

УДК 523.9

Необычное и продолжительное вспышечное явление в блазаре 3C454.3

¹ Вольвач А. Е., ¹ Вольвач Л. Н., ² Ларионов М. Г.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики,
Крымская астрофизическая обсерватория, Ялта, 298688, Российская Федерация
² Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН,
Москва, Российская Федерация
volvach@bk.ru

Получено: 07 ноября 2020 г.

Отрецензировано: 22 ноября 2020 г.

Принято к публикации: 5 декабря 2020 г.

Аннотация: Проанализированы данные длительного многочастотного мониторинга активного ядра галактики (АЯГ) 3C 454.3. Необычная по форме и продолжительности вспышка, которая произошла в объекте в 2010—2020 гг., может быть объяснена явлением, связанным с совпадением плоскостей аккреционного диска (АД) сверхмассивной черной дыры (СМЧД) и орбиты компаньона. Присутствие орбитального периода в 2,3 года и полупериода 1,1 год в вариациях излучения 3C 454.3 в течение последней вспышки свидетельствуют также в пользу указанной гипотезы, а не в пользу резкого изменения гамма- (γ) и доплер- (δ) факторов, которые могли бы привести к значительному удлинению наблюдаемого орбитального периода. Существенные по амплитуде мелкомасштабные флуктуации плотности потока излучения во время продолжительной вспышки могут быть следствием неоднородностей материи в АД размерами порядка 10^{14} — 10^{15} см и могут быть использованы для изучения распределения вещества АД. Выполнены оценки уровня возможных гравитационных волн (ГВ), идущих от 3C 454.3.

Ключевые слова: активные ядра галактик, черные дыры, гравитационные волны.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. Необычное и продолжительное вспышечное явление в блазаре 3C454.3 // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 3. С. 265—276.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Вольвач, А. Е. Необычное и продолжительное вспышечное явление в блазаре 3C454.3 / А. Е. Вольвач, Л. Н. Вольвач, М. Г. Ларионов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 265—276.

Unusual by duration and shape of the flare in blazar 3C454.3

A. E. Volvach¹, L. N. Volvach¹, and M. G. Larionov²

¹Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory,
Yalta, 298688, Russian Federation

²Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences
Moscow, 117997 Russian Federation
volvach@bk.ru

Received: November 7, 2020

Peer-reviewed: November 22, 2020

Accepted: December 5, 2020

Abstract: Data from the long-term multi-frequency monitoring of the active galactic nuclear 3C 454.3 are analyzed. An unusual shape and duration of the flare occurred in the object in 2010—2020. This phenomenon of the flare can be explained by coincidence of the planes of the accretion disk (AD) of the Central supermassive black hole (SMBH) and the orbit of the companion. The presence of the orbital period of 2.3 years and half period 1.1 year in the radiation variations of 3C 454.3 during the flare also supports this hypothesis, rather than a sharp change in the γ and Doppler (δ) factors that could lead to a significant extension of the observed orbital period. Large amplitude small-scale fluctuations in the radiation flux density during a long flare can be the result of inhomogeneities of matter in AD with dimensions of the order of 10^{14} — 10^{15} cm and can be used to study the substance of AD. Estimates of the level of possible gravitational waves (GW) coming from 3C 454.3 are made.

Keywords: active galactic nuclei, black holes, gravitational waves.

For citation (IEEE): A. E. Volvach, L. N. Volvach, M. G. Larionov, “Unusual by duration and shape of the flare in blazar 3C454. 3,” *Infocommunications and Radio Technologies*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 265—276. (In Russ.).

1. Введение

АЯГ 3С 454.3 — один из ярчайших блазаров многие десятилетия изучается в широком диапазоне частот электромагнитного спектра. В радиодиапазоне мониторинг начат в Мичиганской радиоастрономической обсерватории в 1974 г. на частоте 14,5 ГГц. На миллиметровых волнах в наблюдениях участвовал РТ-22 КрАО в Симеизе (Крым) [1].

ДСЧД становится тесной двойной системой (ТДС), когда компаньон центральной СЧД в перицентре орбиты пересекает АД. Двигаясь со сверх-

звуковой скоростью, он создает ударные волны, распространяющиеся по диску также со сверхзвуковой скоростью и достигающие истоков «джетов», что и инициирует вспышки в АЯГ. Именно состояние ТДС обеспечивает их свойство как АЯГ. Этим и объясняется относительная немногочисленность популяции АЯГ ($\sim 10^4$) среди многочисленных эллиптических галактик ($\sim 10^{10}$).

