

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2020.4.4.003

УДК 524.882, 551.511.31

## Мощность гравитационного излучения блазара OJ 287

А. Е. Вольвач<sup>1</sup>, Л. Н. Вольвач<sup>1</sup>, М. Г. Ларионов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Отдел радиоастрономии и геодинамики Крымской астрофизической обсерватории РАН, Россия, Крым, 98688, г. Ялта, пгт. Кацивели, ул. Шулейкина 1, РТ-22

<sup>2</sup> Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, 117997, ГСП-7, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

### Аннотация

С применением новой модели, основанной на рассмотрении тесных двойных систем (ТДС) из сверхмассивных черных дыр, получены данные для блазара OJ 287, необходимые для нахождения параметров гравитационного излучения OJ 287. Использовались результаты многочастотных мониторингов, выполненных только в радиодиапазоне. Применение гармонических анализов наблюдательных данных позволило построить модель ТДС, состоящих из двух близких по массе сверхмассивных черных дыр (СМЧД), что дало возможность получить найти мощность гравитационного излучения, идущего от OJ 287, вариации орбиты двойной СМЧД и рассмотреть возможность экспериментального определения изменений этих параметров в системе. Рассмотрены варианты излучения электромагнитных и гравитационных волн, идущих от OJ 287 в различных состояниях активности объекта.

### Ключевые слова

активные ядра галактик, черные дыры, тесные массивные системы, гравитационные волны

### Для цитирования

Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. Мощность гравитационного излучения блазара OJ 287. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(4):397–411. DOI: 10.15826/urej.2020.4.4.003.

## The gravitational radiation power of the blazar OJ 287

А. Е. Volvach<sup>1</sup>, L. N. Volvach<sup>1</sup>, M. G. Larionov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Radio Astronomy and Geodynamics Department of Crimean Astrophysical Observatory RAS, RT-22 Crimea, 1 Shuleykina St., Katsively, Yalta, 98688, Russia

<sup>2</sup> Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, 84/32 Profsoyuznaya, Moscow, 117997, Russia

### Abstract

Using a new model based on the consideration of close binary systems (CDS) of supermassive black holes (SMBHs), we obtained data for the

OJ 287 blazar, which is necessary for finding the parameters of the OJ 287 gravitational radiation. We used the results of multi-frequency monitoring performed only in the radio band. The application of harmonic analyses of observational data allowed us to construct a model of CDS consisting of two SMBHs of comparable masses, which made it possible to find the power of gravitational radiation coming from OJ 287, variations in the orbit of the double SMDS, and to consider the possibility of experimentally determining changes in these parameters in the system. Variants of radiation of electromagnetic and gravitational waves coming from OJ 287 in various states of object activity are considered.

### Keywords

active galactic nuclei, black holes, closed massive systems, gravitational waves

### For citation

Volvach A. E., Volvach L. N., Larionov M. G. The gravitational radiation power of the blazar OJ 287. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(4):397–411. DOI: 10.15826/urej.2020.4.4.003.

### Введение

Блазар OJ 287 принадлежит к числу немногочисленных ярчайших представителей активных ядер галактик (АЯГ). Считается, что активность АЯГ связана с двойственностью их структуры. Они состоят из двойных сверхмассивных черных дыр (СМЧД), находящихся на стадии эволюции, близкой к слиянию. Наличие двойственности СМЧД в центрах активных галактик (АЯГ) было впервые отмечено в конце прошлого века в применении именно к АЯГ OJ 287 [1].

Существует ряд причин, по которым этот объект наблюдается в оптическом диапазоне уже более ста лет. Во-первых, это сравнительно близкая система, благодаря чему OJ 287 яркий в оптике. Кроме того, в направлении на источник отсутствует значительное поглощения света из-за пылевых масс, нередко расположенных в центральных областях материнских галактик.

Являясь мощными излучателями в электромагнитном диапазоне длин волн, СМЧД излучают и гравитационные волны (ГВ). Различные гравитационные детекторы могут регистрировать ГВ в различных частотных диапазонах. Но именно детекторы ГВ “International Pulsar Timing Array” (ИПТА) работают в супернизком частотном диапазоне ( $10^{-9}$ – $10^{-8}$  Гц) [2], где излучаемая двойными СМЧД мощность может быть значительной. Блазар OJ 287 считается наиболее известным представителем АЯГ во Вселенной, способным излучать мощные наногерцовые ГВ [3]. Даже без вспышек мощность ГВ от объекта может составлять величину  $dE/dT \approx 10^{45}$  эрг/с [4].

