

Параметры двойных систем в блазарах 0235+164, 0528+134 и S40954+658¹

¹ Вольвач Л. Н., ¹ Вольвач А. Е., 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, 117810, Российская Федерация
volvach@bk.ru

Статья поступила 9 июля 2016 г.

Аннотация: Проанализированы длительные ряды многочастотного мониторинга активных ядер галактики (АЯГ) АО 0235+164, S0528+134 и S40954+658 от радио- до гамма-диапазона. По результатам гармонического анализа многочастотного мониторинга предложена интерпретация гармонических составляющих прецессионного и орбитального периодов в двойной системе из СМЧД (сверхмассивных черных дыр). Близость значений прецессионных и орбитальных периодов в ярких представителях АЯГ может служить подтверждением предположений о том, что во всех случаях мы имеем излучение от тесных двойных систем из СМЧД. Именно крайняя компактность орбит (менее 0.1 пк) может являться первопричиной возникновения мощного излучения в системе двойных СМЧД за счет динамических потерь из-за сверхзвукового движения компаньона в плотной среде, окружающей орбиту (10^9 — 10^{10}) см⁻³. Полученные данные указывают на то, что наблюдаемые яркие представители активных ядер галактик являются немногочисленной популяцией среди массивных эллиптических галактик ввиду узкой направленности излучения в таких объектах и короткого времени жизни таких систем.

Ключевые слова: блазар, активные ядра галактик, черная дыра.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Вольвач Л. Н., Вольвач А. Е., Ларионов М. Г. Параметры двойных систем в блазарах 0235+164, 0528+134 и S40954+658 // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2018. Т. 1, № 1. С. 7—16.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Вольвач, Л. Н. Параметры двойных систем в блазарах 0235+164, 0528+134 и S40954+658 / Л. Н. Вольвач, А. Е. Вольвач, М. Г. Ларионов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2018. — Т. 1, № 1. — С. 7—16.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 24-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2014 (Севастополь, РФ, 7—13 сентября 2014 г.).

Parameters of binary systems in 0235+164, 0528+134 and 0954+658 blazars

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

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

² Astro Space Center, P. N. Lebedev Physical Institute, RAS
Moscow, 117810, Russian Federation
volvach@bk.ru

Received on July 9, 2016

Abstract: Long series of multi-frequency monitoring data of the active galactic nucleus AO 0235+164, S0528+134 and S40954+658 from the radio to the gamma-ray are analyzed. Based on harmonic analysis of multi-frequency monitoring data we suggest that the observed harmonic components represent the precessional and orbital periods of a binary supermassive black holes (SMBH) system. The similarity of both the precessional and orbital periods in bright AGNs supports our hypothesis that, in all cases, we are observing emission from close binary systems consisting of SMBHs. The extremely compact size of the (less than 0.1 pc) may be a primary source of the powerful emission of the binary SMBH, which arises as a result of the dynamical losses due to the companion's supersonic motion in the dense medium surrounding the orbit (10^9-10^{10} cm⁻³). The results obtained suggest that observed bright AGNs form a relatively rare population among massive elliptical galaxies, due to their narrowly directed emission and their short lifetimes.

Keywords: blazars, active galactic nucleus, black holes.

For citation (IEEE): L. N. Volvach, A. E. Volvach, and M. G. Larionov, "Parameters of binary systems in 0235+164, 0528+134 and 0954+658 blazars," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 1, no. 1, pp. 7–16, 2018. (In Russ.).
doi: 10.15826/icrt.2018.01.1.01

1. Введение

Блазары являются одними из ярчайших активных ядер галактик (АЯГ), которые усиленно исследуются в широком диапазоне длин волн от радио- до гамма-диапазона. Статистические данные указывают на то, что мы наблюдаем яркие представители АЯГ в небольшом количестве по отношению к общему числу массивных эллиптических галактик из-за узкой

направленности излучения в таких объектах (как правило менее 5°) и короткого времени жизни тесных двойных систем из СМЧД (порядка 10^4 лет).

2. Определение модельных параметров двойных систем из СМЧД

Длительный мониторинг внегалактических источников АО 0235+164, S0528+134 и S40954+658 на пяти частотах радиодиапазона от 4.8 ГГц до 37 ГГц получен с помощью 22-метрового радиотелескопа в Симеизе, Радиообсерватории Университета Метсахови Аалто и Радиообсерватории Мичиганского университета (рис. 1, 2, 3) [1], [2], [3].