Многочастотные наблюдения, выполненные на одиночных радиотелескопах, являются независимым способом исследования внутренней структуры АЯГ, которая недоступна даже для глобальных интерферометров и служат важным дополнением к интерферометрии со сверхдлинными базами — РСДБ.

В работах [2, 3, 4] нами продолжен новый метод исследований АЯГ в рамках модели ДСЧД без привлечения других данных кроме радиодиапазона. На основе длительного многочастотного мониторинга в радиодиапазоне определены параметры ТДС из СМЧД, включая орбиты и массы систем.

В предлагаемой работе анализируются новые данные, полученные во время детального мониторинга продолжительной вспышки в 3С 454.3 на миллиметровых волнах в течении 2010—2020 гг. Предложена интерпретация необыкновенного по длительности вспышечного явления и оценена мощность гравитационных волн (ГВ), излучаемых 3С 454.3.

2. Наблюдения и обработка

Радионаблюдения на 22,2 и 36,8 ГГц производились с помощью 22-метрового радиотелескопа (РТ-22) Крымской астрофизической обсерватории. Использовались радиометрические системы с диаграммной модуляцией [1]. Так удавалось избежать присутствия в данных аномального спектра флуктуаций коэффициентов усиления усилителей, существенно искажающего результаты. Дополнительным преимуществом используемого способа приема было снижение уровня флуктуаций неоднородностей атмосферы, которые существенны на сантиметровых и особенно на миллиметровых длинах волн.

Антенная температура от источника фиксировалась как разность сигналов с выхода радиометра в двух положениях антенны, когда радиотелескоп устанавливался на источник поочередно то одним то другим приемными рупорами. Наблюдения каждого источника, как правило, состояли из 5—20 измерений. Затем рассчитывалось среднее значение, и вычислялась среднеквадратичная ошибка среднего. Параллельно с наблюдениями исследуемых объектов проводились наблюдения калибровочных источников, параметры которых указаны в таблице 1.

Таблица 1. Параметры калибровочных источников.

Table 1. Parameters of calibration sources

Частота, ГГц	Принятые значения потоков для источников, Ян			
	DR 21	3C 274	NGC 7027	3C 286
36.8	18.3	14.3	5.1	1.56
22.2	19.5	21.5	5.4	2.37

Примечание: В первой колонке таблицы указана частота, во второй—пятой — принятые спектральные плотности потоков.

Антенные температуры от источников пересчитывались в плотности потоков с использованием зависимости:

$$P = 2kT_a/S_{эфф}, \quad (1)$$

где P — поток радиисточника, k — постоянная Больцмана, T_a — антенная температура от источника, $S_{эфф}$ — эффективная площадь радиотелескопа. Изменение эффективной площади антенны $S_{эфф}$ от угла места h определялась по данным наблюдений калибровочных источников на разных h и азимутах A_z антенны с введением соответствующих поправочных коэффициентов. В диапазоне h от 60° до 90° изменений $S_{эфф}$ не отмечено и на этих углах поправочные коэффициенты не вводились.

Среднеквадратичные ошибки плотностей потоков включали ошибки измерений антенной температуры. Типичные ошибки значения T_a находились в пределах 5 %. При данной методике наблюдений учитывались также ошибки, возникающие вследствие изменений уровня шумов аппаратуры, вариаций коэффициента поглощения в атмосфере, нестабильности коэффициента усиления радиометра и ошибки наведения радиотелескопа.

Мониторинг на частоте 14,5 ГГц выполнялся на 26-метровом радиотелескопе РТ-26 обсерватории Мичиганского университета в период 1974 по 2012 гг., базы данных которого были ранее опубликованы и использованы в работах [4, 5]. Мониторинг на частоте 15 ГГц выполнялся с помощью 40-метрового радиотелескопа Owens Valley Radio Observatory [6] в период 2008—2019 гг.

Данные в гамма-диапазоне получены в рамках миссии FERMI на инструменте LAT¹. Источник 1FGL 2253.9+1608 был позиционно отождествлен с блазаром 3C 454.3 [7]. Каждая точка соответствует усредненному за сутки фотонному потоку, интегрированному в диапазоне энергий от 100 МэВ до 300 ГэВ.