Для определения уровня излучения ГВ от двойных СМЧД необходимо знать их характеристики. ОJ 287 считается единственным СМЧД, у которого они хорошо известны. Эти характеристики включают в себя массы компонентов, полуоси орбит, орбитальные и прецессионные периоды, периоды вращения центрального тела, величину движения перицентра и эксцентриситет. Из данных многочастотных мониторингов мы можем получить времена и последовательности возникновения вспышек в источнике, которые не позволяют непосредственно получить все названные параметры двойных СМЧД. В этом случае задача заключается в применении модельного метода определения параметров с использованием определенных допущений или предположений.

В ряду СМЧД блазар ОJ 287 считается самой массивной из двойных систем [5]. Его характеристики включают в себя массы центральной СМЧД и компаньона:  $M \approx 1.8 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ ,  $m \approx 1.4 \cdot 10^8 M_{\odot}$ , большую полуось орбиты  $a \approx 1.4 \cdot 10^{17}$  см, орбитальный период, смещение перицентра орбиты  $39^{\circ}$  за один орбитальный период, эксцентриситет орбиты  $e \approx 0.7$ . Масса спутника определялась из предположения, что вспышки в оптическом диапазоне имеют некую средневзвешенную амплитуду 5.6 мЯн, хотя на самом деле они варьируются от 2.5 до 35 мЯн, то есть более чем на порядок величины. Из наблюдательных данных мы имеем только набор времен вспышечных явлений, чего явно недостаточно для однозначного определения параметров. Сложность заключается и в том, что модель построена на большом числе предположений и допущений. Поэтому любой новый подход для построения моделей СМЧД представляет интерес в решении этой проблемы.

Мы начали разрабатывать модель ТДС из СМЧД с привлечением только данных радиодиапазона [6–9].

В нашем представлении двойные СМЧД становятся яркими АЯГ только тогда, когда компаньон центральной СМЧД в перицентре орбиты начинает пересекать аккреционный диск (АД). В этом случае СМЧД становятся тесной двойной системой (ТДС). Двигаясь со сверхзвуковой скоростью, компаньон создает мощные ударные волны, которые распространяются по диску со сверхзвуковой скоростью и достигают истоков «джетов». Это может являться первопричиной инициирования вспышек в АЯГ [6]. Состояние ТДС является конечной фазой эволюции двойных СМЧД и обеспечивает их свойство как ярких АЯГ.

В представленной работе анализируются многочастотные данные блазара ОJ 287 с целью получения параметров двойной системы с использованием нового подхода при определении

параметров двойной системы из СМЧД ОJ 287. Найденные характеристики использованы для определения возможных изменений орбиты системы из-за гравитационного излучения. Регистрация гравитационных волн достаточно сложна ввиду слабости последних. На данный момент важным для регистрации гравитационных волн является создание гравитационных детекторов, работающих в требуемом диапазоне частот и имеющих необходимую чувствительность. В представленной работе получены оценки мощности ГВ, излучаемых объектом ОJ 287.

### Наблюдения и обработка

Наблюдения на частоте 22.2 ГГц производились с помощью 22-метрового радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории. Использовалась радиометрическая система с диаграммной модуляцией. Так удавалось избежать присутствия в данных мешающего 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 определялась как разность сигналов с выхода радиометра в двух положениях антенны, когда радиотелескоп устанавливался на источник поочередно, то одним, то другим приемными рупорами (on-on). Наблюдения каждого источника состояли из 5-20 таких измерений. Затем рассчитывалось среднее значение и вычислялась среднеквадратичная ошибка среднего. Параллельно с наблюдениями исследуемых объектов проводились наблюдения калибровочных источников DR 21, 3C 274, 3C 286, NGC 7027. Антенные температуры от источников пересчитывались в плотности потоков с использованием зависимости:

$$S = \frac{2kT_a}{A_{\text{эфф}}}, \quad (1)$$

где  $S$  – поток радиоисточника,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_a$  – антенная температура от источника,  $A_{\text{эфф}}$  – эффективная площадь радиотелескопа.

Вариации эффективной площади антенны  $A_{\text{эфф}}$  в зависимости от угла места  $h$  и азимута  $A_z$  определялись по данным наблюдений калибраторов. 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.

На частотах 8 и 14.5 ГГц длительный мониторинг выполнялся с помощью 26-м радиотелескопе РТ-26 обсерватории Мичиганского университета в период до 2012 г., базы данных которого были ранее опубликованы и использованы в работах [8–10]. С 2012 г. наблюдения на 8 ГГц проводились с помощью радиотелескопа РТ-22 в Симеизе. Данные на частоте 15 ГГц получены на 40-м радиотелескопе Owens Valley Radio Observatory [11] в период 2012–2020 гг.