Предполагая кеплеровские законы движения ДСЧД, с использованием законов Кеплера получим соотношение между размерами орбиты, периодом обращения и суммой масс компаньона и центральной СЧД [4]:

$$m + M = (4\pi^2 r^3)/(GT_{\text{орб}}^2), \quad (1)$$

где m — масса компаньона, M — масса центральной черной дыры, r — радиус орбиты компаньона, G — гравитационная постоянная. Также можно определить угловую скорость прецессии центрального тела $\Omega_{\text{пр}}$ из соотношения:

$$\Omega_{\text{пр}} = (3Gm\text{Cos}\theta)/(4r^3\omega), \quad (2)$$

где θ — половинный угол конуса прецессии, ω — угловая скорость вращения центрального тела.

Если учесть, что $\Omega_{\text{пр}} = 2\pi/T_{\text{пр}}$ и $\omega = 2\pi/T_{\text{вр}}$, то соотношение (10) можно преобразовать к виду

$$T_{\text{вр}}T_{\text{пр}} = (16\pi^2 r^3)/(3Gm\text{Cos}\theta) \quad (3)$$

Далее делим выражение (1) на (3) и, учитывая, что угол раствора конуса прецессии центрального тела 2θ в тесных двойных системах, как правило, не превышает (10—20) градусов ($\text{Cos}\theta \cong 1$), получим

$$(m + M)/m \approx 0.75 T_{\text{вр}}T_{\text{пр}}/T_{\text{орб}}^2 \quad (4)$$

В тесных двойных системах СЧД из-за сильных приливных воздействий друг на друга период орбитального движения компаньона может совпасть с периодом вращения более массивного центрального объекта, тогда:

