

ОЦЕНКА СПИНА СВЕРХМАССИВНОЙ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ В СТРЕЛЬЦЕ А*

© 2024 г. А. С. Андрианов^{1,*}, С. В. Чернов^{1,**}

¹Астрокосмический центр, Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: andrian@asc.rssi.ru

**E-mail: chernov@td.lpi.ru

Поступила в редакцию 01.02.2024 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята в печать 11.03.2024 г.

В апреле 2017 г. телескоп Горизонта событий получил образ сверхмассивной черной дыры в источнике Стрелец А*. Данный образ состоит из кольцеобразной структуры, которая содержит три области с повышенной яркостью (пятнами). Если предположить, что эти пятна связаны со вспышками вблизи горизонта событий черной дыры, то тогда можно оценить ее спин. Наша оценка дает значение порядка $a \approx 0.9$.

Ключевые слова: сверхмассивные черные дыры, вспышки, спин, Стрелец А*

DOI: 10.31857/S0004629924030017 EDN: KKBQQJ

1. ВВЕДЕНИЕ

В апреле 2017 г. телескоп Горизонта событий (ТГС) провел наблюдения сверхмассивной черной дыры (СМЧД) в радиоисточнике Стрелец А* в миллиметровой области спектра на длине волны $\lambda = 1.3$ мм [1]. ТГС разрешил компактный источник излучения с внутренней переменностью порядка часа [1]. Считается, что вокруг СМЧД вращается торообразное распределение двухтемпературной электрон-протонной плазмы [2], которое высвечивает синхротронное излучение. Наблюдения указывают, что миллиметровое излучение происходит из ближайшей окрестности черной дыры с расстояния несколько радиусов Шварцшильда [3]. В результате проведенных наблюдений был получен образ черной дыры, который содержит яркую кольцеобразную структуру, окружающую темное пятно — тень черной дыры [1]. Такая структура предсказывается общей теорией относительности и имеет диаметр порядка $\sim 50 \mu\text{as}$ ¹ [1]. На кольцеобразной структуре отчетливо видны три области повышенной яркости (см. [1, рис. 3]) — яркие пятна, происхождение которых остается неясным. В данной работе сделано предположение, что яркие пятна связаны со вспышечной активностью вблизи внутреннего края аккреционного диска СМЧД и ее отражении в фотонных кольцах. При этом мы не вдаемся в детали конкретного физического механизма, ответственного за вспышечную активность в аккреционном диске.

Известно, что СМЧД в источнике Стрелец А* излучает во всем диапазоне длин волн от радио до гамма. Максимум светимости приходится на субмиллиметровую область спектра с плотностью потока около 3 Янских [4]. Болومترическая светимость приблизительно равна $L_{\text{bol}} \sim 10^{35}$ эрг/с, что значительно ниже эддингтоновского предела. Помимо этого, во всем диапазоне от радио до гамма СМЧД проявляет вспышечную активность [5, 6, 7, 8, 9]. Поток в рентгеновском диапазоне во время вспышки может меняться на два порядка величины, в инфракрасном диапазоне — в несколько раз, в миллиметровом диапазоне — на несколько десятков процентов. Продолжительность вспышек составляет от несколько минут до несколько месяцев. Здесь нас будут интересовать вспышки с характерной продолжительностью несколько часов. Такие вспышки соответствуют масштабу порядка несколько гравитационных радиусов, и расположены они в ближайшей окрестности СМЧД. Есть несколько моделей, которые способны объяснить физику вспышек. Это модели генерации вспышечной активности за счет разных видов неустойчивостей в аккреционном диске, из-за пересоединения магнитных силовых линий, вследствие образования и соударения сгустков плазмы, и др. [5].

В течение пяти ночей с 5 по 11 апреля 2017 г. ТГС проводил наблюдения источника Стрелец А* (см. [1, гл. 3]). Параллельно проводились инфракрасные и рентгеновские наблюдения, близкие по времени с наблюдениями ТГС для подтверждения вспышечной активности (см. [1, гл. 4]). Благодаря этому была

¹ μas (micro arc second) — угловая микросекунда дуги.