¹ http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/extract_latdata.html

3. Результаты

На рис. 1 приведены кривые блеска источника в радио и гамма-диапазонах длин волн в период с 2008 по 2020 гг. На основе данных радиодиапазона за весь период наблюдений с 2014 г. выполнен гармонический анализ вариаций плотности потока излучения с помощью метода Шустера [4]. В таблице 2 приведены данные гармонических составляющих, усредненные по всем частотам (первая строка таблицы).

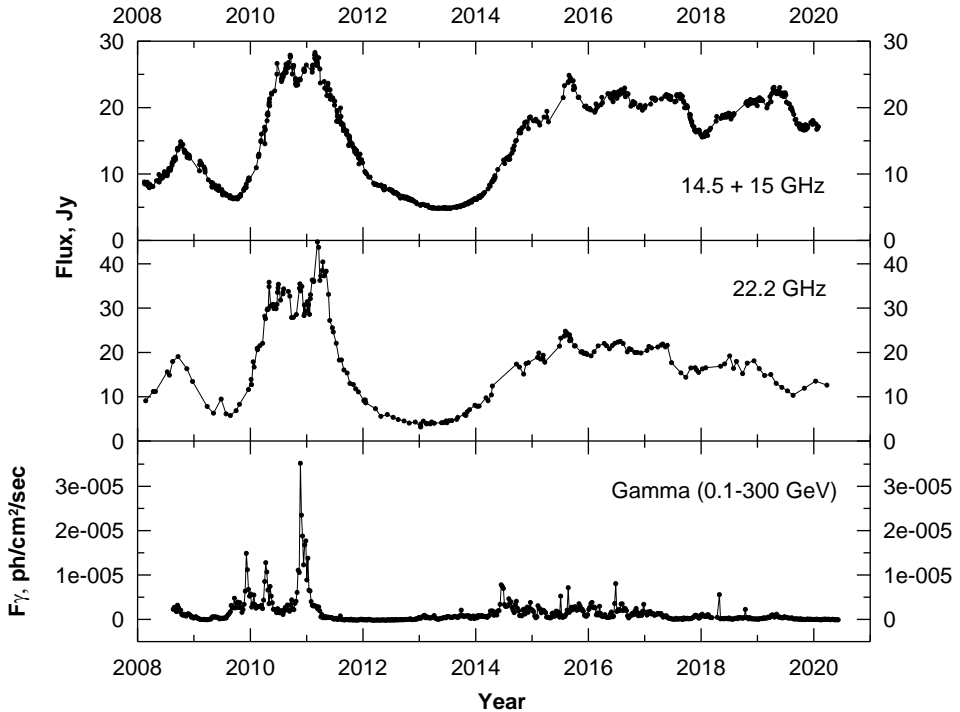


Рис. 1. Данные многочастотного мониторинга 3C454.3 в период с 2008 по 2020 гг.

Fig. 1. Data of multifrequency monitoring 3C454.3 in the period from 2008 to 2020

Как и в гармоническом анализе данных, проведенном нами ранее, уверенно выделяется период в 14 лет, который следует отнести к прецессионным движениям центральной массивной черной дыры и связанных с ней центральных областей аккреционного диска. Самый короткий период в 2,3 года можно соотносить периодам вращения центрального тела и компаньона по орбите. Этот период, естественно, более четко выделяется на высоких частотах 22,2 и 36,8 ГГц. Близкие значения периодов для 3C454.3 выявлены также в работе [8].

Во второй строке таблицы 2 показаны периоды в системе координат, связанной с источником ($z = 0.86$) при значении $\gamma = 5$. Для блазара 3C454.3 пересчет осуществлялся по формуле, указанной в работе [9]:

$$T_{ист} \approx T_{набл} \cdot \gamma^2 / (1+z). \quad (2)$$

Таблица 2. Результаты гармонического анализа многочастотного мониторинга 3C454. 3.

Table 2. Results of harmonic analysis of multifrequency monitoring 3C454. 3

$T_{1966-2020}$ (years)	14.0 ± 1.4 ($T_{pr, obs}$)	7.3 ± 0.7	2.3 ± 0.2 ($T_{orb, obs}$)	1.1 ± 0.1
$T_{[\gamma^2/(1+z)]}$ (years)	188 ± 19 ($T_{pr, ist}$)	100.0 ± 10.0	31.0 ± 2.8 ($T_{orb, ist}$)	15.0 ± 1.5

Отношение прецессионного и орбитального периодов составляет величину около шести. В таблице 3 приведены три варианта данных по размерам орбиты и массам компаньонов, рассчитанных в рамках модели двойных систем из СМЧД, основанной на законах небесной механики и дающей значения масс компаньонов и их связь с размерами орбиты [10]:

$$m = (16\pi^2 \cdot r^3) / (3G \cdot T_{orb} \cdot T_{np}), \quad (3)$$

$$M = m (0.75 \cdot T_{np} / T_{orb} - 1), \quad (4)$$

где M , m , r — масса центральной СМЧД, компаньона и радиус орбиты компаньона соответственно.