$$(m + M)/m \approx 0.75 T_{\text{пр}}/T_{\text{орб}} \quad (5)$$

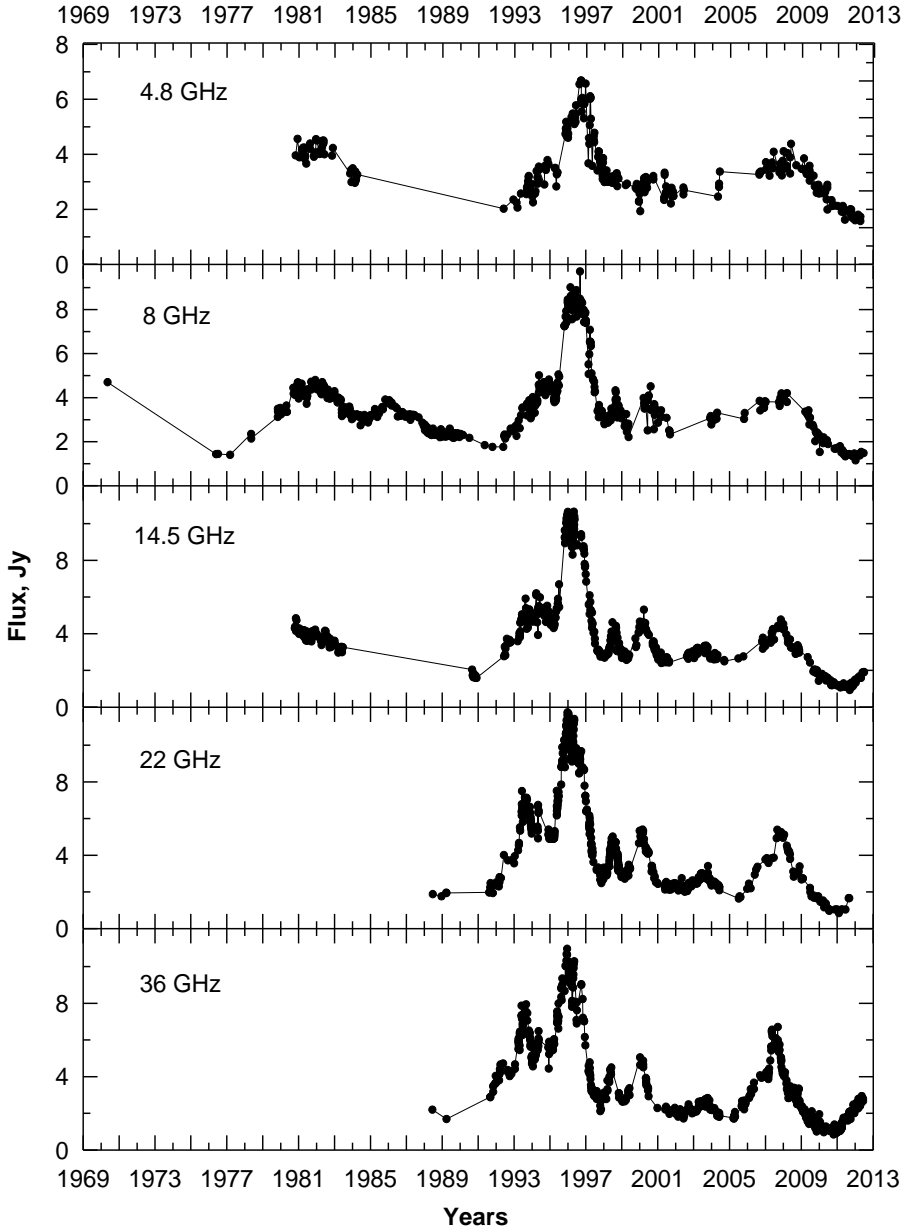


Рис. 1. Многочастотный мониторинг S0528+134.