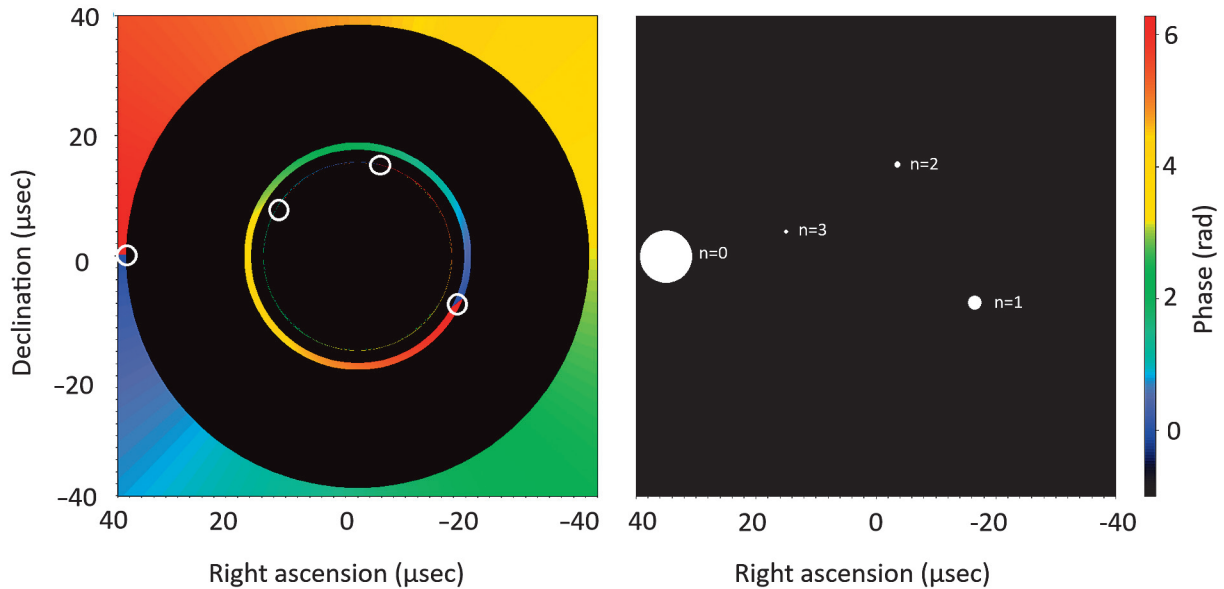


Рис. 1. Вспышка в аккреционном диске СМЧД и ее отражение в первых трех фотонных кольцах.

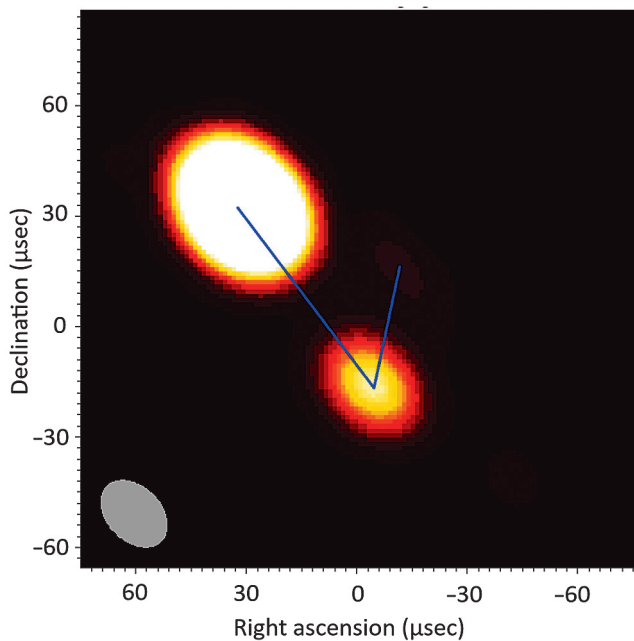


Рис. 2. Восстановленный РСДБ-образ продолжительной вспышки в аккреционном диске и ее отражения в первых двух фотонных кольцах с учетом ограничений РСДБ-сети ngEHT.

