 ГГц.

2.7. Потоки излучения от СМЧД

В восьмой столбец занесены данные о величинах потоков излучения в обозначенных в седьмом столбце частотах, значения потоков выражены в Янских. Основным, но не единственным источником информации по потокам была общедоступная база данных NED⁴. Если для интересующего нас частотного канала проводилось несколько наблюдений (различающихся по времени и приемной аппаратуре), мы указывали диапазон наблюдавшихся величин. Следует отметить, что указанные потоки характеризуют не СМЧД, а охватывают гораздо большую по углу область. Причина этого очевидна — до сих пор мало какие объекты наблюдались в нужном нам частотном диапазоне с действительно маленьким, соответствующим размеру гравитационного радиуса СМЧД, разрешением. Поэтому реальное значение потока будет, безусловно, меньше.

2.8. Примечание

Последний столбец таблицы содержит ссылки на исходный каталог (каталоги) и/или статью.

3. ПОДКАТАЛОГИ

В табл. 1 и 2 мы приводим два дополнительных подкаталога для будущих интерферометрических наблюдений. Первый из них (табл. 1) содержит 25 самых массивных СМЧД, расположенных в порядке убывания массы. В табл. 2 перечислены 25 СМЧД с наибольшими угловыми размерами, расположенными также в порядке убывания углового размера. Несколько объектов входят в оба подкаталога.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из имеющихся данных, получение сколько-нибудь репрезентативного изображения тени черной дыры — весьма непростая задача: с одной стороны, необходимо, чтобы источник был достаточно ярким на частоте намеченных наблюдений, с другой стороны — его угловой масштаб должен быть в несколько раз больше углового разрешения интерферометра на этой же частоте.

⁴http://ned.ipac.caltech.edu/

Объект	$M, 10^8 M_{\odot}$	D_A , Мпк	Δ , мкс дуги	α hms	δ • / //	u, ΓΓι	Поток, Ян	Ссылка
S5	400	1531	0.26	00 17 08.5	+81 35 08	15	0.47-0.916	[21]
0014+81						30-31	0.63-1.4	
H1821+643	300	912(z)	0.32	18 21 57.3	$+64\ 20\ 36$	93	0.01	[22]
						1800	1	
APM	230	1447(z)	0.16	08 31 41.7	+524518	100	0.001	[23]
08279 + 5255	100	1447(z)	0.07			250	0.034	[24]
IRAS F						300	0.06	
08279 + 5255						660	0.34	
						857	0.386	
NGC 4889	210	103	2.01	13 00 08.13	+27 58 37.2	2.4	0.001	[16]
	209	102	2.02			3000	< 0.069	[17, 18]
SPT-CL	200	1374	0.15	23 44 42.2	-424308	1000	0.02	[25]
J2344-4243								
SDSS	195	1554(z)	0.13	07 45 21.78	+73 43 36.1		в NED	[26]
J074521.78							отсут.	
+734336.1								
OJ 287	180	930	0.19	08 54 48.88	+20 06 39.6	22-23	2.4-6.1	[27]
вторая ЧД	1	930	0.001			43	1.6 - 2.9	
						100	4.5	
						240	1.4-3	
						340	4.5	
						800	1.3-1.7	
NGC 1600	170	64	2.6	04 31 39.9	-05 05 10.0	5	0.016	[18]
						3000	0.190	
SDSS	151	1513(z)	0.10	08 08 19.69	+37 30 47.3	14000	0.002	[26]
J080819.69								
+373047.3								
SDSS	141	1522(z)	0.09	11 59 54.33	+20 19 21.1	325000	0.0006	[26]
J115954.33								
+201921.1								
SDSS	135	1470(z)	0.09	08 04 30.56	+54 20 41.1	14000	0.004	[26]
J080430.56								
+542041.1								
SDSS	124	1146(z)	0.10	01 00 13.02	-280225.8		в NED	[28]
J0100							отсут.	
+2802								