## Результаты

Данные длительного мониторинга блазара ОJ 287 в радиодиапазоне приведены на рис. 1. По ним проведен гармонический анализ с помощью метода Шустера [10]. В табл. 1 в первой строке приведены результаты, усредненные по радиодиапазонам 8 ГГц, 14.5 + 15 ГГц, 22.2 ГГц. По этим данным выделяется период в 13.6 года. Его можно поставить в соответствие с прецессионными движениями центральной СМЧД и связанных с нею областей аккреционного диска. Прецессионный полупериод в 6.7 лет также выявляется гармоническим анализом. Более короткие периоды выделяются также на всех радиочастотах и равны 2.1 и 1.05 года соответственно. Их можно соотнести периоду обращения компаньона по орбите и его полупериоду. Последний связан с двойным пересечением АД компаньоном за один орбитальный период.

**Таблица 1.** Результаты гармонического анализа длительных рядов многочастотного мониторинга блазара ОJ 287

**Table 1.** The results of harmonic analysis of long-term multifrequency monitoring of the blazar OJ 287

Т (периоды в системе отсчета наблюдателя)	13.6±1.3	6.7±0.7	2.1±0.2	1.06±0.1
$T_{(z=0.86),\gamma^2}$ (периоды в системе источника)	260±22	128.0±12.0	40.2±4.0	20.3.0±2.0

*Примечание:* В первой строке приведены данные гармонического анализа длительных рядов многочастотного мониторинга блазара ОJ 287 усредненные за весь период наблюдений по всем частотам радиодиапазона. Во второй – результаты гармонического анализа данных с учетом  $z$  и  $\gamma$ .

Так как мы принимаем излучение от объекта из узкого конуса с углом между направлениями выброса («джета») и лучом зрения на наблюдателя  $\vartheta$ , считая что  $\gamma^2 \approx 1/\vartheta$  [12], то пересчет периодов в систему координат источника должен осуществляться по формуле [13]:

$$T_{\text{ист}} = \frac{T_{\text{набл}} \cdot \gamma^2}{1 + z}. \quad (2)$$

Во второй строке табл. 1 даны периоды в системе координат, связанной с источником ( $z = 0.306$ ) при значении гамма-фактора  $\gamma = 5$ . Вообще эта величина является параметром, не получаемым непосредственно из мониторинговых наблюдений. Существуют оценки, выполненные другими авторами. Так, в работе [14] приводится нижнее значение  $\gamma = 4$ . Принятая нами величина не противоречит этим оценкам.

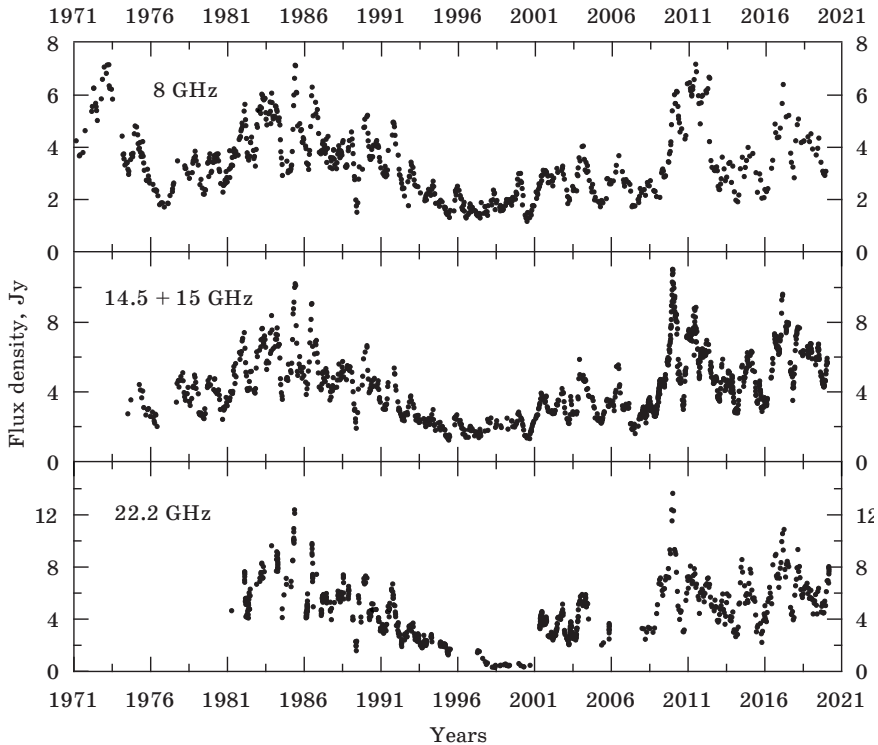


Рис. 1. Данные многочастотного мониторинга OJ 287

Fig. 1. The data of the multi-frequency monitoring of OJ 287

В предложенной методике нахождения параметров ТДС OJ 287 используется минимум предположений и допущений. Параметры OJ 287 получены в результате применения формул небесной механики, основанных на законах Кеплера и наблюдательных данных [15]:

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

$$M = 6\pi^2 \cdot r^2 \frac{0.75 \cdot T_{\text{пр}}}{3G \cdot T_{\text{orb}}^2 \cdot T_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

где  $m$  – масса компаньона,  $M$  – масса центральной черной дыры,  $r$  – радиус орбиты компаньона,  $G$  – гравитационная постоянная.