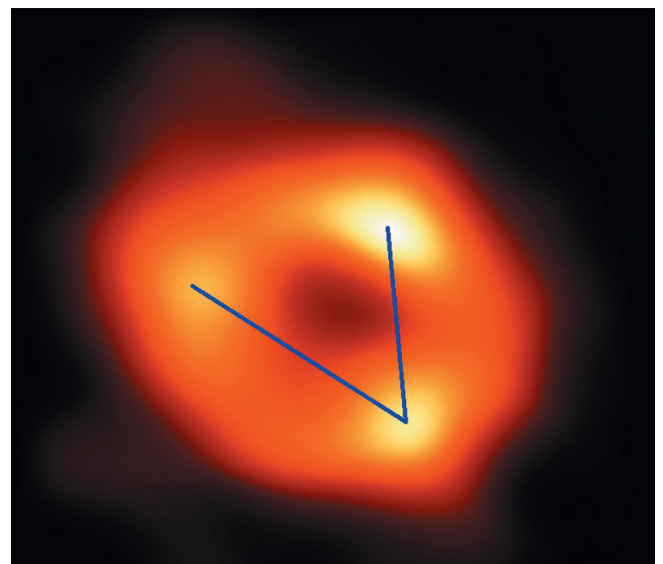


Рис. 3. Образ СМЧД в Стрельце А*, наблюдаемый ТГС [1]. Прямые линии соединяют положение вспышек в диске и в первом и во втором фотонном кольце, образуя угол, который зависит только от спина черной дыры.

подтверждена рентгеновская вспышка, зарегистрированная 11 апреля. Рентгеновские наблюдения 6 и 7 апреля не выявили вспышечной активности [1]. Между тем наблюдения на длине волны $\lambda = 1.3$ мм на радиотелескопах ALMA и SMA, проведенные 7 апреля, показали, что суммарная плотность потока менялась до 13% (см. [1, рис. 2]). Из этого рисунка явно просматривается вспышечная активность продолжительностью несколько часов. В работе [10]

был проведен анализ наблюдений, проведенных на ТГС, и было показано, что доля переменности в течение всех дней наблюдений составляет в среднем 9% с вариациями 4–13%. Таким образом, можно предположить, что во время проведенных наблюдений наблюдалась вспышечная активность, и три ярких пятна на кольцеобразной структуре непосредственно связаны со вспышечной активностью СМЧД. Если это действительно так, то, согласно

работе [11], можно оценить спин СМЧД по вспышкам в образе, что и делается в данной работе.

В более ранних работах уже делались оценки спина СМЧД в источнике Стрелец А*. Так, в работе [12] по квазипериодическим осцилляциям была получена оценка, равная $a \approx 0.44$. В другой работе [13] автор получил оценку спина, равную $a \approx 0.65$. В работе [2] по поляризации миллиметрового излучения была получена оценка $a \approx 0.6$.

В данных работах принимаются следующие параметры СМЧД в источнике Стрелец А*: масса приблизительно равна $M \approx 4 \times 10^6 M_\odot$ [1], где $M_\odot$ — масса Солнца, расстояние до него — $R \approx 8.2$ кпк. Характерное динамическое время оценивается величиной $\tau_{\text{dyn}} = GM/c^3 \approx 20$ с. Характерное время, за которое фотон облетит СМЧД по неустойчивой орбите в случае невращающейся черной дыры, равно $t_{\text{ph}} = 2\pi 3GM/c^3 \approx 370$ с.

