

УДК 524.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВОЙНЫХ СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР И ИДУЩИЙ ОТ НИХ УРОВЕНЬ ГРАВИТАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. Е. Вольвач¹, Л. Н. Вольвач¹, М. Г. Ларионов²,В. Б. Орленсон¹, С. В. Малашевич¹

Представлены новые данные по объекту АО 0235 + 164, полученные по программе долгосрочного многочастотного мониторинга активных ядер галактик (АЯГ). Предложена модель нахождения параметров тесных двойных систем из сверхмассивных черных дыр (ДСЧД) на основе только данных наблюдений в радиодиапазоне. Методика определения физических характеристик ДСЧД включает проведение гармонического и вейвлет анализов, определение масс спутников и их орбитальных характеристик. Показано, что АО 0235 + 164 может быть очень массивной и тесной двойной системой, имеющей в своем составе компаньонов с близкими массами. Наличие орбитального периода и кратного полупериода указывает на отсутствие заметного эксцентриситета в системе. Оценки показывают, что наравне с такими АЯГ, как 3C 454.3 и OJ 287, АО 0235 + 164 может быть мощным излучателем гравитационных волн (ГВ), доступным для обнаружения гравитационно-волновыми детекторами International Pulsar Timing Array (IPTA).

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

Введение. Существует мнение, что АЯГ представляют собой компактные образования в центральных областях эллиптических галактик, состоящие из ДСЧД, вращаю-

¹ Крымская астрофизическая обсерватория РАН, 298688 Россия, Научный, Республика Крым; e-mail: volvach@bk.ru.

² ФИАН АКЦ, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

щихся вокруг общего центра тяжести по эллиптическим орбитам [1]. Именно тесная двойственность системы может являться ключевым фактором гигантского выделения энергии в таких объектах, когда сверхмассивные компаньоны находятся на стадии эволюции, близкой к слиянию [2]. Спектр излучения двойных АЯГ или ДСЧД чрезвычайно широк и охватывает широкий диапазон частот от радио- до гамма-диапазона. Они также могут являться мощными источниками излучения гравитационных волн (ГВ). Единственным источником этого класса с известными физическими характеристиками двойной системы СМЧД и предполагаемым уровнем излучения ГВ считается блазар ОJ 287 [3].

Сложность заключается в том, что в центральных областях АЯГ порой наблюдается значительное поглощение в оптическом диапазоне благодаря чему и так слабые из-за удаленности источники становятся еще тусклее. Установление двойственности СМЧД требует использования новых подходов и методов исследования, кроме использования только оптического диапазона. Необходимо иметь набор данных наблюдений каждого кандидата в ДСЧД в широком диапазоне длин волн – от радио- до гамма-диапазона. Отсюда возникает задача разработки такого метода. Кроме того, ряды данных должны быть продолжительными (многие десятки лет) для вычислений составляющих орбитального, прецессионного и других периодов, и используемый при проведении исследований метод должен быть оптимальным. В предлагаемом методе должны учитываться особенности сбора экспериментальных данных, их качество, скважность, то есть требуется предварительно выполнить процедуру по приведению массивов данных к равноточному виду с применением процедур сглаживания. Таким образом, перед тем как проводить обработку длинных рядов экспериментальных данных, необходимо иметь набор методов, с помощью которых можно было бы решить поставленную задачу по нахождению параметров двойных СМЧД, которые способны эффективно излучать ГВ.

В работе представлены данные многолетнего многочастотного мониторинга блазара АО 0235+164 в радио- и оптическом диапазонах длин волн, на основе которых получены физические характеристики этой массивной системы.

Наблюдение и обработка данных. Наблюдения на частоте 22.2 ГГц проводились с помощью 22-метрового радиотелескопа РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории и радиометрической системы с диаграммной модуляцией. Таким образом удавалось избежать наличия аномального спектра флуктуаций коэффициентов усиления усилителей, существенно искажающего результаты. Дополнительным преимуществом используемого метода приема сигнала было снижение уровня колебаний температуры атмо-

сферных неоднородностей, значительных на сантиметровых и миллиметровых волнах. Приращение антенной температуры от источника ($\Delta T_{\text{ист}}$) регистрировалось как разность сигналов с выхода радиометра в двух положениях антенны, когда радиотелескоп устанавливался на источник попеременно то одним, то другим приемным рупором (вкл-вкл). Наблюдения каждого источника состояли из 5–20 измерений, вычисления среднего значения и среднеквадратической ошибки среднего. Параллельно с исследуемыми объектами проводились наблюдения калибровочных источников.

