

УДК 524.882, 520.274

© Андрианов А. С., 2025

НАБЛЮДЕНИЕ СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР И КРотовых НОР ПРИ ПОМОЩИ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОГО РСДБ В ПРОЕКТЕ «МИЛЛИМЕТРО»Андрианов А. С.^{a,1}

^a Астрокосмический центр, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, 119991, Россия.

Сверхмассивные объекты в центрах ближайших галактик являются хорошим местом для проверки общей теории относительности. Наблюдение теней таких объектов может помочь сделать выбор между моделью сверхмассивной черной дыры либо кротовой норы для центрального объекта. А также обеспечить надежные измерения основных параметров метрики в случае черной дыры: спина и массы. Реализуемый в Астро космическом центре ФИАН (АКЦ ФИАН) проект наземно-космического интерферометра субмиллиметрового диапазона (проект “Миллиметрон”) позволит получить изображения теней центральных сверхмассивных объектов, а также исследовать тонкую структуру тени, такую как фотонные кольца (линзированные изображение аккреционного диска, образуемые лучами, делающими несколько полуоборотов вокруг центрального массивного объекта) для нескольких десятков ближайших галактик.

Ключевые слова: черные дыры, кротовые норы, Миллиметрон, РСДБ.

OBSERVATION OF THE SUPERMASSIVE BLACK HOLES AND WORMHOLES WITH SPACE-GROUND VLBI WITH «MILLIMETRON»Andrianov A. S.^{a,1}

^a Astro space center of P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russia.

Supermassive objects at the centers of nearby galaxies provide an excellent opportunity to test the general theory of relativity. Observing the shadows of these objects can help differentiate between models of a supermassive black hole and a wormhole as the central object. Additionally, such observations can yield precise measurements of key parameters of the spacetime metric in the case of a black hole, specifically its spin and mass. The “Millimetron” project, led by the Astro-Space Center of the Lebedev Physical Institute (ASC LPI), aims to capture high-resolution images of the shadows of central supermassive objects, while also investigating the fine structure of these shadows, including photon rings (lensed images of the accretion disk formed by light rays that complete multiple orbits around the central massive object) in several dozen nearby galaxies.

Keywords: black holes, wormholes, Millimetron, VLBI.

PACS: 95.30, 95.55

DOI: 10.17238/issn2226-8812.2025.1.18-23

Введение

В 2019 и 2022 году коллаборация телескопа горизонта событий (ЕНТ) опубликовала изображения теней сверхмассивных объектов в M87 и Sgr A* [1, 2]. В силу ограниченного углового

¹E-mail: andrian@asc.rssi.ru

разрешения наземного РСДБ они представляют собой довольно размытые изображения, на основе анализа которых удалось определить диаметр тени и наложить достаточно мягкие ограничения на спин ЧД, угол между осью вращения и направлением на наблюдателя и сделать предположения о величине магнитного поля в аккреционном диске (модели с сильным магнитным полем вписываются в экспериментальные данные чуть лучше, чем со слабым). Однако, качества данных недостаточно даже для того, чтобы закрыть геометрии, отличные от Керровской черной дыры. Более того, до сих пор существуют сомнения в том, действительно ли группа ЕНТ смогла получить изображение тени [3].

В настоящее время в Астрокосмическом центре ФИАН реализуется проект наземно-космического интерферометра "Миллиметррон", с угловым разрешением на два порядка превосходящим угловое разрешение наземной РСДБ сети телескопа горизонта событий. Данный проект предполагает запуск на гало орбиту вокруг точки либрации L2 системы Земля-Солнце 10-метрового телескопа, который будет работать совместно с ЕНТ и в том же частотном диапазоне, что позволит получить изображения теней центральных объектов как в M87, Sgr A*, так и еще в нескольких десятках объектов с лучшим угловым разрешением. С параметрами инструмента и основными научными задачами можно ознакомиться в [4].

1. Наблюдения теней черных дыр

Несмотря на то, что формальное угловое разрешение интерферометра "Миллиметррон"-Земля будет на два порядка превосходить угловое разрешение ЕНТ, эффективное получение двумерных изображений теней черных дыр будет ограничено РСДБ базами, не превосходящими несколько диаметров Земли. Основным фактором, ограничивающим качество итоговых изображений, будет являться ограниченное заполнение плоскости пространственных частот (UV-плоскости, т.к. будет отсутствовать информация в области баз промежуточной длины - между короткими наземными и максимальными наземно-космическими), доступное с одним космическим телескопом. А также сложность калибровки фазы интерферометрической функции видности (при большой наземно-космической базе любые треугольники, образованные космическим телескопом и двумя наземными, вырождаются в прямую линию). Пример ожидаемых изображений представлен на Рис 1. Подробнее возможности восстановления двумерных изображений в проекте "Миллиметррон" и возникающие сложности описаны в [5, 6].