Fig. 1. Multi-frequency monitoring of S0528+134

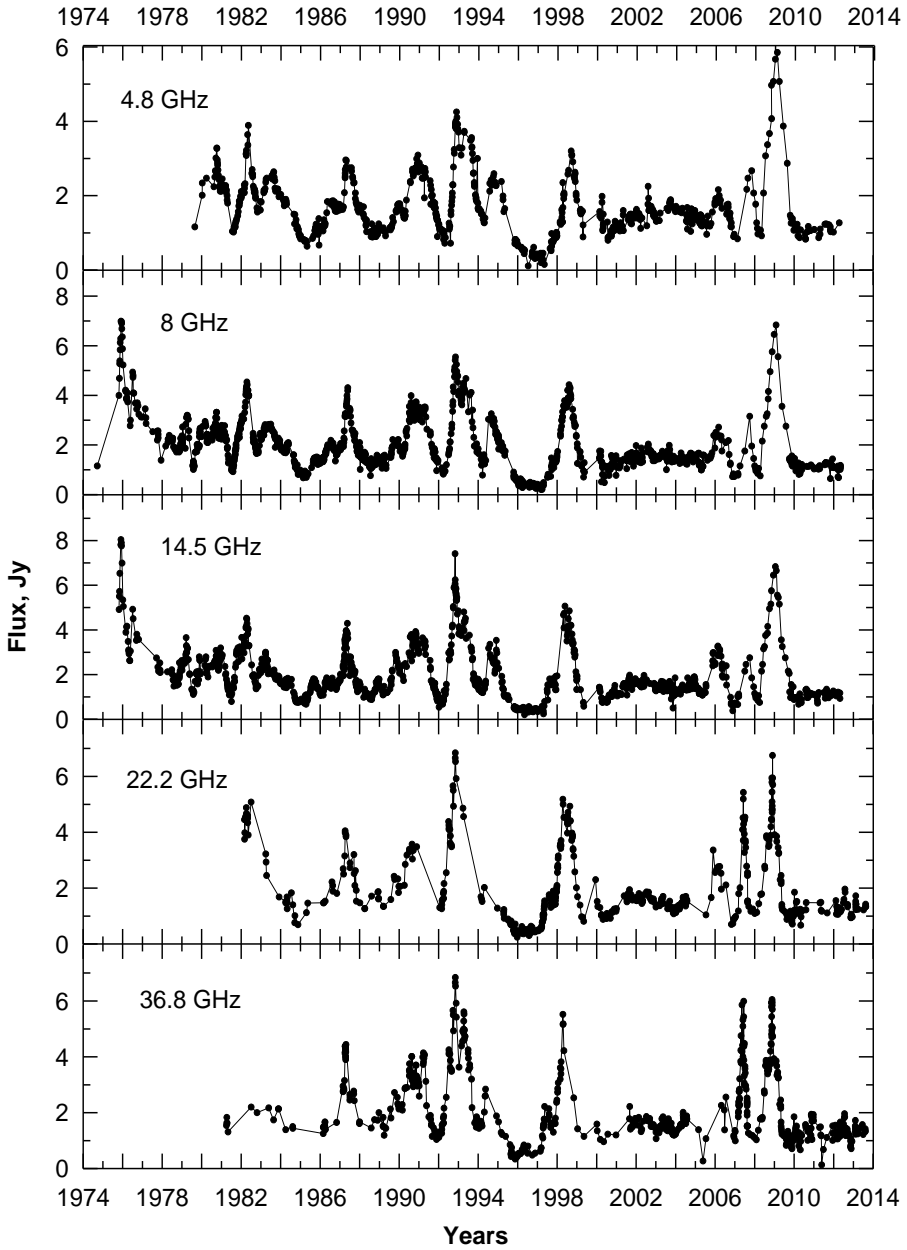


Рис. 2. Многочастотный мониторинг АО 0235+164.
Fig. 2. Multi-frequency monitoring of AO 0235+164

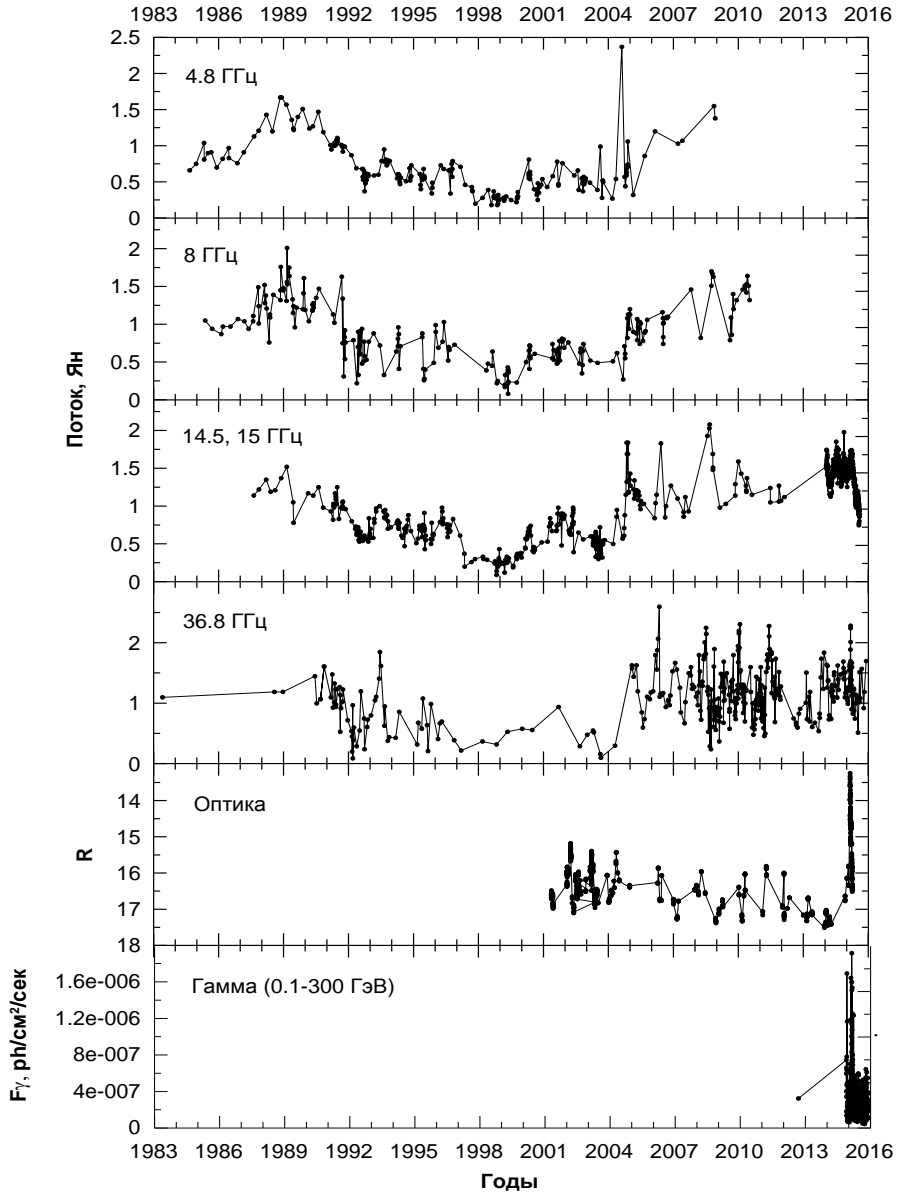


Рис. 3. Мониторинг S40954+658 на радиочастотах 4.8, 8, 14.5, 15 и 36.8 ГГц, в оптическом и гамма-диапазонах длин волн.