Таблица 3. Параметры компаньонов СМЧД 3C 454.3 и время жизни до слияния.

Table 3. Parameters of SMChD 3C 454.3 companions and lifetime before fusion

Radius of the companions orbit	Mass of the companion	Mass of the central SMBH	Life-time, years
$6.0 \cdot 10^{17}$ cm	$1.6 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	$5.7 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	$1.3 \cdot 10^4$
$4.5 \cdot 10^{17}$ cm	$6.8 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$2.4 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	$5.5 \cdot 10^4$
$3.0 \cdot 10^{17}$ cm	$2.0 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$7.0 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$4.2 \cdot 10^5$

4. Дискуссия

Как следует из приведенных параметров системы в таблице 3, приемлемыми значениями для радиуса орбиты компаньона и масс черных дыр являются данные во второй строке. В этом случае вопрос о потерях на

гравитационное излучение остро не стоит, и нет непомерно большого значения массы центрального тела. Скорость движения компаньона по орбите при этом составляет около 30000 км/с, которая является не только сверхзвуковой для газово-пылевой среды АД, но и почти релятивистской ($0.1 c$). Температура за фронтом ударных волн при таких скоростях поднимается выше $T \approx 10^{10} K$.

Температуру нагрева газа за фронтом ударных волн, возникающих от сверхзвукового движения компаньона двойной черной дыры, определяем из соотношения:

$$m_p \cdot v^2 / 2 = 3kT / 2, \quad (5)$$

где m_p — масса иона, v — направленная скорость движения газа ($\approx 3 \cdot 10^9$ см/с).

Вспышка в 3C 454.3 началась, по-видимому, в 2010 г. В это время компаньон начал приближаться к центральным областям АД (рис. 1). Амплитуда вспышки достигла максимальных значений и удерживалась на этих уровнях около года. После этого, в течение полутора лет спектральная плотность потока упала в 10 раз и через такое же время восстановилась, но не до максимального уровня, на котором находилась до 2020 г. (см. панель 14,5+15 ГГц). Такого не было замечено ни в одном АЯГ. Начавшаяся с начала 2010 г. вспышка в 3C 454.3 продолжается уже десять лет. Благодаря совпадению плоскостей АД и орбиты компаньона последний перемещается по орбите, расположенной внутри АД, поэтому мы и наблюдаем специфический профиль вспышки. Эпизодический выход спада амплитуды вспышки можно объяснить уменьшением γ -фактора в 2 раза, возможно, за счет прецессионного и нутационного движения оси центральной СМЧД.

Все предыдущие вспышечные явления в этом и других объектах имели острые максимумы без плато. По-видимому, ситуация, когда компаньон длительное время находится внутри АД, случается довольно редко. Для этого необходимо, чтобы угол между направлением на наблюдателя и выбросом (джетом) находился внутри конуса прецессии, что обеспечивает попадание излучения к наблюдателю. Вспышка будет продолжаться и далее до тех пор, пока компаньон либо не разрушит АД полностью, либо наступит момент, когда компаньон все-таки выйдет из АД. Анализируя данные на рис. 1, создается впечатление, что компаньон все-таки выйдет из АД. В этом случае АД не разрушится полностью или частично, а восстановится. Этому способствуют два обстоятельства:

а) из-за прецессии орбиты (движение перицентра) компаньон перемещается с каждым новым оборотом по новой траектории в АД,

б) скорость замещения «выметенного» вещества в АД выше скорости движения компаньона по орбите. Это обеспечивают высокие тепловые скорости и дополнительное внешнее давление вещества в АД.

По нашим данным прецессионный период в системе составляет около 14 лет [11]. Значительную часть этого периода компаньон уже находится в АД. На основе кривой изменения потока (на частоте 36,8 ГГц, например) он будет там находиться еще некоторое время до полного выхода из АД [12]. В первом приближении можно принять, что компаньон будет находиться в АД целый период прецессии.