Данные на частоте 8 ГГц получены на РТ-22 в Симеизе, а также на 26-метровом радиотелескопе РТ-26 обсерватории Мичиганского университета [4]. Мониторинг на частоте 15 ГГц осуществлялся с помощью 40-метрового радиотелескопа Owens Valley Radio Observatory [5]. Были использованы оптические данные 2008–2018 гг., полученные в проекте спектр-поляризметрического мониторинга обсерватории Стюарда [6].

Результаты. АО 0235+164 представляет собой массивное АЯГ, имеющее красное смещение $z = 0.94$ и являющееся блазаром [7]. Данные многолетнего мониторинга АО 0235+164 в радио- и оптическом диапазонах длин волн представлены на рис. 1. В табл. 1 приведены результаты гармонического анализа, выполненные методом Шустера [8]. Уверенно выделяется период 6 лет. Этот период может быть связан с наличием прецессионных движений центральной СЧД и связанным с ней аккреционным диском (АД). Более короткие периоды 2.0 и 1.0 года выделены на всех частотах радиодиапазона. Их можно связать с периодом движения спутника по орбите. Период 1.0 года объясняется двукратным пересечением спутником АД за один орбитальный период 2 года. Другие промежуточные периоды, возможно, связаны с нутационным или комбинационным периодами в системе, имеющей дополнительно к центральному телу еще АД и массу аккрецирующего вещества.

Т а б л и ц а 1

Гармонический анализ вариаций потоков АО 0235+164 на различных частотах

Частота	I	Наиболее характерные периоды вариаций		
4.8 ГГц	I	6.0 ± 0.5 лет	1.8 ± 0.3 лет	0.9 ± 0.2 лет
8.0 ГГц	I	5.6 ± 0.3 лет	2.0 ± 0.2 лет	1.0 ± 0.1 лет
14.5 ГГц	I	5.7 ± 0.3 лет	1.9 ± 0.2 лет	1.0 ± 0.1 лет
22.2 ГГц	I	5.4 ± 0.4 лет	1.9 ± 0.2 лет	1.2 ± 0.2 лет
36.8 ГГц	I	6.0 ± 0.4 лет	2.0 ± 0.5 лет	1.2 ± 0.2 лет
Оптика (фильтр R)	I	6.2 ± 0.5 лет	—	1.0 ± 0.1 лет