В ТДС недопустимо произвольно менять соотношение масс компаньонов при найденных из наблюдений значениях орбитальных и прецессионных периодов, так как функция масс двойных СМЧД зависит от их отношения [6]:

$$\frac{M + m}{m} = \frac{0.75 \cdot T_{\text{пр}}}{T_{\text{орб}}}. \quad (5)$$

Таким образом, с использованием предложенной методики была построена модель источника OJ 287 в системе отсчета источника. В табл. 2 даны три варианта данных для размеров орбиты и масс компаньонов, рассчитанных в рамках модели для периодов, представленных во 2 строке табл. 1. Массы компаньонов с учетом  $z \approx 0.306$  и  $\gamma \approx 5$  для блазара OJ 287 рассчитаны по формулам (3, 4) для трех значений размеров радиусов орбиты  $r$  в системе источника.

Полученные массы компаньонов в первой строке табл. 2 выглядят явно завышенными. При такой массе в 31 миллиардов масс Солнца существенно превышает Эддингтоновский предел для светимости объекта. Сообщалось о массе в 17 миллиардов центральной СМЧД в блазаре OJ 287 [16, 17]. Считается, что это самая массивная двойная СМЧД из всех ярчайших АЯГ. Значения масс компаньонов, полученные во второй строке табл. 3, выглядят более реалистично. Масса центральной СМЧД в 13 миллиардов масс Солнца не противоречит указанной выше оценке. Масса компаньона всего втрое ниже и это является прямым следствием полученного отношения  $T_{\text{прец}}/T_{\text{орб}}$  (формула 5).

**Таблица 2.** Значения масс компаньонов блазара OJ 287 для трех размеров орбиты компаньона

**Table 2.** The values of the companions masses of OJ 287 for the three sizes of the companion orbi

Радиус орбиты компаньона	Масса компаньона	Масса центральной СМЧД	Время жизни, годы
$6.0 \cdot 10^{17}$ см	$0.9 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	$3.0 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	$7 \cdot 10^4$
$4.5 \cdot 10^{17}$ см	$4.2 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$1.3 \cdot 10^{10} M_{\odot}$	$2.8 \cdot 10^5$
$3.0 \cdot 10^{17}$ см	$1.2 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$3.9 \cdot 10^9 M_{\odot}$	$2.1 \cdot 10^6$

## Дискуссия

Значения масс и размеров орбиты для блазара OJ 287, указанные в строке 2 табл. 2, свидетельствуют о том, что эта ТДС является очень массивной двойной системой среди известных



СМЧД. Соотношение масс компонентов  $\mu_{\text{OJ 287}} \approx M/m \approx 3.1$ . Для массивных звезд в Галактике ( $M > 10 M_{\odot}$ ) отношение масс компаньонов стремится к единице [18]. Полученное  $\mu_{\text{OJ 287}}$  определяется отношением прецессионного и орбитального периодов (формула 5). Поэтому можно предположить, что сверхмассивные компаньоны вращаются вокруг общего центра тяжести по практически круговым орбитам с радиусами  $r_{\text{comp}} \approx 4.5 \cdot 10^{17}$  см и  $r_{\text{centr}} \approx (r_{\text{comp}}) \cdot (m/M)^{1/2} \approx 2.5 \cdot 10^{17}$  см. Расстояние между компаньонами во время их движения вокруг общего центра тяжести равно  $a \approx r_{\text{comp}} + r_{\text{centr}} = 7.0 \cdot 10^{17}$  см. При этом периоды вращения вокруг оси (из-за сильного гравитационного взаимодействия) и вокруг общего центра тяжести у более массивной СМЧД равны также орбитальному периоду компаньона.

В такой ситуации АД может быть общим для обоих компаньонов, и дальнейшая оценка размеров АД подтверждает это предположение. Оценку радиуса АД ОJ 287 можно сделать с использованием формулы прецессии центрального тела в двойной системе из СМЧД [19]:

$$T_{pr} \approx 10^6 \cdot \left( \frac{M+m}{10^9 M_{\odot}} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{a}{10^{19}} \right)^3 \cdot \left( \frac{a_d}{10^{18}} \right)^{-3/2} \cdot \left( \frac{(1+q)^{1/2}}{q \cdot \text{Cos} \iota} \right) \text{ лет}, \quad (6)$$