Таблица 1. Окончание

Объект	$M, 10^8 M_{\odot}$	D_A , Мпк	Δ , мкс дуги	α hms	δ • / //	u, ГГц	Поток, Ян	Ссылка
SDSS	123	1496(z)	0.08	07 53 03.34	+42 31 30.8	30	0.058	[26]
J075303.34								
+423130.8								
SDSS	120	1479(z)	0.08	08 18 55.77	+09 58 48.0	14000	0.007	[26]
J081855.77								
+095848.0								
SDSS	112	1508(z)	0.07	08 25 35.19	+51 27 06.3	14000	0.004	[26]
J082535.19								
+512706.3								
SDSS	110	1273(z)	0.09	01 31 27.34	-03 21 00.1		вNED	[29]
J013127.34							отсут.	
-032100.1								
Holmberg	100	224(z)	0.45	00 41 50.5	-09 18 11	22.5	0.002	[30]
15A	(10-					43	< 0.002	
*MCG-02-	3100)							
02-086								
RX J1532.9	100	1009.4(z)	0.10	15 32 53.8	+30 20 58	$3 imes 10^8$	2×10^{-6}	[31]
+3021								
PKS	100	1546	0.06	21 29 12.2	-15 38 41	20-24	1.07-0.84	[21]
2126-158						41-43	0.6 - 0.5	
						90-94	0.3-0.5	
						230	0.08	
						312	< 0.8	
PSO	100	1720(z)	0.06	22 16 48.6	+01 24 27		вNED	[32]
O334.2028							отсут.	$P_{\text{орб}} = 542^d$
+01.4075								дв.ЧД
SDSS	98	1499(z)	0.07	01 57 41.57	-01 06 29.6		вNED	[26]
J015741.57							отсут.	
-010629.6								
NGC 3842	97	98.4	0.97	11 44 02.15	+19 56 59.3	2.4	0.022	[16]
	91	92.2	0.97			3000	1.49	[17, 18]
SDSS	91	1511(z)	0.06	23 03 01.45	-09 39 30.7	325000	0.0004	[26]
J230301.45								
-093930.7								
NGC 5419	72	56.2	1.27	14 03 38.7	-335842	5	0.09-0.12	[17, 18]
						1900	< 0.021	
CID-947	69	1537(z)	0.04	10 01 11.35	$+02\ 08\ 55.6$	100	0.0001	[21]
						300	0.003	

Примечание. Δ — угловой размер шварцшильдовского радиуса черной дыры с массой из второй колонки таблицы в мкс дуги; α — прямое восхождение на эпоху J200, δ — склонение на эпоху J2000; ν — частота.

Объект	$M, 10^8 M_{\odot}$	D_A , Мпк	Δ , мкс дуги	α hms	δ • / //	u, ГГц	Поток, Ян	Ссылка
Srg A*	0.041	0.008	5.06	17 45 40.02	$-29\ 00\ 28.17$	43	1.3-1.9	[15, 16]
	0.0431	0.00833	5.11			100	2.1-2.4	[17, 18]
						240	2.8 - 4.1	
						340	3	
NGC 4486	36	17	2.09	12 30 49.42	$+12\ 23\ 28.0$	22-23	0.5-21	[15]
M 87	63	17	3.66			41	3.6-13.5	[16]
	62	16.7	3.67			94-100	0.5 - 5.3	[17, 18]
						300	1.3	
						600	1.4	
						860	1	
NGC 4649	21	16.5	1.23	12 43 40.4	+11 33 10	10.5	0.018	[16]
M 60	47	16.5	2.81			1700	< 0.1	[16, 18]
NGC 1600	170	64	2.6	04 31 39.9	$-05\ 05\ 10.0$	5	0.016	[18]
						3000	0.190	
NGC 4889	210	103	2.01	13 00 08.13	$+27\ 58\ 37.2$	2.4	0.001	[16]
	209	102	2.02			3000	< 0.069	[17, 18]
NGC 224	1.5	0.8	1.85	$00\ 42\ 44.35$	+ 41 16 08.6	5	0.036	[15, 16]
M 31	1.4	0.77	1.80			1900	7800	[17, 18]
NGC 1407	45	28	1.6	03 40 11.8	$-18\ 34\ 48$	5	0.034	[17, 18]
						1900	0.092	
NGC 4472	25	17.1	1.44	12 29 46.7	$+08\ 00\ 02$	15	0.004	[17, 18]
M 49						96	0.15	
						1667	< 0.09	
NGC 3706	59	46	1.3	11 29 44.4	-362329	5	0.025	[18]
						1900	< 0.022	
NGC 3923	28	20.9	1.3	11 51 01.7	$-28\ 48\ 22$	5	0.001	[17, 18]
						1900	0.048	
NGC 5419	72	56.2	1.27	14 03 38.7	$-33\ 58\ 42$	5	0.09-0.12	[17, 18]
						1900	< 0.021	
NGC 3842	97	98.4	0.97	11 44 02.15	$+19\ 56\ 59.3$	2.4	0.022	[16]
	91	92.2	0.97			3000	1.49	[17, 18]
NGC 5055	8.3	8.7	0.94	13 15 49.3	$+42\ 01\ 45$	15	< 0.001	[18]
						300	1.3	
						600	2.6	
						850	64	
NGC 3115	9.6	10.2	0.93	10 05 14.0	-07 43 06.9	1.4	0.0006	[15, 16]
	9.0	9.5	0.94			1900	< 0.045	[17]
	8.8	9.5	0.91					[18]