Fig. 3. Monitoring of S40954+658 in radio frequency of 4.8, 8, 14.5, 15 and 36.8 GHz, optical R and gamma wavelengths

Таким образом, функция масс источников в двойной системе из СЧД зависит только от значений орбитального и прецессионного периодов. После умножения правых и левых частей выражений (1) и (3) соответственно друг на друга и учитывая соотношение (5), получим выражение для массы компаньона и центральной СЧД:

$$m \approx 10^9 \cdot r^3 / (T_{\text{орб}} T_{\text{пр}}), \quad (6)$$

$$M \approx \{ (10^9 \cdot r^3) / (T_{\text{орб}} T_{\text{пр}}) \} \cdot \{ (0.75 T_{\text{пр}} / T_{\text{орб}}) - 1 \} \quad (7)$$

Наблюдается сильная зависимость масс компаньона и центральной СЧД от размеров орбиты компаньона. С увеличением орбиты в кубической степени растет и масса центрального тела. Это приводит к тому, что для ДСЧД будет наблюдаться очень узкий диапазон размеров орбит.

В нашем случае R — радиус орбиты компаньона центральной СМЧД в см, m — его масса в гр., M — масса центральной СМЧД, $T_{\text{орб}} = 1.94$ года (орбитальный период компаньона), $T_{\text{пр}} = 8.5$ лет (прецессионный период АО 0235+164).

3. Заключение

Блазар АО 0235+164. Для нахождения периодических составляющих в системе отсчета, связанной с центром масс АО 0235+164, используем значение красного смещения $z = 0.94$ и $\gamma = 20$. Тогда из соотношения $T_1 = T_{\text{вид}} \gamma^2 / (1 + z)$ получим $T_{\text{орб1}} \cong 400$ лет и $T_{\text{пр1}} \cong 1750$ лет, для масс компаньона и центрального тела — $m \cong 1.6 \cdot 10^{-12} R^3$, $M \cong 3.7 \cdot 10^{-12} R^3$.

Если радиус орбиты компаньона превышает значение $2 \cdot 10^{18}$ см, то масса центральной СЧД становится чрезмерно большой ($M > 10^{10} M_{\odot}$). При $R < 3 \cdot 10^{16}$ см время жизни объекта становится меньше 10^3 лет за счет потерь на гравитационное излучение [5]. При радиусе орбиты компаньона $R = 2 \cdot 10^{18}$ см он перемещается с $v \cong 10^4$ км/сек. С такой скоростью движется материя при взрывах сверхновых звезд I типа, и температура окружающей среды превышает миллиард градусов Кельвина. В случае если радиус орбиты компаньона $R = 2 \cdot 10^{18}$ см, то массы центрального тела и компаньона равны соответственно $M \cong 1.5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ и $m \cong 7 \cdot 10^9 M_{\odot}$. Следует отметить, что центральная СЧД всего в ~ 2 раза массивнее компаньона. При таком соотношении скорость движения центральной СЧД вокруг общего центра тяжести может достигать многих тысяч км/сек и роль аккреции, как источника первичного энерговыделения, резко падает [6].

Таким образом, значение орбиты блазара АО 0235+164 находится в пределах $10^{17} < R < 2 \cdot 10^{18}$ см. Минимальные значения орбиты ограничи-

ваются малым временем жизни двойной системы из СЧД из-за возрастающих потерь за счет гравитационного излучения, а максимальные величины орбиты связаны с непомерно большой массой центрального тела.

Излучение такой двойной системы может поддерживаться, в первую очередь, потерями орбитального момента компаньона центральной СЧД при движении в плотной аккрецирующей среде.