где  $q = 1/\mu$ ,  $a = r_{\text{комп}} + r_{\text{центр}}$  – расстояние между компаньонами,  $a_d$  – радиус АД,  $\iota$  – угол между плоскостями орбиты и АД. Формулу 6 преобразуется к виду, удобному для вычисления радиуса АД при известных значениях  $M$ ,  $m$ ,  $T_{пр}$ ,  $q$ ,  $a$  и  $\iota$ :

$$a_d \approx 10^{22} \cdot \left( \frac{M+m}{10^9 M_{\odot}} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{a}{10^{19}} \right)^2 \cdot \left( \frac{(1+q)^{1/3}}{T_{пр} \cdot q \cdot \text{Cos} \iota} \right)^{2/3} \text{ см}. \quad (7)$$

В результате получим радиус  $a_{d \text{ OJ 287}} \approx 8 \cdot 10^{18}$  см  $\approx 2.6$  пк. Это значение является оценкой снизу размеров АД, так как  $\text{Cos} \iota^{2/3} \leq 1$ . В любом случае размеры АД на порядок больше величины орбиты компаньона. Таким образом, мы оказались правы считая, что АД является общим для двух СМЧД в ОJ 287.

Если принять полутолщину АД равной стандартному  $\alpha$ -диску [20], то получим полутолщину диска  $d_{\text{OJ 287}} \approx 0.07 \cdot a_d \approx 5.6 \cdot 10^{17}$  см, что несколько превышает даже размеры орбиты компаньона ( $4.5 \cdot 10^{17}$  см), но меньше расстояния между компаньонами ( $a \approx 7.0 \cdot 10^{17}$  см). Следствием такой толщины диска является продолжительность активной фазы вспышечных явлений в ОJ 287. По радиоданным длительности вспышек более полугода (рис. 1), что подтверждает полученные данные о толщине диска. Таким образом, все явления, связанные со вспышками в ОJ 287, про-



исходят в процессе сверхзвукового движения сверхмассивных компаньонов внутри общего для обеих АД при любых к нему наклонах орбит. Это существенный результат, который получен из наблюдательных данных.

На основе полученных данных о радиусе орбиты (средняя строка табл. 2) и орбитальном периоде (строка 2 табл. 1) можно определить скорости движения компаньонов по орбите:  $v_{OJ287}^{комп} \approx 2\pi r/T_{орб} \approx 2.0 \cdot 10^4$  км/с. Полученное значение совпадает с максимально зарегистрированной скоростью движения материи в молодых остатках сверхновых I типа. При этом скорости движения центральной СМЧД всего лишь в 1.8 раза меньше скорости движения компаньона  $v_{OJ287}^{центр} \approx 1.1 \cdot 10^4$  км/с.

При таких скоростях компаньоны испытывают сильное динамическое трение о среду, теряя при этом орбитальные моменты и сближаясь друг с другом. Это существенно уменьшает расчетное время жизни системы до слияния. Потери энергии за счет динамического трения были рассмотрены нами для АЯГ ЗС 454.3, где было показано, что их мощность может составить  $dE/dt_{ЗС454.3} \approx 6 \cdot 10^{47}$  эрг/с [7]. При этом была получена оценка плотности среды в пределах орбиты компаньона  $n \approx 3 \cdot 10^9$  см<sup>-3</sup>. В первом приближении такие значения можно принять и для ОJ 287.

Имея полученные данные, можно перейти к расчету скорости потери энергии системы ОJ 287 за счет излучения гравитационных волн [21]:

$$\frac{dE}{dt_{OJ287}} = \frac{32 \cdot G^4 \cdot M^2 \cdot m^2 (M+m) \cdot \left(1 + \frac{73e^2}{24} + \frac{37e^4}{96}\right)}{5c^5 \cdot r^5 (1-e^2)^{7/2}} \approx 6.2 \cdot 10^{47} \text{ эрг/с.} \quad (8)$$

Полученное значение совпадает с приведенными ранее оценками мощности динамических потерь для близкого по параметрам АЯГ ЗС 454.3. Этот пример еще раз доказывает важность учета динамического трения в ТДС системах из СМЧД, которое приводит к дополнительному уменьшению времени жизни системы до слияния. Расчетное значение времени жизни системы до слияния за счет только излучения ГВ [22]:

$$t_{merge} = 5.8 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{r}{0.01 pc}\right)^4 \cdot \left(\frac{10^8 M_\odot}{M}\right)^3 \cdot \frac{M^2 \cdot (1-e^2)^{7/2}}{m(M+m)}. \quad (9)$$

В случае принятых значений (табл. 2, строка 2) время жизни двойной системы ОJ 287 до слияния, рассчитанное по формуле (9) составляет всего  $t_{merge} \text{ ОJ 287} \approx 2.8 \cdot 10^5$  лет. Для примера, время жизни ОJ 287 с параметрами, указанными в [5]

$t_{\text{merge OJ 287}} \approx 5.5 \cdot 10^3$  лет. Если принять значение эксцентриситета орбиты для OJ 287 ( $e = 0.7$ ), то время жизни системы уменьшается на порядок величины.