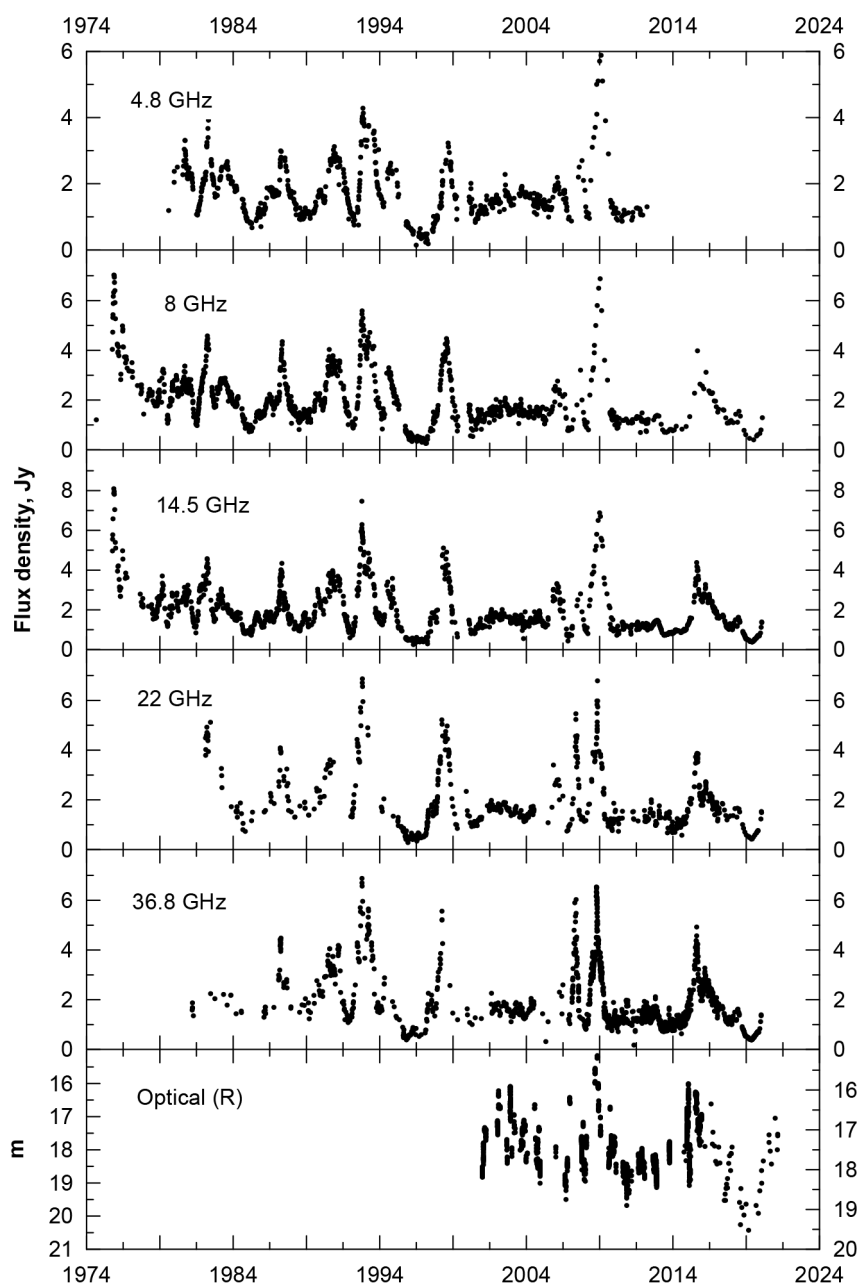


Рис. 1: Многолетний мониторинг АО 0235+164 в радио- и оптическом (R) диапазонах длин волн.

Период 6 лет может быть прецессионным, как и в случае других ярких АЯГ [9]. Разброс в значениях этого периода не выходит за пределы статистических погрешностей. Короткий период (около двух лет) можно связать с орбитальным периодом движения компаньона вокруг общего центра тяжести в системе, состоящей из двух СЧД.

Амплитуды периодов 6.0 и 1 и 2 года имеют максимальные значения в сравнении с остальными периодами. Существует набор промежуточных комбинационных периодов от 3 до 5.5 лет, имеющих меньшие амплитуды, которые, как было сказано, могут объясняться вариациями в движениях системы, состоящей более чем из двух тел, к которым добавляются массивный аккреционный диск АД и аккрецирующая среда [10].

Набор данных, полученных в оптическом диапазоне (полоса R , нижняя панель рис. 1), более ограничен по сравнению с радиодиапазоном. Тем не менее, их анализ дает те же орбитальный и прецессионный периоды, что и полученные в радиодиапазоне. Это подтверждает наши предположения, что использование данных только радиодиапазона позволяет получить основные результаты по определению характеристик исследуемых ДСЧД.

Был также выполнен вейвлет анализ данных по выявлению возможных изменений периодов за время мониторинга на разных частотах. В пределах ошибок смещений периодов по времени не было обнаружено.

Выражения для параметров ДСЧД, полученные на основе мониторинга в радиодиапазоне, позволяют оценить массы компаньонов и размеры орбит. Соотношения для расчета числовых данных получены на основе законов Кеплера и приводят к следующим результатам:

$$m = \frac{16\pi^2 \cdot R^3}{3G \cdot T_{\text{орб}} \cdot T_{\text{пр}}}, \quad M = \frac{16\pi^2 \cdot R^3 \cdot (0.75T_{\text{пр}} - T_{\text{орб}})}{3G \cdot T_{\text{орб}}^2 \cdot T_{\text{пр}}}. \quad (1)$$

Здесь m и M – массы компаньонов; R – радиус орбиты компаньона; $T_{\text{пр}}$, $T_{\text{орб}}$ и $T_{\text{вр}}$ – соответственно, периоды прецессии центрального тела, орбитальный период компаньона и период вращения центрального тела.

Из-за мощных приливных взаимодействий период $T_{\text{вр}} = T_{\text{орб}}$, и в (1) можно подставлять полученные из наблюдений в радиодиапазоне данные $T_{\text{пр}}$ и $T_{\text{орб}}$. Далее, чтобы найти величины периодов в системе координат, связанной с источником излучения, нужно учесть влияние релятивистского γ -фактора ≈ 5 [11–13]:

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

Это приводит к значениям периодов в системе координат, связанной с источником: $T_{\text{ист, пр}} \approx 150$ лет и $T_{\text{ист, орб}} \approx 50$ лет. При этом угол конуса прецессии центрального тела $\theta \approx 1/\gamma \approx 2.9^\circ$, что совпадает с данными работы [12]. АО 0235+164 является уникальной системой, с точки зрения близости масс компаньонов. Согласно выражению

для соотношения масс, полученному из (1): $(M + m)/m \approx 0.75(T_{\text{пр}}/T_{\text{орб}})$, $M \approx 1.25 \cdot m$. Интересно, что для массивных звезд M/m также стремится к единице [14].