Если говорить о толщине d АД вокруг центрально СМЧД, то она много меньше диаметра. Были получены ориентировочные данные об угле раствора конуса прецессии в системе i и угле между выбросом (джетом) и направлением на наблюдателя $\gamma^2 \approx 1/\theta \approx 25$ (при $\theta \approx 2.5^\circ$).

С другой стороны, интервалы активности в источнике по времени составляют большую часть прецессионного периода, откуда следует, что $i \geq \theta \approx 5^\circ$. Поэтому вариация углов наклона АД к плоскости орбиты компаньона не превышает $\pm 2.5^\circ$, что составляет 1/25 от радиуса АД.

Если предположить наличие в системе 3C454.3 стационарной аккреции на центральную СМЧД со стороны АД, то естественно считать, что толщина АД составляет не менее двух гравитационных радиусов центральной СМЧД: $d_{ad} \approx 2R_g \approx 2 \cdot 10^{16}$ см [5]. Это подтверждает мнение о том, что АД является физически тонким, но оптически толстым по Томсоновскому рассеянию (отношение толщины к диаметру диска около 25).

Согласно новым данным о сверхдлительной вспышке в 3C454.3 и высказанных предположениях о толщине АД можно получить размеры орбиты компаньона в рамках модели двойной тесной системы из СМЧД, предложенной нами в [2, 11]. Если использовать значение для массы центральной СМЧД (строка 2 табл. 3), то $R_{orb} \approx 2R_g \cdot 25 \approx 5 \cdot 10^{17}$ см. Тогда эти данные почти совпадают со значением для радиуса орбиты компаньона (строка 2 табл. 3).

Таким образом, неудивительно, что компаньон при совпадении плоскостей орбиты и АД несколько орбитальных периодов находится внутри АД.

Временные масштабы изменений потоков во время вспышек могут дать информацию о распределении размеров неоднородностей материи в АД. Известно, что характерное время значительных изменений потоков может составлять величину порядка дней. При скоростях движения компаньона в АД ($3 \cdot 10^9$ см/с) это дает размер неоднородности $l \approx 10$ а. е. Таким способом мы можем зондировать структуру АД на предмет распределения в нем вещества.

Оцененное время жизни системы 3C454.3 по формуле (1) работы [13] дает значение $\tau_{\text{сл}} = 4,5 \cdot 10^4$ лет при значениях двойной системы, указанные во второй строке таблицы 3. По космическим меркам ($T \approx 10^{10}$ лет) — величина ничтожная, но она дает ответ на вопрос, почему АЯГ такие немногочисленные ($N_{\text{АЯГ}} \approx 10^4$) среди массивных эллиптических галактик ($N_{\text{эллг}} \approx 10^4$).

В связи с изложенным можно отметить, что в последние годы сильно возрос интерес к проблеме возможности обнаружения гравитационных волн от массивных ускоренно двигающихся астрофизических объектов. К ним, безусловно, относится уникальная двойная система 3C454.3. До недавнего времени считалось, что достоверно установленной единственной двойной системой из СМЧД является ОJ 287. Основные наблюдательные данные для этой системы были получены в оптическом диапазоне в течение более 100 лет. Это первая из двойных СМЧД, для которой были определены параметры орбиты и характеристики СМЧД для нахождения значений мощности гравитационных волн от этого источника.

С использованием кривой блеска в оптическом диапазоне была построена прецессионная модель двойной СМЧД для источника ОJ 287 [14]. Мощность ГВ, идущая от источника:

$$dE/dt = L_{\text{OJ287}} = \{32 \cdot G^4 \cdot M^2 \cdot m^2 (M+m) \cdot (1+3.5e^2+1.4e^4)\} / \{5c^5 \cdot a^5 (1-e^2)^{1/2}\} \approx 2.3 \cdot 10^{44} \text{ эрг/с} \quad (6)$$

где масса центральной СМЧД $M = 1.8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, масса компаньона $m = 1.4 \cdot 10^8 M_{\odot}$, эксцентриситет орбиты $e = 0,7$, большая полуось орбиты $a = 10^{17}$ см. Это принятые значения параметров ОJ 287 [15]. Полученные данные согласуются по порядку величины с данными в работах других авторов [14, 16, 17]. Во время вспышечных явлений в ОJ 287 мощность ГВ может возрасти на несколько порядков.