2. МОДЕЛЬ ВСПЫШЕК

Предположим, что в ближайшей окрестности СМЧД произошла компактная вспышка в миллиметровой области спектра с продолжительностью $t \gg t_{\text{ph}}$ [11]. Тогда наблюдатель увидит суперпозицию вспышек в аккреционном диске и их эха в фотонных кольцах. Другими словами, каждая вспышка вблизи СМЧД будет отображаться на экране наблюдателя в виде последовательности нескольких одновременных вспышек. Возможное расположение вспышек показано слева на рис. 1. Расположение вспышек в фотонных кольцах зависит только от спина черной дыры и угла наклона наблюдателя к ее оси вращения, и не зависит от массы черной дыры. Если бы черная дыра не вращалась, т.е. описывалась бы метрикой Шварцшильда, то и вспышка в аккреционном диске и все ее отражения в фотонных кольцах располагались бы на одной прямой. В этом случае угол между вспышками составлял бы 180° . В случае вращающейся черной дыры, задаваемой метрикой Керра, изображения вспышек в фотонных кольцах перестают располагаться на одной прямой и угол между ними определяется параметром вращения черной дыры (спином). На правой панели рис. 1 показана геометрическая форма вспышки и ее отражение в фотонных кольцах (для случая вращающейся черной дыры с параметром вращения близким к $a \approx 1$). Предполагается, что изначальной формой вспышки в аккреционном диске является круг.

Продолжительная субмиллиметровая вспышка на РСДБ-образе будет представлять из себя суперпозицию вспышки в аккреционном диске и в фо-

тонных кольцах. Пример такой вспышки показан на рис. 2 в предположении, что яркость в фотонном кольце составляет одну десятую от яркости предыдущего фотонного кольца [14]. Здесь показан РСДБ-образ вспышки в аккреционном диске и два эха в двух первых фотонных кольцах. По относительному положению вспышек в образе можно определить спин черной дыры. Линии помечают угол между направлением от вспышки в аккреционном диске к вспышке в первом фотонном кольце и направлением от вспышки в первом фотонном кольце к вспышке во втором фотонном кольце. Данный угол зависит только от спина черной дыры и угла наклона наблюдателя к оси вращения черной дыры. Таким образом, наблюдая мгновенное положение ярких пятен на РСДБ-образе и измеряя угол между яркими пятнами, можно оценить спин черной дыры.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПИНА СМЧД В ИСТОЧНИКЕ СТРЕЛЕЦ А*

В данной главе мы применим теорию, разработанную в работе [11] и кратко изложенную в предыдущей главе, к источнику СМЧД в Стрельце А*.

Как следует из работы [1], во время наблюдений зарегистрирована переменность плотности потока излучения в миллиметровом диапазоне на уровне 4–13%. Также была зафиксирована вспышка в рентгеновском диапазоне. Таким образом, для наших целей такой вспышкой вполне может быть вспышка, приведенная в статье [1, рис. 2]. Продолжительность этой вспышки составляет более двух часов, что значительно больше характерного времени t_{ph} . Данная вспышка в образе СМЧД сначала отобразилась в виде яркого пятна в диске, а спустя некоторое время порядка t_{ph} — в первом фотонном кольце, а затем и во втором. Из-за недостаточного разрешения ТГС им не удалось выделить различные фотонные кольца по радиусу, поэтому все три вспышки изобразились на одном наблюдаемом кольцеподобном образе, изображенном на рис. 3. Три яркие пятна на этом образе образуют систему вспышки в диске и ее отражения в фотонных кольцах и являются излучением от одной физической вспышки в аккреционном диске. Если это так, то относительное положение этих вспышек на данном образе зависит только от спина черной дыры и, следовательно, угол между линиями, соединяющий яркие пятна в кольцеобразной структуре, определяется спином, как изображено на рис. 3. На рис. 4 показана зависимость угла между положениями ярких пятен от спина черной дыры для наблюдателя, расположенного на оси вращения черной