Блазар S0528+134. В системе отсчета, связанной с центром масс S0528+134 ($T = T_{\text{вид}} \gamma^2 / (1 + z)$), получим $T_{\text{орб}} \cong 32$ лет и $T_{\text{пр}} \cong 238$ лет, используя значение красного смещения и консервативную оценку $\gamma = 10$ из работ [7], [8]. Подставляя в выражения (4) и (5), полученные для S0528+134 значения $T_{\text{орб}}$ и $T_{\text{пр}}$, получим значения масс компаньона и центральной СМЧД:

$$m \cong 2.5 \cdot 10^{-11} R^3, \quad (8)$$

$$M \cong 1.3 \cdot 10^{-10} R^3 \quad (9)$$

При значениях орбиты $R > 10^{18}$ см масса центрального тела становится непомерно большой ($M > 2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$), а при $R < 3 \cdot 10^{16}$ см время жизни объекта становится меньше 10^3 лет и определяется потерями на гравитационное излучение [5]. При радиусе орбиты центрального тела $R \cong 10^{18}$ см компаньон центральной сверхмассивной черной дыры перемещается по орбите со скоростью $v \cong 50$ км/сек. Это в несколько раз превышает скорость движения материи при взрывах сверхновых звезд.

Таким образом, значение орбиты блазара S0528+134 может находиться в пределах $3 \cdot 10^{16} < R < 10^{18}$ см. Это указывает на то, что, как и в случае других ярчайших представителей АЯГ, S0528+134 является тесной двойной системой из сверхмассивных черных дыр. Излучение этой двойной системы может инициироваться динамическими потерями сверхмассивного компаньона, перемещающегося со сверхзвуковой скоростью в плотной среде, окружающей СМЧД.

Блазар S40954+658. Следуя выводам, изложенным в работе [4], можно найти параметры двойной системы S40954+658. Так, используя выражения (1—8) указанной работы, получим для масс компаньона центральной СМЧД (m) и самой центральной СМЧД (M):

$$m \cong 10^9 R^3 / (T_{\text{орб}} T_{\text{пр}}), \quad (10)$$

$$M \cong [10^9 R^3 / (T_{\text{орб}} T_{\text{пр}})] [(3T_{\text{пр}} / 4T_{\text{орб}}) - 1], \quad (11)$$

где R — радиус орбиты компаньона центральной СМЧД, $T_{\text{орб}}$ — орбитальный период, $T_{\text{пр}}$ — прецессионный период.

Для проведения дальнейших вычислений необходимо найти T_{orb} и $T_{\text{пр}}$ в системе отсчета, связанной с центром масс S40954+658:

$$T = T_{\text{вид}} \gamma^2 / (1 + z), \quad (12)$$

где T — период в системе отсчета, связанной с источником, $T_{\text{вид}}$ — период в системе отсчета, связанной с наблюдателем.

Получим значения $T_{\text{orb}} \cong 870$ и $T_{\text{пр}} \cong 8700$ лет, используя $z = 0.368$ и оценку гамма-фактора $\gamma = 25$. Подставляя в 2 и 3 найденные для S40954+658 значения T_{orb} и $T_{\text{пр}}$, получим значения масс компаньона и центральной СМЧД:

$$m \cong 1.4 \cdot 10^{-13} R^3, \quad (13)$$

$$M \cong 0.9 \cdot 10^{-12} R^3. \quad (14)$$

При значениях орбиты $R > 5 \cdot 10^{18}$ см масса центрального тела становится непомерно большой ($M > 10^{10} M_{\odot}$), а при $R < 3 \cdot 10^{16}$ см время жизни объекта становится меньше 10^3 лет и определяется потерями на гравитационное излучение [5]. К тому же при малых значениях радиуса орбиты компаньона ($M < 5 \cdot 10^{17}$ см) массы СМЧД становятся небольшими, что уменьшает вероятность высокого энерговыделения из такой двойной системы. Учитывая указанные ограничения, размеры орбиты могут быть заключены в узком интервале значений: $5 \cdot 10^{17}$ см $< R < 5 \cdot 10^{18}$ см. Величина $R = 10^{18}$ см представляется реалистичной. При этом для значений масс центральной СМЧД и компаньона получим величины $M = 0.5 \cdot 10^9 M_{\odot}$, $m = 0.8 \cdot 10^8 M_{\odot}$.