Оценим мощность ГВ идущих от нашего источника 3C 454.3. Как было показано выше, эта двойная СМЧД является тесной двойной системой с радиусом орбиты компаньона $R_{\text{orb}} \approx 4.5 \cdot 10^{17}$ см. Если допустить аналогичный ОJ 287 эксцентриситет $e = 0,7$, массы центральной СМЧД и компаньона (строка 2 табл. 3), то получим мощность ГВ, излучаемую двойной системой 3C 454.3, равную $dE/dt = L_{3C 454.3} \approx 4.5 \cdot 10^{46} \text{ эрг/с}$, что в 200 раз больше, чем от источника ОJ 287.

Таким образом, блазар 3C 454.3 ($z = 0,8$) в настоящее время является самым мощным излучателем ГВ. Он находится несколько дальше, чем ОJ 287 ($z = 0,3$). Но даже с учетом разницы в расстоянии $R_{3C454.3}/R_{\text{OJ287}} \approx 2,7$ амплитуда ГВ от него на Земле будет существенно больше. Это связано, в

первую очередь, с тем, что по параметрам модели у ЗС 454.3 гораздо более массивный компаньон (его масса на 2 порядка больше). В этой связи будет интересно оценить время жизни этой системы до слияния [18, 19].

Учитывая приведенную мощность потерь на гравитационное излучение $L_{ЗС\ 454.3} \approx 4,5 \cdot 10^{46}$ эрг/с, время жизни системы до слияния составляет всего $T_{сл} \approx 5,5 \cdot 10^4$ лет, что по космическим меркам ничтожно мало. Этот результат лишний раз доказывает, почему яркие АЯГ так немногочисленны.

Если бы слияние в ЗС 454.3 произошло в настоящее время, то это был бы ~~неизящный~~ подарок для гравитационных детекторов LIGO, VIRGO, LISA и им подобным. Но на это не приходится рассчитывать. Указанные детекторы эффективно работают на временных шкалах секунды и меньше. Двойные системы из СМЧД излучают ГВ на частотах 10^{-8} — 10^{-9} Гц. В этом случае для регистрации таких «растянутых» событий лучше всего подходят детекторы установки IPTA [20], работающие как раз в этом диапазоне частот.

5. Выводы

1. Проанализированы данные длительных многочастотных мониторингов необычного вспышечного явления в источнике ЗС454.3 за период 2010—2020 гг.
2. Форма изменения потока во время вспышки может указывать на совпадение плоскостей аккреционного диска АД и орбиты компаньона центральной сверхмассивной черной дыры СМЧД.
3. Наличие предполагаемого орбитального периода в 2,3 года в вариациях излучения ЗС 454.3 в течение длительной вспышки свидетельствуют также в пользу высказанной гипотезы, но не в пользу резкого изменения γ - и доплер-факторов, которые могли бы привести к наблюдаемому эффекту удлинения орбитального периода.
4. По нашим прогнозам, из-за прецессии центрального тела компаньон центральной СМЧД через некоторое время все-таки выйдет из АД, если последний сохранит свою устойчивость и не разрушится.
5. По данным мониторинга наблюдаются значительные по амплитуде флуктуации плотности потока излучения во время продолжительной вспышки, которые могут быть следствием неоднородностей материи в АД размерами порядка 10^{15} — 10^{16} см. Поэтому, подробный длительный мониторинг ярких двойных СМЧД может быть использован для изучения распределения характерных размеров вещества в АД.
6. Выполнены оценки уровня возможных гравитационных волн (ГВ), идущих от ЗС 454.3. Показано, что данная система является в насто-

ящее время самым мощным излучателем ГВ и амплитудой ГВ на Земле, превосходящей аналогичную от OJ 287.

7. Оцененное время жизни системы 3C 454.3 показывает, что это очень короткоживущий объект со временем жизни всего $5,5 \cdot 10^4$ лет.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-29-11005 (А.Е.В., М.Г.Л.). В исследовании использованы данные программы мониторинга 40-метрового радиотелескопа OVRO [6], которая частично поддержана грантами НАСА NNX08AW31G, NNX11A043G, NNX14AQ89G и NSF, а также грантами AST-0808050 и AST-1109911.