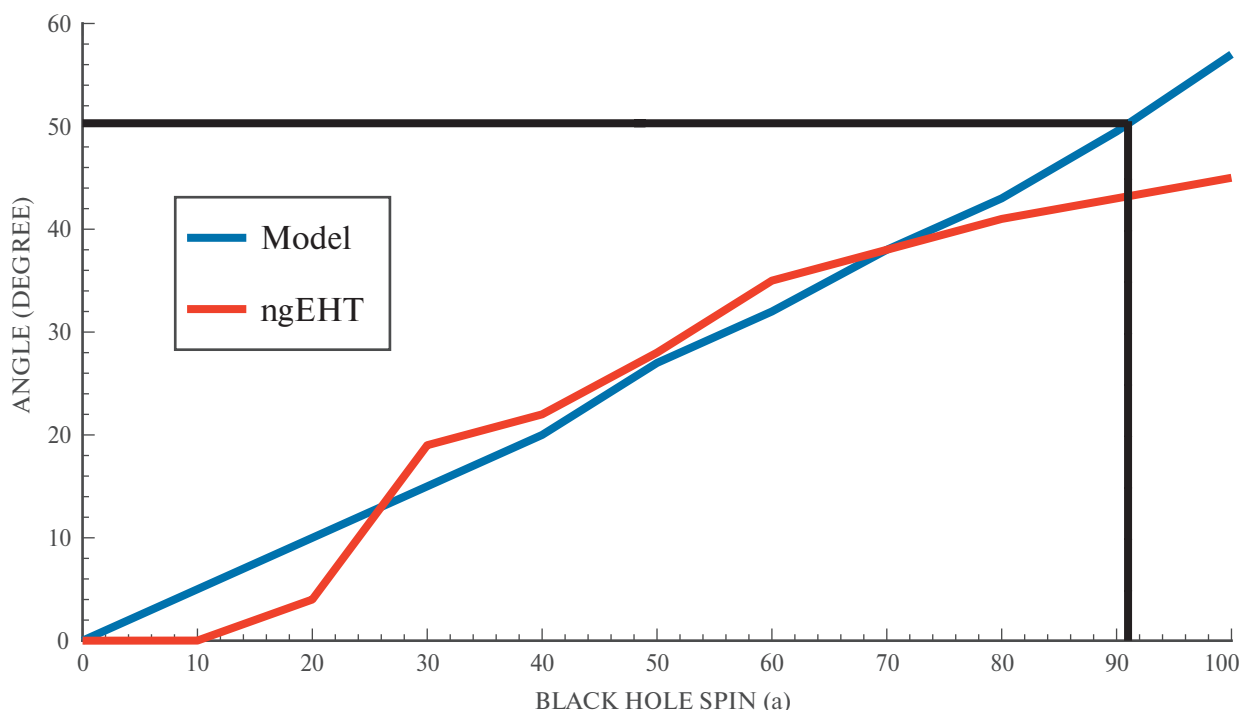


Рис. 4. Зависимость угла между положениями вспышек в диске и в фотонных кольцах от спина черной дыры. Синей линией показана теоретическая зависимость. Красной линией — зависимость, вычисленная с учетом ошибки определения положения ярких пятен на РСДБ-изображениях. Ошибка определяется ограниченным заполнением области пространственных частот в реальных РСДБ-наблюдениях.

дыры. Прямая синяя линия соответствует теоретическим предсказаниям. Измеряя угол на рис. 3 с помощью теоретической кривой, на рис. 4 можно определить спин черной дыры. Угол на рис. 3 приблизительно равен $\alpha \approx 50^\circ$, что соответствует спину на рис. 4, приблизительно равному $a \approx 0.9$. Таким образом, спин СМЧД в источнике Стрелец А* приблизительно равен $a \approx 0.9$.