При взаимодействии компаньона с АД на сверхзвуковых скоростях мощнейшие ударные волны распространяются в плотной газовой-пылевой среде АД. Доля энергии ударных волн, достигающая «джета» и перерабатываемая во вспышку, может составить 1–2 %, учитывая соотношение размеров орбиты и СМЧД. Направленное движение ударной волны преобразуется в хаотическое движение частиц, определяемое температурой плазмы  $mv^2/2 = 3kT/2$ . Для электронно-протонной плазмы  $T \approx 2 \cdot 10^{10}$  К, что в четверо превышает уровень рождения электронно-позитронных ( $e-p$ ) пар ( $T \approx 5 \cdot 10^9$  К). В истоках «джета» магнитные и электрические поля разгоняют частицы до релятивистских скоростей, формируя «джеты», состоящие из электронно-протонной плазмы и  $e-p$  пар. Объемная плотность  $e-p$  пар определяется энергией ударных волн и плотностью газовой составляющей. При этом обеспечивается наблюдаемый высокий уровень активности блазара в широком диапазоне длин волн.

Из-за высоких скоростей движения компаньонов кинетическую энергию нужно рассчитывать по релятивистской формуле:

$$E_{\text{кин}} = m \cdot c^2 \left( \frac{1}{1 - v^2/c^2} - 1 \right). \quad (10)$$

Используя значения масс компаньонов OJ 287 (средняя строка табл. 2) и скорости движения  $v_{\text{OJ 287}}^M \approx 1.1 \cdot 10^4$  км/с,  $v_{\text{OJ 287}}^m \approx 2.0 \cdot 10^4$  км/с, получим запас кинетической энергии компаньонов  $E_{\text{кин}} = E_{\text{кин}}^M + E_{\text{кин}}^m \approx (4.3 \cdot 10^{61} + 4.1 \cdot 10^{61}) \approx 8.4 \cdot 10^{61}$  эрг. Эта энергия расходуется на гравитационное излучение и на преодоление динамического трения о плотную среду АД и аккрецирующую материю. Значительная часть энергии динамического трения преобразуется в широкополосное излучение от радио- до гамма диапазонов длин волн.

Для определения изменения орбиты компаньона за счет излучения ГВ и оценки возможности экспериментального определения этих изменений, определим скорость изменения орбиты [21]:

$$\frac{da}{dt} \approx 64G^3 M \cdot m \cdot (M_+ m) \cdot \frac{1 + \frac{73e^2}{24} + \frac{37e^4}{96}}{5c^5 \cdot r^3} \approx 1.2 \cdot 10^4 \text{ см/с}, \quad (11)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $M$   $m$  – массы компаньонов (строка 2 табл. 2),  $r = 4.5 \cdot 10^{17}$  см,  $e = 0$ . За один орби-

тальный период (строка 2 табл. 1) изменение орбиты равно  $\Delta r \approx 2.0 \cdot 10^{13}$  см. Изменение орбитального периода составит  $\Delta T_{\text{пер}} \approx 0.6$  суток. За 50 лет наблюдений объекта ( $\Delta t \approx 23$  периода) изменение орбитального периода составит  $\Delta T_{\text{набл}} \approx 13$  суток  $\approx 0.03$  года, что в 7 раз меньше ошибки определения периода (табл. 1) и точности определения времени вспышечного явления, длительность которого может составить много месяцев. Следовательно, определение изменений орбитального периода OJ 287 пока находятся вне пределов наших экспериментальных возможностей.

Смещение перицентра орбиты компаньона можно найти с использованием стандартного выражения:

$$\Delta\phi = \frac{6\pi \cdot G \cdot M}{a \cdot (1 - e^2)c^2}, \quad (12)$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $M$  – масса центрального тела,  $r$  – радиус орбиты компаньона,  $c$  – скорость света. Смещение перицентра за орбитальный период составит величину  $\approx 5^\circ$ . На расстоянии  $r = 4.5 \cdot 10^{17}$  см это составит примерно  $5 \cdot 10^{16}$  см, что близко к размерам компаньонов OJ 287, которые с каждым витком будут проходить по новым областям АД, что может способствовать сохранению устойчивости АД.