Анализируя выражение (1), можно заметить, что наблюдается кубическая зависимость между массами компаньонов и радиусами их орбит. Это позволяет установить возможный диапазон для размеров орбит компаньонов с привлечением дополнительных физических условий. К таким условиям относится предел на массу ДСЧД, которая не может превышать десятков миллиардов масс Солнца, в противном случае может нарушиться стабильность АД. Ограничения на массы снизу связаны с высокими наблюдаемыми мощностями излучений объектов подобного рода в широком диапазоне длин волн и слишком малым временем жизни источника из-за потерь энергии на гравитационное излучение [13]. Такие ограничения дают возможность назвать диапазоны значений масс компаньонов и величин их орбит с возможными ошибками на основе формулы (1): $m \approx (5.0 \pm 3.0) \cdot 10^9 M_0$, $M \approx (6.3 \pm 3.0) \cdot 10^9 M_0$, $R_{\text{комп}} \approx (3 \pm 2) \cdot 10^{17}$ см.

Компаньоны вращаются по круговым орбитам вокруг общего центра тяжести. Время между пересечением компаньонами АД равно одному году, а период – двум годам. Следовательно, у двойной системы эксцентриситет близок к нулю. Размеры орбит близки друг другу и составляют: $R_{\text{комп}} \approx (3 \pm 2) \cdot 10^{17}$ см и $R_{\text{центр}} \approx (2.4 \pm 2) \cdot 10^{17}$ см. Скорости движения компаньонов по орбитам будут, соответственно, равны: $v_{\text{комп}} \approx 1.3 \cdot 10^4$ км/сек, $v_{\text{центр}} \approx 1.0 \cdot 10^4$ км/сек с учетом орбитального периода 50 лет в системе координат, связанной с источником. Полученные значения скорости движения компаньона по орбитам даже превышают скорость движения вещества при взрыве сверхновых I типа $v_{\text{типа}} \approx 10^4$ км/сек.

Время жизни ДСЧД АО 0235+164 до слияния [15]:

$$T_{\text{сл}} \approx \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot c^5 \cdot R^4 \cdot (1 - e^2)^{7/2}}{G^3 \cdot m \cdot M \cdot (m + M)}, \quad (3)$$

где $R = R_{\text{комп}}$, m и M – массы компаньонов, c – скорость света, e – эксцентриситет орбиты компаньона. Откуда $T_{\text{сл}} \approx 1.6 \cdot 10^5$ лет, что по космическим меркам совсем не много.

Эти данные получены исключительно из радионаблюдений, и изложенная методика их получения применима для всех АЯГ, где имеются длительные многочастотные ряды в разных диапазонах радиоволн.

Дискуссия. ДСЧД АО 0235+164 по полученным результатам является одной из самых массивных и динамичных систем. Ее запас кинетической энергии составляет:

$E_{\text{кин}} = E_{\text{кин } M} + E_{\text{кин } m} \approx 1.5 \cdot 10^{61}$ эрг. Эта энергия расходуется на гравитационное излучение и преодоление динамического трения в среде АД. Можно рассчитать скорость потерь энергии на излучение ГВ [16]:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{32 \cdot G^4 \cdot M^2 \cdot m^2 (M + m) \cdot \left(1 + \frac{73e^2}{24} + \frac{37e^4}{96}\right)}{5c^5 \cdot a^5 (1 - e^2)^{7/2}}. \quad (4)$$

Для найденных значений масс компаньонов АО 0235+164, величины $a = R_{\text{центр}} + R_{\text{комп}} \approx 5.4 \cdot 10^{17}$ см и эксцентриситета $e = 0$ имеем $dE/dt_{\text{ГВ}} \approx 4.4 \cdot 10^{46}$ эрг/сек. Полученное значение втрое меньше, чем у самого мощного излучателя ГВ – 3С454.3 [17] и сравнима с мощностью ГВ от ОJ 287 [3]. Учитывая же, что АО 0235+164 находится дальше чем ОJ 287, то он является третьим претендентом по уровню плотности потока ГВ у поверхности Земли для обнаружения ГВ.

Мы получили важный вывод о том, что СМЧД АО 0235+164, наряду со сверхмассивными черными дырами, такими как 3С 454.3 и ОJ287, является перспективным для обнаружения от него ГВ в диапазоне $10^{-9} - 10^{-8}$ Гц с помощью IPTA (International Pulsar Timing Array) – гравитационно-волнового детектора, работающего на этой сверхнизкой частоте и обладающего высокой чувствительностью, необходимой для регистрации низких значений мощности вблизи поверхности Земли [18].