После получения изображения теней ЧД в M87 и Sgr A*, основной интерес дальнейших РСДБ исследований сместился на исследование тонких деталей тени. В частности, на исследование формы фотонных колец, для получения сигнатур которых необходимо повышение углового разрешения и чувствительности [7]. Фотонные кольца представляют собой линзированные изображения аккреционного диска, образованные фотонами, излученными в аккреционном диске и сделавшими несколько полуоборотов n вокруг центральной черной дыры перед тем, как достичь наблюдателя (см. Рис 1. нижнюю строку и Рис. 2) Более подробно данные детали тени описаны в работе [8]. Данные детали изображения интересны в первую очередь тем, что их форма слабо зависит от турбулентных свойств плазмы в аккреционном диске, и определяется только свойствами пространства-времени в окрестности центрального массивного объекта.

Фотонные кольца хорошо подходят для наблюдения при помощи космического РСДБ на длинной базе, поскольку для получения их сигнатур (Рис 1, нижняя строка) не требуется построения двумерных изображений, достаточно лишь измерить зависимость амплитуды функции видности от длины базы. Таким образом, при исследовании метрики пространства-времени в окрестности центрального массивного объекта можно использовать все возможности, которое дает высокое угловое разрешение интерферометра "Миллиметррон"-Земля, не ограничиваясь, как в случае анализа двумерных изображений, околоземными базами.

Помимо углового разрешения для исследования фотонных колец важна чувствительность инструмента. Полный поток наиболее ярких источников, таких как M87 и Sgr A* составляет единицы