Таблица 2. 25 СМЧД с самыми большими угловыми размерами теней. Обозначения те же, что в табл. 1

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 4 2019

Таблица 2. Окончание

Объект	$M, 10^8 M_{\odot}$	D_A , Мпк	Δ , мкс дуги	α hms	δ • / //	ν, ΓΓц	Поток, Ян	Ссылка
IC 1459	28	30.9	0.89	22 57 10.61	-36 27 44.0	20	0.55	[15, 16]
	25	28.9	0.85			95	0.26	[17, 18]
						1800	1.1-2.4	
NGC 4374	15	17.0	0.87	12 25 03.74	+12 53 13.14	15	0.16-1.3	[15]
M 84	8.5	17.0	0.49			43	0.1	[16]
	9.2	18.5	0.49			95-100	0.14-0.17	[17]
	9.3	18.5	0.50			350	0.15	[18]
						670	0.12	
NGC 1550	37	51.6	0.72	04 19 37.9	+02 24 34	2.3	0.008	[17, 18]
						3000	< 0.245	
NGC 5328	47	64.1	0.72	13 52 53.3	$-28\ 29\ 22$	5	< 0.0009	[17, 18]
						3000	< 0.07	
NGC 6861	20	27.3	0.72	20 07 19.5	-48 22 13	0.8	0.015	[17, 18]
						3000	3-3.5	
NGC 3091	36	51.3	0.70	10 00 14.3	-19 38 13	5	0.007	[17, 18]
						12500	0.003	
NGC 4594	5.7	10.3	0.55	12 39 59.43	-11 37 23.0	20	0.08	[15]
M 104	5.3	10.3	0.51			250	0.19-0.44	[16]
Sombrero	6.7	9.9	0.67			350	0.24-0.92	[17]
	6.6	9.9	0.66			600	5.6	[18]
						850	12.1	
NGC 5128	3	4.4	0.67	13 25 27.61	-43 10 08.8	22	3-112	[15, 16]
Cen A	0.7	4.4	0.16			41	32-72	[15, 16]
	0.57	3.62	0.16			90-93	41	[17, 18]
						230-240	5.8 - 6	
						350	18	
NGC 1277	47	71	0.65	03 19 51.49	+41 34 24.7	3000	< 0.7	[18]
NGC 1332	14.5	22.3	0.64	03 26 17.321	-21 20 07.33	5	0.005	[16, 17]
	6.8	22.3	0.30			1700	1.56	[18]
NGC 1399	5.1	21.1	0.24	03 38 29.08	-35 27 02.67	8.5	0.36	[15, 16]
	13	21.1	0.61			1875	0.02	[15, 16]
	8.8	20.9	0.42					[17]
	8.7	20.9	0.41					[18]

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 96 № 4 2019

В данной ситуации обнадеживает, что для большого числа источников потоки в субмиллиметровом диапазоне еще неизвестны, т.е. часть из них могут оказаться достаточно сильными.