Список литературы

1. Ефанов В. А., Моисеев И. Г., Нестеров Н. С. Обзор внегалактических радиоисточников на волне 1,35 см // Изв. КРАО. 1979. Т. 60. С. 3—13.
2. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. и др. Корреляция развития вспышечного явления в блазаре 3C 454.3 в радио- и оптическом диапазонах // Астрон. журн. 2008. Т. 85, № 11. С. 963—971.
3. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кутькин А. М. и др. Субпарсекковая структура двойных сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик // Астрон. журн. 2010. Т. 87, № 1. С. 33—42.
4. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кутькин А. М., Сергеев С. Г., Дорошенко В. Т., Назаров С. В., Борман Г. В., Пушкарев А. Б., Чеснок Н. Г. Многочастотные исследования нестационарного излучения блазара 3C 454.3 // Астрон. журн. 2011. Т. 88, № 7. С. 662—670.
5. Вольвач А. Е., Кутькин А. М., Ларионов М. Г., Вольвач Л. Н. и др. Продолжительное вспышечное явление в блазаре 3C 454.3 // Астрон. журн. 2013. Т. 90, № 1. С. 53—59.
6. Richards J. L., Max-Moerbeck W., Pavlidou V. et al. Blazars in the Fermi era: the OVRO 40 m telescope monitoring program // ApJS, 2011, vol. 194:29, pp. 1—22.
7. Sasada M., Uemura M., Arai A. et al. Multiband Photopolarimetric Monitoring of an Outburst of the Blazar 3C 454.3 in 2007 // PASJ, 2010, vol. 62, no. 3, pp. 645—652.
8. Рябов М. И., Сухарев А. Л. Определение характера спектральных и временных изменений потоков радиоизлучения активных ядер галактик и квазаров на различных фазах их активности // Радиофизика и радиоастрономия. 2008. Т. 13, № 3. С. 98—104.
9. Rieger F. M. Periodic variability and binary black hole systems in blazars // AIP Conference Proceedings, 2005, vol. 745, pp. 487—492.
10. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Кутькин А. М. и др. Субпарсекковая структура двойных сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик // Астрон. журн. 2010. Т. 87, № 1. С. 33—42.
11. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. и др. Переменность излучения блазара 3C 454.3 за период 40 лет // Астрон. журн. 2007. Т. 84, № 6. С. 503—513.
12. Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. Мониторинг вспышечного явления 2014—2018 гг. в блазаре 3C454.3 // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2019. Т. 2, № 1. С. 5—12.
13. Rodriguez C., Taylor G. B., Zavala R.T. et al. A Compact Supermassive Binary Black Hole System // Astrophys. J., 2006, vol. 646, pp. 49—60.

14. Valtonen M. J. New Orbit Solutions for the Precessing Binary Black Hole Model of OJ 287 // *ApJ*, 2007, vol. 659, pp. 1074–1081.
15. L. Dey, A. Gopakumar, M. Valtonen, et. al. The Unique Blazar OJ 287 and Its Massive Binary Black Hole Central Engine // *Universe*, 2019, vol. 5, 108, pp. 1–16.
16. Sun Yu-Tao, Liu Jie-Ying, Liu Jin-zhong, Ai Yan-Li, Zhou Ming, Qiao Er-lin. A Research on the Gravitational Wave Radiation of OJ 287 // *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2011, vol. 35, iss. 2, pp. 123–132.
17. Hobbs G., Archibald A., Arzoumanian Z. et al. The international pulsar timing array project: using pulsars as a gravitational wave detector // *CQGra*, 2010, vol. 27, 084013, pp. 1–11.
18. Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., Вольвач Л. Н., Аллер Х. Д., Аллер М. Ф. Двойные сверхмассивные черные дыры как возможные источники мощного излучения гравитационных волн // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 1. С. 5—23.
19. Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., Дмитроца А. И. Гигантские вспышки мазера метанола в G358.931-0.030 и возможность детектирования гравитационных волн от тесных массивных звездных систем // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 1. С. 24—31.
20. Manchester R. N. The Parkes Pulsar Timing Array // *ChJAS*, 2006, vol. 6, suppl. 2, pp. 139–147.

Информация об авторах

Вольвач Александр Евгеньевич, доктор физико-математических наук, заместитель директора по научной работе ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Вольвач Лариса Николаевна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», пгт. Научный, Крым.

Ларионов Михаил Григорьевич, доктор физико-математических наук, заместитель руководителя Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, Москва.

Information about the authors

Alexandr E. Volvach, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Larisa N. Volvach, PhD. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS”, Nauchni, Crimea, Russian Federation.

Michail G. Larionov, Dr. Sci., Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russian Federation.