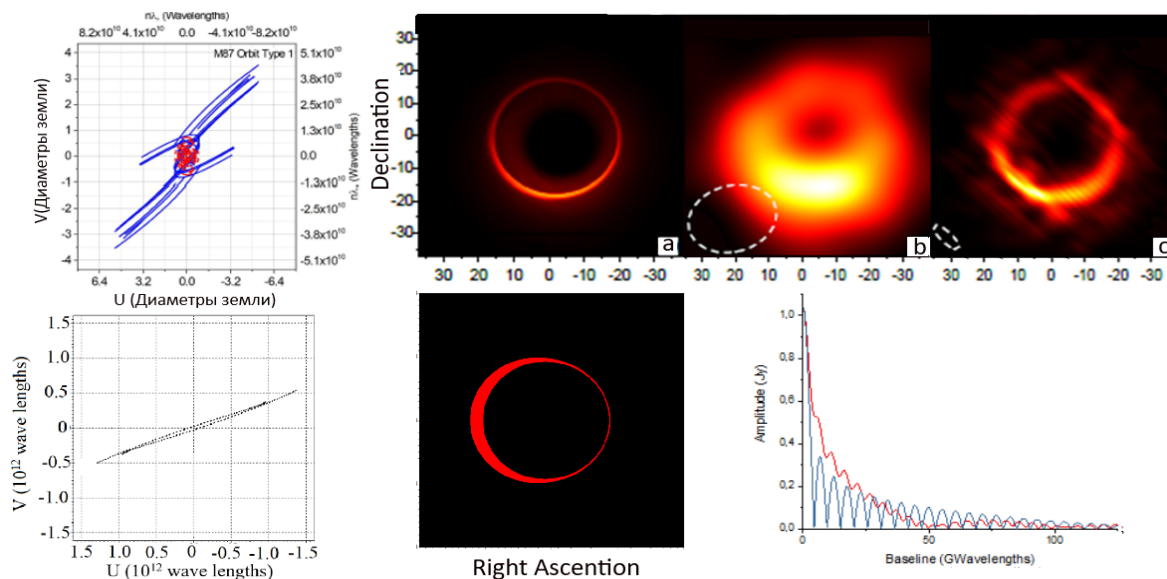


Рис. 1. Верхняя строка. Левое изображение - характерное UV-заполнение, которое будет достигаться в проекте “Миллиметрон” в сеансах картографирования. Красным обозначены наземные базы, синим наземно-космические. Критически важным для восстановления двумерных изображений является наличие относительно однородного UV-заполнения по обеим осям, что достигается только на определенных участках орбиты, когда вектора направления на источник и на космический аппарат “Миллиметрон” будут сонаправлены. Проекция вектора орбиты на плоскость перпендикулярную направлению на источник и дает характерную картину наземно-космических баз. Далее слева направо - модельное изображение тени черной дыры, изображение, восстановленное по данным с наземных баз, изображение, восстановленное по данным, как с наземных, так и наземно-космических баз. “Миллиметрон” позволит увеличить разрешение РСДБ изображений теней черных дыр в несколько раз. Нижняя строка. Левое изображение - характерное UV-заполнение, которое будет достигаться в проекте “Миллиметрон” для произвольного источника (тут уже нет требования к сонаправленности векторов на источник и на аппарат). Можно заметить, что UV-заполнение существенно одномерное. Но для подобных одномерных UV-заполнений достигается угловое разрешение на два порядка превосходящее достижимое на Земле. Среднее изображение - модельное изображение тонкой структуры тени - первого фотонного кольца. Асимметрия обусловлена вращением черной дыры. Правое изображение - график амплитуды интерферометрической функции видности, соответствующей первому фотонному кольцу от длины РСДБ базы. Период колебаний однозначно связан с размерами кольца.

Янских. Каждое последующее кольцо имеет полный поток, составляющий 4-13 % (в зависимости от спина) от предыдущего. Однако, фотонные кольца являются тонкими структурами (причем каждое последующее тоньше предыдущего), за счет чего интерферометрическая функция видности от них медленно падает с увеличением РСДБ базы. И на длинной РСДБ базе начинает доминировать вклад от фотонных колец с большими n , несмотря на падение общего потока от кольца к кольцу. Тем не менее, чувствительность интерферометра “Миллиметрон-Земля” составляет около 10^{-4} Ян, чего достаточно для детектирования сигнатур от кольца с $n = 1$, но кольца с большим n могут не пройти по чувствительности. Решением проблемы может быть постоянный мониторинг полного потока от источника и наблюдения вспышек в аккреционном диске и их отражений в фотонных кольцах, которые за счет того, что являются еще более компактными, чем кольца, лучше сохраняют свой поток на длинной РСДБ базе. Наблюдение вспышек в фотонных кольцах позволит снизить требования по чувствительности примерно на порядок, что позволит наблюдать фотонные кольца с $n = 1 - 3$ на длинной базе “Миллиметрон-Земля”. Определять по ним угол поворота фотонных колец (зависящий от спина), и таким образом определять параметры метрики. Подробнее с возможностями наблюдения фотонных колец и вспышек в них при помощи наземного и наземно-космического РСДБ можно ознакомиться в [9, 10].

2. Наблюдательные отличия теней кротовых нор от теней черных дыр

Центральным объектом в M87, Sgr A* и других квазарах не обязательно является черная дыра. Существует множество моделей кротовых нор, которые дают качественно похожие предсказания для формы и размера тени. И, с учетом неопределенности в определении массы и расстояния до квазаров, их очень сложно отличить от черных дыр. Однако, структура фотонных колец для таких объектов может сильно различаться. На Рис 2. (второе изображение слева) представлена тень кротовой норы Лами [11], метрика которой является аналитическим продолжением метрики Керра и задается в следующем виде:

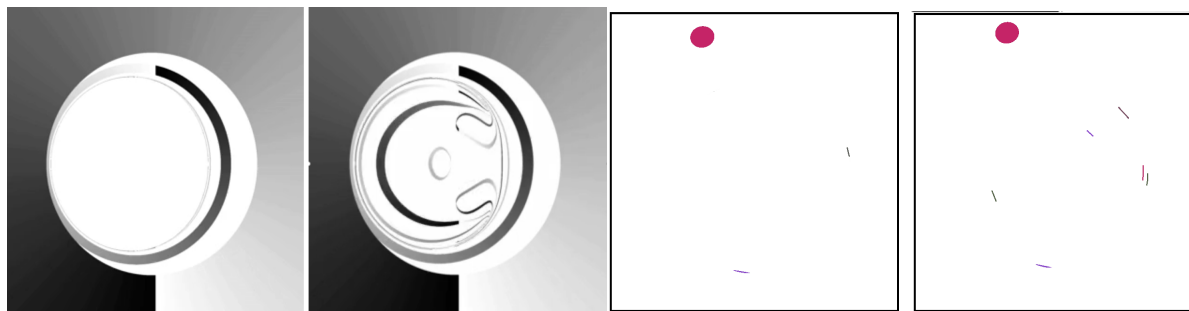


Рис. 2. Модельное изображение тени черной дыры и кротовой норы на фоне тонкого аккреционного диска (первое и второе изображение). Тонкая структура на фоне тени - фотонные кольца - линзированные изображения аккреционного диска, образованные фотонами, излученными в аккреционном диске и сделавшими несколько полуоборотов вокруг центральной черной дыры перед тем, как достичь наблюдателя. Цветом обозначен угол ϕ в аккреционном диске. Третье и четвертое изображения - картина, которую можно наблюдать при помощи РСДБ в случае, когда в аккреционном диске произошла вспышка (физическая природа вспышки неважна), это изображение самой вспышки (красный) и ее отражения в фотонных кольцах. Цветом обозначено различное число полуоборотов вокруг центрального объекта, которые лучи света делают перед тем как достигнуть наблюдателя. Параметр вращения $a = 0.9$, размер горловины $b = 0.6$

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2rM(r)}{\Sigma}\right)dt^2 - \frac{4arM(r)\sin^2\theta}{\Sigma}dtd\phi + \frac{\Sigma}{\Delta}dr^2 + \Sigma d\theta^2 + \sin^2\theta\left(r^2 + a^2 + \frac{2a^2rM(r)\sin^2\theta}{\Sigma}\right)d\phi^2 \quad (1)$$

$$\Sigma = r^2 + a^2 \cos^2\theta \quad \Delta = r^2 - 2M(r)r + a^2 \quad M(r) = m \frac{|r|^3}{|r|^3 + 2mb^2} \quad (2)$$

Видно, что при некоторых значениях параметра b (размер горловины) картина фотонных колец качественно различается, что может служить наблюдательным критерием различия. Также будет различаться и картина вспышек в фотонных кольцах (Рис 2. третье и четвертое изображение слева).

Другими признаками, которые могут свидетельствовать о наличии кротовой норы, а не черной дыры могут быть наличие монополюсного магнитного поля (что также может быть подтверждено поляризационными РСДБ наблюдениями), или прохождение излучения через горловину (яркий светящийся объект на фоне тени, и, опять-таки, его отражения в кольцах) [12]

Заключение

В данной работе были показаны основные наблюдательные возможности реализуемого в настоящее время Астрокосмическим центром ФИАН проекта наземно-космического интерферометра "Миллиметронтрон" применительно к задаче определения параметров пространства-времени в окрестности сверхмассивных объектов в центрах квазаров. Данный проект позволит получить изображения теней черных дыр в M87 и Sgr A* с примерно на порядок лучшим угловым разрешением,

чем были получены коллаборацией ЕНТ. А также исследовать фотонные кольца и вспышки в них с примерно на два порядка лучшим угловым разрешением. Помимо этих двух источников наблюдений с “Миллиметроном” будут доступны еще несколько десятков объектов, недоступных для наземного РСДБ в силу ограниченного углового разрешения. Помимо черной дыры, центральным объектом в М87, Sgr A* и других квазарах могут являться кротовые норы. В этом случае картина фотонных колец будет кардинально отличаться.