Интересно рассмотреть, как себя ведет аккреция вещества на черную дыру при таких высоких скоростях движения СМЧД относительно аккрецирующей на нее материи? Для этого проанализируем формулу аккреции, где показано, как скорость влияет на темп аккреции [23]:

$$\frac{dE}{dt_{\text{accr}}} \approx 2 \cdot 10^{33} \left( \frac{10^{-2} M}{M_o} \right)^{3/2} \cdot (10^{-1} v)^{-9/4} \cdot n^{1/2} \text{ эрг/с}, \quad (13)$$

где  $n$  – плотность аккрецирующей материи,  $v$  – скорость движения черной дыры относительно «аккрецирующего» на нее вещества. Формула показывает, что при прочих равных условиях энерговыделение при аккреции катастрофически падает при увеличении скорости движения черной дыры относительно аккрецирующей материи. В нашем случае при значениях  $M \approx 1.3 \cdot 10^{10} M_o$ ,  $n \approx 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$  и  $v \approx 2.0 \cdot 10^4 \text{ км/с}$ , светимость за счет аккреции на черную дыру равна  $L \approx 4.5 \cdot 10^{42} \text{ эрг/с}$ , что на 5 порядков величины меньше энерговыделения в системе и аккрецию вообще можно не учитывать. Это лишний раз указывает в пользу того, что в ТДС из СМЧД первичное энерговыделение происходит не за счет аккреции вещества на черную дыру. В нашей концепции это энерговыделение возникает за счет потери орбитальных моментов компаньонов, когда они

таранят АД. Именно только ТДС из СМЧД могут быть яркими АЯГ.

Если бы слияние в ОJ 287 произошло в настоящее время, то это был бы неизъяснимый подарок для гравитационных детекторов LIGO, VIRGO, LISA и др. 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 [24], работающие как раз в этом диапазоне частот.

## Выводы

На основе методики расчета параметров орбит двойных СМЧД, использующей только данные многочастотного мониторинга в радиодиапазоне определены параметры ТДС из СМЧД ОJ 287, откуда следует, что эта одна из массивнейших систем среди ярчайших АЯГ.

Получены оценки размеров и толщины АД, показывающие, что компаньоны находятся внутри АД большую часть времени движения по орбитам. Такая ситуация требует учета влияния динамического трения на параметры орбит компаньонов для учета время жизни до слияния системы.

Выполнены оценки уровня гравитационных волн, идущих от ОJ 287. Показано, что эта система из СМЧД является одним из самых мощных излучателей ГВ.

Расчетное время жизни ОJ 287 до слияния компонент показывает, что это короткоживущий объект во Вселенной.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-29-11027 (Л.Н.В.). В исследовании использованы данные программы мониторинга 40-метрового радиотелескопа OVRO, которая частично поддерживается грантами НАСА NNX08AW31G, NNX11A043G, NNX14AQ89G и NSF, а также грантами AST-0808050 и AST-1109911.

## Acknowledgments

The research is carried out with the financial support of the RFBR as a part of a scientific project 19-29-11027 (L.N.V.) in the part of the data analysis and the data reduction. The study uses data from the OVRO 40-meter radio telescope monitoring program, which is partially supported by NASA grants NNX08AW31G, NNX11A043G, NNX14AQ89G and NSF, as well as grants AST-0808050 and AST-1109911.

## Список литературы / References

1. Sillanpaa A., Haarala S., Valtonen M. J., Sundelius B., Byrd G. G. OJ 287 – Binary pair of supermassive black holes. *The Astrophysical Journal* 1988;325(2):628–634. DOI: 10.1086/166033.
2. Burke-Spolaor S., Madison D. R., Taylor S. R., Charisi M., Dolch T., Hazboun J. S., Holgado A. M., Kelley L. Z., Lazio T. J. W., Simon J. J., McMann N., Mingarelli C. M. F., Rasskazov A., Siemens X., Smith T. L. The astrophysics of nanohertz gravitational waves. *Astronomy and Astrophysics Review*. 2019;27(1):5. DOI: 10.1007/s00159-019-0115-7.
3. Dev L., Gopakumar A., Valtonen M., et al. The Unique Blazar OJ 287 and Its Massive Binary Black Hole Central Engine. *Universe*. 2019;5(5):108. DOI: 10.3390/universe5050108.
4. Sun Yu-Taoab, Liu Jie-Yingab, Liu Jin-zhongab, Ai Yan-Liab, Zhou Mingab, Qiao Er-lin. A Research on the Gravitational Wave Radiation of OJ 287. *Chinese Astronomy & Astrophysics*. 2011;35(2):123–132. DOI: 10.1016/j.chinastron.2011.04.008.
5. Valtonen M. J., Lehto H. J. Outbursts in OJ287: A new test for the General Theory of Relativity. *The Astrophysical Journal*. 1997;481(1):L5–L7. DOI: 10.1086/310642.
6. Vol'vach A. E., Vol'vach L. N., Larionov M. G., Aller H. D., Aller M. F. The variability of a 3c 454.3 blazar over a 40-year period. *Astronomy Reports*. 2007;51(6):450–459. DOI: 10.1134/S1063772907060030.
7. Vol'vach A. E., Vol'vach L. N., Larionov M. G., Aller M. F., Aller H. D., Villata M., Raiteri K. M. Correlations between the development of a flare in the blazar 3c 454.3 in the radio and optical. *Astronomy Reports*. 2008;52(11):867–874. DOI: 10.1134/S1063772908110012.
8. Vol'vach A. E., Vol'vach L. N., Kut'kin A. M., Larionov M. G., Aller M. F., Aller H. D. Sub-parsec structure of binary supermassive black holes in active galactic nuclei. *Astronomy Reports*. 2010;54(1):28–37. DOI: 10.1134/S106377291001004X.
9. Vol'vach A. E., Vol'vach L. N., Pushkarev A. B., Kut'kin A. M., Larionov M. G., Villata M., et al. Multi-frequency studies of the non-stationary radiation of the blazar 3c 454.3. *Astronomy Reports*. 2011;55(7):608–615. DOI: 10.1134/S1063772911070092.
10. Vol'vach A. E., Vol'vach L. N., Kutkin A. M., Larionov M. G., Lahteenmaki A., Tornikoski M., et al. A prolonged flare in the blazar 3c 454.3. *Astronomy Reports*. 2013;57(1):46–51. DOI: 10.1134/S1063772912120098.
11. Richards J. L., Max-Moerbeck W., Pavlidou V., et al. Blazars in the Fermi Era: The OVRO 40 m telescope monitoring program. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2011;194(2):29. DOI: 10.1088/0067-0049/194/2/29.
12. Vol'vach A. E., Larionov M. G., Kardashev N. S., Лдhteemмдкi A., Tornikoski M., Hovatta T., et al. A multi-frequency study of brightness variations of the blazar 0716+714. *Astronomy Reports*. 2009;53(9):777–784. DOI: 10.1134/S1063772909090017.