Данная оценка оказалась больше, чем оценки, полученные в предыдущих работах [2, 12, 13]. Это может быть связано с несколькими причинами. На сегодняшний день остается неизвестным угол наклона наблюдателя к оси вращения черной дыры. Стоит заметить, что зависимость угла между вспышками от наклона угла наблюдателя есть, но довольно слабая. Поэтому в данной грубой оценке спина ею можно пренебречь. Также достаточно сложно определить центр яркого пятна. Не стоит забывать и про наблюдательные ошибки. Тем не менее, предложенный метод дает вполне разумную оценку.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние несколько лет был достигнут значительный прогресс в тестировании общей теории относительности в сильном гравитационном поле. Были открыты двойные черные дыры [15], получены

образы черных дыр [1, 16], но проблема определения параметра вращения, спина черной дыры, еще не решена. В данной работе рассматривается метод определения спина черной дыры по вспышкам в аккреционном диске и по их отражениям в фотонных кольцах. Данная модель, развитая в работе [11], применяется к СМЧД в Стрельце А*. Была получена оценка спина, равная $a \approx 0.9$. В дальнейшем, данная оценка может быть скорректирована за счет лучшего разрешения и определения угла наклона наблюдателя к оси вращения черной дыры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef, J.C. Algaba, et al., *Astrophys. J. Letters* **930**(2), id. L12 (2022).
2. С.В. Чернов, *Астрон. журн.* **98**(2), 132 (2021).
3. R. Fraga-Encinas, M. Moscibrodzka, and H. Falcke, *arXiv:2312.12951 [astro-ph.HE]* (2023).
4. M. Subroweit, M. Garcia-Marin, A. Eckart, A. Borkar, M. Valencia-S., G. Witzel, B. Shahzamanian, and C. Straubmeier, *Astron. and Astrophys.* **601**, id. A80 (2017).
5. M. Garcia-Marin, A. Eckart, A. Weiss, G. Witzel, et al. **738**(2), id. 158 (2011).
6. G. Trap, A. Goldwurm, K. Dodds-Eden, A. Weiss, et al., *Astron. and Astrophys.* **528**, id. A140 (2011).

7. *D.P. Marrone, F.K. Baganoff, M.R. Morris, J.M. Moran, et al.*, **682**(1), 373 (2008).
8. *V.L. Fish, S. S. Doeleman, C. Beaudoin, R. Blundell, et al.*, *Astrophys. J. Letters* **727**(2), id. L36 (2011).
9. *A.M. Ghez, S.A. Wright, K. Matthews, D. Thompson, et al.*, **601**(2), L159 (2004).
10. *M. Wielgus, N. Marchili, I. Marti-Vidal, G.K. Keating, et al.*, *Astrophys. J. Letters* **930**(2), id. L19 (2022).
11. *A. Andrianov, S. Chernov, I. Girin, S. Likhachev, A. Lyakhovets, and Yu. Shchekinov*, *Phys. Rev. D* **105**(6), id. 063015 (2022).
12. *Y. Kato, M. Miyoshi, R. Takahashi, H. Negoro, and R. Matsumoto*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **403**, L74 (2010).
13. *V.I. Dokuchaev*, *General Relativ. and Gravit.* **46**, 1832 (2014).
14. *M.D. Johnson, A. Lupsasca, A. Strominger, G.N. Wong, et al.*, *Science Advances* **6**(12), eaaz1310 (2020).
15. *B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, M.R. Abernathy, et al.*, *Phys. Rev. Letters* **116**(6), id. 061102 (2016).
16. *K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef, K. Asada, et al.*, *Astrophys. J. Letters* **875**(1), id. L1 (2019).

ESTIMATION OF THE SPIN OF A SUPERMASSIVE BLACK HOLE IN SAGITTARIUS A*

A. S. Andrianov^a, S. V. Chernov^a

^a*Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia*

In April 2017, the Event Horizon telescope received an image of a supermassive black hole in the Sagittarius A* source. This image consists of a ring-like structure that contains three areas with increased brightness (spots). If we assume that these spots are associated with flares near the event horizon of a black hole, then we can estimate its spin. Our estimate gives a value of the order of $a \approx 0.9$.

Keywords: supermassive black holes, flares, spin, Sagittarius A*