Список литературы

1. Event Horizon Telescope Collaboration First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. *The Astrophysical Journal Letters* 2019. V. 875. № 1. L1.
2. Event Horizon Telescope Collaboration First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way. *The Astrophysical Journal Letters* 2022. V. 930. № 2. id. L12.
3. Miyoshi M., Kato Y., Makino J. An independent hybrid imaging of Sgr A* from the data in EHT 2017 observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2024. V. 534. № 4. 3237 – 3264 pp.
4. Novikov I.D., Likhachev S.F., Shchekinov Yu.A. et al. Objectives of the Millimetron Space Observatory science program and technical capabilities of its realization. *Physics-Uspekhi* 2021. V. 64. № 4. 386 – 419 pp.
5. Andrianov A.S., Baryshev A.M., Falcke H. et al. Simulations of M87 and Sgr A* imaging with the Millimetron Space Observatory on near-Earth orbits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2021. V. 500. № 4. 4866 – 4877 pp.
6. Likhachev S.F., Rudnitskiy A.G., Shchurov M. A. et al. High-resolution imaging of a black hole shadow with Millimetron orbit around lagrange point l2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2022. V. 511. № 1. 668 – 682 pp.
7. Johnson M. D. et al. Universal interferometric signatures of a black hole’s photon ring. *Science Advances* 2020. V. 6. № 12. eaaz1310.
8. Gralla S.E., Lupsasca A. Lensing by Kerr Black Holes. *Phys. Rev. D* 2020. V. 101. 044031 p.
9. Andrianov A., Chernov S., Girin I. et al. Flares and their echoes can help distinguish photon rings from black holes with space-Earth very long baseline interferometry. *Phys. Rev. D* 2022. V. 105. № 6. 063015 p.
10. Андрианов А. С., Чернов С. В. Оценка спина сверхмассивной черной дыры в Стрельце А*. *Астрономический журнал* 2024. Т. 101. № 3. С. 2-6.
11. Lamy F. et al. Imaging a non-singular rotating black hole at the center of the Galaxy. *Classical and Quantum Gravity* 2018. V. 35. 115009 p.
12. Репин С. В., Бугаев М. А., Новиков И. Д., Новиков И. Д. мл. Силуэты кротовых нор, проходимых для излучения. *Астрономический журнал* 2022. Т. 99. № 10. С. 795-804.

References

1. Event Horizon Telescope Collaboration First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. *The Astrophysical Journal Letters* 2019. V. 875. № 1. L1.
2. Event Horizon Telescope Collaboration First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way. *The Astrophysical Journal Letters* 2022. V. 930. № 2. id. L12.
3. Miyoshi M., Kato Y., Makino J. An independent hybrid imaging of Sgr A* from the data in EHT 2017 observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2024. V. 534. № 4. 3237 – 3264 pp.
4. Novikov I.D., Likhachev S.F., Shchekinov Yu.A. et al. Objectives of the Millimetron Space Observatory science program and technical capabilities of its realization. *Physics-Uspekhi* 2021. V. 64. № 4. 386 – 419 pp.
5. Andrianov A.S., Baryshev A.M., Falcke H. et al. Simulations of M87 and Sgr A* imaging with the Millimetron Space Observatory on near-Earth orbits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2021. V. 500. № 4. 4866 – 4877 pp.

6. Likhachev S.F., Rudnitskiy A.G., Shchurov M. A. et al. High-resolution imaging of a black hole shadow with Millimetron orbit around lagrange point l2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 2022. V. 511. № 1. 668 – 682 pp.
7. Johnson M. D. et al. Universal interferometric signatures of a black hole’s photon ring. *Science Advances* 2020. V. 6. № 12. eaaz1310.
8. Gralla S.E., Lupsasca A. Lensing by Kerr Black Holes. *Phys. Rev. D* 2020. V. 101. 044031 p.
9. Andrianov A., Chernov S., Girin I. et al. Flares and their echoes can help distinguish photon rings from black holes with space-Earth very long baseline interferometry. *Phys. Rev. D* 2022. V. 105. № 6. 063015 p.
10. Andrianov A.S., Chernov S.V. Estimation of the Spin of a Supermassive Black Hole in Sagittarius A*. *Astronomy Reports* 2024. V. 68. № 3. 233 p.
11. Lamy F. et al. Imaging a non-singular rotating black hole at the center of the Galaxy. *Classical and Quantum Gravity* 2018. V. 35. 115009 p.
12. Repin S. V., Bugaev M. A., Novikov I. D., Novikov I. D., Jr. Silhouettes of Wormholes Traversed for Radiation. *Astronomy Reports* 2022. V. 66. № 10. 835 p.

Авторы

Андре́ианов Андре́й Серге́евич, к.ф.-м.н., с.н.с, Астрокосмический центр, Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, ул. Ленинский проспект, д. 53, г. Москва, 119991, Россия.

E-mail: andrian@asc.rssi.ru

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Андре́ианов А. С. Наблюдение сверхмассивных черных дыр и кротовых нор при помощи наземно-космического РСДБ в проекте «Миллиметро». *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*. 2025. № 1. С. 18–23.

Authors

Andrianov Andrey Sergeevich, Ph.D., Astro space center of P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Leninskij prospekt st., 53, Moscow, 119991, Russia.

E-mail: andrian@asc.rssi.ru

Please cite this article in English as:

Andrianov A.S. Observation of the supermassive black holes and wormholes with space-ground VLBI with «Millimetron». *Space, Time and Fundamental Interactions*, 2025, no. 1, pp. 18–23.