13. Rieger F.M. Supermassive binary black holes among cosmic gamma-ray sources. *Astrophysics and Space Science*. 2007;309(1-4):271–275. DOI: 10.1007/s10509-007-9467-y.

14. Teraesranta H., Valtaoja E. Brightness temperatures and viewing angles for extragalactic radio sources: a test of unification schemes for active galactic nuclei. *Astronomy and Astrophysics*. 1994;287:51.

15. 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;3(1):5–23.

Volvach A. E., Larionov M. G., Volvach L. N., Aller H. D., Aller M. F. Double supermassive black holes as possible sources of powerful gravitational wave radiation *Infocommunications and Radio Technologies*. 2020;3(1):5–23. (In Russ.)

16. Lehto H. J., Valtonen M. J. OJ 287 outburst structure and a binary black hole model. *The Astrophysical Journal*. 1996;460(1)207–213. DOI: 10.1086/176962.

17. Valtonen M. J. New Orbit Solutions for the Precessing Binary Black Hole Model of OJ 287. *The Astrophysical Journal*. 2007;659(2):1074–1081. DOI: 10.1086/512801.

18. Chini R., Hoffmeister V. H., Naseri A., Stahl O., Zinnecker H. A Spectroscopic survey on the multiplicity of high-mass stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2012;424(3):1925–1929. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21317.x.

19. Dunn R. J. H., Fabian A. C., Sanders J. S. Precession of the supermassive black hole in NGC 1275 (3C 84)? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2006;366(3):758–766. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2005.09928.x.

20. Suleimanov V. F., Lipunova G. V., Shakura N. I. The thickness of accretion  $\alpha$ -disks: Theory and observations. *Astronomy Reports*. 2007;51(7):549–562. DOI: 10.1134/S1063772907070049.

21. Peters P. C. Gravitational Radiation and the Motion of Two Point Masses. *Physical Review B*. 1964;136(4B):1224. DOI: 10.1103/PhysRev.136.B1224.

22. Rodriguez C., Taylor G. B., Zavala R. T., Peck A. B., Pollack L. K., Romani R. W. A Compact Supermassive Binary Black Hole System. *The Astrophysical Journal*. 2006;646(1):49–60. DOI: 10.1086/504825.

23. Shvartsman V. F. Magnetic control of accretion onto a black hole flow deceleration at  $R_{sh}$ . *Soviet Astronomy*. 1971;15:342.

24. Manchester R. N. The Parkes Pulsar Timing Array. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*. 2006;6(S2):139–147. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1009-9271/6/S2/27/pdf>

### Информация об авторах

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

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

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

### Information about the authors

**Larisa N. Volvach**, PhD. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS” (Nauchni, Crimea, Russia).

**Alexandr E. Volvach**, Dr. Sci., FSBSI “Crimean Astrophysical Observatory of RAS” (Nauchni, Crimea, Russia).

**Michail G. Larionov**, Dr. Sci., Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, RAS (Moscow, Russia).

Поступила / Received: 15.12.2020

Принята в печать / Accepted: 30.12.2020