Выводы. 1. Предложена модель расчета параметров ДСЧД на основе данных много-частотного мониторинга в радиодиапазоне. Она успешно продемонстрирована на АЯГ АО 0235+164.

2. Параметры модели включают определение масс компонентов ДСЧД, размеров их орбит, скорости движения по орбитам, запас кинетической энергии системы, потери энергии на гравитационное излучение, время жизни системы до слияния.

3. На основе полученных физических характеристик АО 0235+164 показано, что это АЯГ может быть очень массивной и тесной ДСЧД, имеющей в своем составе компаньонов с почти равными массами. Наличие орбитального периода и вдвое меньшего полупериода указывает на отсутствие эксцентриситета в системе.

4. Показано, что массивная система АО 0235+164, как 3С 454.3 и ОJ 287, может быть мощным излучателем гравитационных волн в диапазоне $10^{-8} - 10^{-9}$ Гц, которое может быть доступно для обнаружения детекторами International Pulsar Timing Array.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-10032, <https://rscf.ru/project/23-22-10032/>.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. Sillanpaa, L. O. Takalo, T. Pursimo, et al., *A&A* **305**, 17 (1996).
- [2] A. E. Volvach, L. N. Volvach, M. G. Larionov, et al., *Astron. Rep.* **51**, 450 (2007). DOI: 10.1134/S1063772907060030.
- [3] Sun Yu-Tao, Liu Jie-Ying, Liu Jin-zhong, et al., *Chinese Astron. and Astrophys.* **35**, 23 (2011). DOI: 10.1016/j.chinastron.2011.04.008.
- [4] M. F. Aller, H. D. Aller, P. A. Hughes, G. E. Latimer, *Variability of Blazars*, eds. E. Valtaoja, & M. Valtonen (Cambridge Univ. Press), 126 (1992).
- [5] J. L. Richards, W. Max-Moerbeck, V. Pavlidou, et al., *ApJ Supplement* **194**, id.29(22pp) (2011). DOI: 10.1088/0067-0049/194/2/29.
- [6] P. S. Smith, E. Montiel, S. Rightley, et al., *Coordinated Fermi/Optical Monitoring of Blazars and the Great 2009 September Gamma-ray Flare of 3C 454.3 Fermi Symposium*, eConf Proceedings C091122 (2009). arXiv:0912.3621. DOI: 10.48550/arXiv.0912.3621.
- [7] H. Spinrad, H. E. Smith, *ApJ* **201**, 275 (1975). DOI: 10.1086/153883.
- [8] A. E. Vol'vach, A. M. Kutkin, L. N. Vol'vach, et al., *Astron. Rep.* **57**(1), 34 (2013). DOI: 10.1134/S1063772912050083.
- [9] A. E. Volvach, L. N. Volvach, V. S. Bychkova, et al., *Astron. Rep.* **56**, 275 (2012). DOI: 10.1134/S1063772912030079.
- [10] R. Nesci, E. Massaro, C. Rossi, et al., *AJ* **130**, 1466 (2005). DOI: 10.1086/444538.
- [11] K. Fujisawa, H. Kobayashi, K. Wajima, et al., *PASJ* **51**, 537 (1999).
- [12] P. Padovani, L. Costamante, P. Giommi, et al., *MNRAS* **347**, 1282 (2004). DOI: 10.1111/j.1365-2966.2004.07313.x.
- [13] F. M. Rieger, *Astrophys. Space Sci.* **309**, 271 (2007). DOI: 10.1007/s10509-007-9467-y10.1007/s10509-007-9467-y.
- [14] R. Chini, V. H. Hoffmeister, A. Nasser, et al., *MNRAS* **424**, 1925 (2012). DOI: 10.1111/j.1365-2966.2012.21317.x.
- [15] J. J. Fernández, Sh. Kobayashi, *MNRAS* **487**, 1200 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz1353.
- [16] P. C. Peters, *Phys. Rev. B* **136**, B1224 (1964). DOI: 10.1103/PhysRev.136.B1224.
- [17] A. E. Volvach, L. N. Volvach, M. G. Larionov, *A&A* **648**, A27(8p) (2021). DOI: 10.1051/0004-6361/202039124.

- [18] R. N. Manchester, Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics **6**, 139 (2006). DOI: 10.48550/arXiv.astro-ph/0604288.

Поступила в редакцию 20 мая 2023 г.

После доработки 26 февраля 2024 г.

Принята к публикации 27 февраля 2024 г.