Составленный нами каталог предназначен для использования при планировании интерферометрических наблюдений теней СМЧД в субмилллиметровом диапазоне. Он доступен на сайте Астрокосмического Центра ФИАН⁵.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-02-01043), финансирована Программой фундаментальных исследований Президиума РАН П-7 (подпрограмма "Переходные и взрывные процессы в астрофизике") и в рамках Госзадания по научной программе ОКР "Миллиметрон". Авторы благодарят П.Б. Иванова (ФИАН) за плодотворные обсуждения. С.В. Репин благодарит Р. Бересневу, О. Сувенкову и О. Косареву за возможность плодотворной работы над этой задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. А. Н. Петров, Гравитация. От хрустальных сфер до кротовых нор (Фрязино: Век-2, 2015).
- 2. А. Левин *Карл Шварциильд: Астрономия, артиллерия, черные дыры* (trv-science.ru/2016/02/09/karl-schwarzschild).
- 3. А. Левин *Черные дыры из XVIII столетия* (trv-science.ru/2016/02/23/chernye-dyry-iz-xviii-stoletiya).
- А. Ф. Захаров, Успехи физ. наук 169(9), 1041 (1999).
- 5. I. D. Novikov, Soviet Astron. 8, 857 (1965).
- M. S. Morris, K. S. Thorne, and U. Yurtsever, Phys. Rev. Lett. 61, 1446 (1988).
- В. Н. Лукаш, Е. В. Михеева, В. Н. Строков, Успехи физ. наук 182, 216 (2012).
- 8. V. N. Štrokov, V. N. Lukash, and E. V. Mikheeva, International J. Modern Physics A **31**, id. 1641018 (2016).
- 9. M. Volonteri, Astron. and Astrophys. Rev. 18, 279 (2010).
- T. Johannsen and D. Psaltis, Astrophys. J. **718**, 446 (2010).
- T. Johannsen, D. Psaltis, S. Gillessen, D. P. Marrone, F. Özel, S. S. Doeleman, and V. L. Fish, Astrophys. J. 758, 30 (2012).

- 12. F. H. Vincent, E. Gourgoulhon, C. Herdeiro, and E. Radu, Phys. Rev. D **94**, id. 084045 (2016).
- E. Behar, S. Vogel, R. D. Baldi, K. L. Smith, and R. F. Mushotzky, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 478, 399 (2018).
- 14. M. D. Johnson and C. R. Gwinn, Astrophys. J. **805**, 180 (2015).
- 15. K. Gültekin, D. O. Richstone, K. Gebhardt, T. R. Lauer, *et al.*, Astrophys. J. **698**, 198 (2009).
- 16. N. J. McConnel, *Black Hole Masses in Nearby Brightest Cluster Galaxies* (Berkey: PhD in Astrophysics, 2012).
- 17. R. P. Saglia, M. Opitsch, P. Erwin, J. Thomas, *et al.*, Astrophys. J. **818**, id. 47 (2016).
- 18. R. C. E. van den Bosch, Astrophys. J. 831, id. 134 (2016).
- П. Б. Иванов, Е. В. Михеева, В. Н. Лукаш, А. М. Малиновский и др., Успехи физ. наук. (в печати).
- Н. С. Кардашев, И. Д. Новиков, В. Н. Лукаш, С. В. Пилипенко и др., Успехи физ. наук. 184, 1319 (2014).
- G. Ghisellini, R. Della Ceca, M. Volontery M., and G. Ghirlanda, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 405, 387 (2010).
- S. A. Walker, A. C. Fabian, H. R. Rossel, and J. S. Sanders, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 442, 2909 (2014).
- 23. D. A. Riechers, E. Walter, C. L. Carilli, and G. F. Lewis, Astrophys. J. **690**, 463 (2009).
- 24. F. G. Saturni, D. Trevese, F. Vagnetti, M. Perna, and M. Dadina, Astron. and Astrophys. **587**, id. A43 (2016).
- 25. M. McDonald, M. Bayliss, and A. Zenteno, Nature **488**, 349 (2012).
- 26. W. Zuo, X.-B. Wu, X. Fan, R. Green, R. Wang, and F. Bian, Astrophys. J. **799**, 189 (2015).
- 27. M. J. Valtonen, S. Ciprini, and H. J. Lehto, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **427**, 77 (2012).
- 28. X.-B. Wu, F. Wang, X. Fan, W. Yi, *et al.* Nature **518**, 512 (2015).
- 29. G. Ghisellini, G. Tagliaferri, N. Sbarrato, and N. Gehrels, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **450**, L34 (2015).
- O. Lopez-Cruz, C. Anorve, M. Birkinshaw, D. M. Worrall, H. J. Ibarra-Medel, W. A. Barkhouse, J. P. Torres-Papaqui, and V. Motta, Astrophys. J. 795, L31 (2014).
- J. Hlavacek-Larrondo, S. W. Allen, G. B. Taylor, A. C. Fabian, *et al.*, Astrophys. J. **777**, 163 (2013).
- 32. T. Liu, S. Gezari, S. Heinis, E. A. Magnier, *et al.*, Astrophys. J. **803**, L16 (2015).

⁵http://millimetron.ru/index.php/en/scientific-

program/the-catalog-of-supermassive-black- holes