Список литературы

1. Long-term, multi-frequency monitoring of the blazar S0528+134 (Nimfa) / Vol'vach A. E., Kutkin A. M., Larionov M. G., Vol'vach L. N., Lakhteenmaki A., Tornikoski M., Tammi J., Savolainen P., Aller M. F., Aller H. D., Sasada M. // *Astron. Reports*. 2014. Т. 58, № 2. С. 71—77.
2. Physical characteristics of the Blazar AO 0235+164 / Vol'vach A. E., Larionov M. G., Vol'vach L. N., Lähteenmäki A., Tornikoski M., Aller M. F., Aller H. D., Sasada M. // *Astron. Reports*. 2015. Т. 59, № 2. С. 145—155.
3. The Outburst of the Blazar S40954+658 in 2011 March-April / Morozova D. A., Larionov V. M., Troitsky I. S., Jorstad S. G., Marscher A. P., Gómez J. L., Blinov D. A., Efimova N. V., Hagen-Thorn V. A., Hagen-Thorn E. I., Joshi M., Konstantinova T. S., Kopatskaya E. N., Larionova L. V., Larionova E. G., Lähteenmäki A., Tammi J., Rastorgueva-Foi E., McHardy I., Tornikoski M., Agudo I., Casadio C., Molina S. N., Volvach A. E., Volvach L. N. // *Astron. J.* 2014. Т. 148, № 3. С. 42.
4. Sub-parsec structure of binary supermassive black holes in active galactic nuclei / Vol'vach A. E., Vol'vach L. N., Kut'kin A. M., Larionov M. G., Aller M. F., Aller H. D. // *Astron. Reports*. 2010. Т. 54, № 1. С. 28—37.

5. Переменность излучения блазара 3C 454.3 за период 40 лет / Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г., Аллер Х. Д., Аллер Д. А. // *Астрономический журнал*. 2007. Т. 84, № 6. С. 503—513.
6. Shvartsman V. F. The Influence of Stellar Wind on Accretion // *Astron. Zhurnal*. 1970. Т. 47. С. 660—667.
7. Very-long-baseline radio interferometry (VLBI) observations of gamma-ray blazars: results from millimeter-VLBI observations / Krichbaum T. P., Britzen S., Standke K. J., Witzel A., Schalinski C. J., Zensus J. A. // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 1995. Т. 92. С. 11377—11380.
8. Böttche M., Collmar W. Spectral variability in PKS 0528+134 at gamma-ray energies // *Astron. Astrophys.* 1998. Т. 329. С. L57—L60.

References

- [1] A. E. Vol'vach, A. M. Kutkin, M. G. Larionov, L. N. Vol'vach, A. Lakhteenmaki, M. Tornikoski, J. Tammi, P. Savolainen, M. F. Aller, H. D. Aller, and M. Sasada, "Long-term, multi-frequency monitoring of the blazar S0528+134 (Nimfa)," *Astron. REPORTS*, vol. 58, no. 2, pp. 71—77, Feb. 2014. doi: 10.1134/S1063772914010065
- [2] A. E. Vol'vach, M. G. Larionov, L. N. Vol'vach, A. Lähteenmäki, M. Tornikoski, M. F. Aller, H. D. Aller, and M. Sasada, "Physical characteristics of the Blazar AO 0235+164," *Astron. Reports*, vol. 59, no. 2, pp. 145—155, 2015.
- [3] D. A. Morozova, V. M. Larionov, I. S. Troitsky, S. G. Jorstad, A. P. Marscher, J. L. Gómez, D. A. Blinov, N. V. Efimova, V. A. Hagen-Thorn, E. I. Hagen-Thorn, M. Joshi, T. S. Konstantinova, E. N. Kopatskaya, L. V. Larionova, E. G. Larionova, A. Lähteenmäki, J. Tammi, E. Rastorgueva-Foi, I. McHardy, M. Tornikoski, I. Agudo, C. Casadio, S. N. Molina, A. E. Volvach, and L. N. Volvach, "The Outburst of the Blazar S4 0954+658 in 2011 March-April," *Astron. J.*, vol. 148, no. 3, p. 42, 2014.
- [4] A. E. Vol'vach, L. N. Vol'vach, A. M. Kut'kin, M. G. Larionov, M. F. Aller, and H. D. Aller, "Sub-parsec structure of binary supermassive black holes in active galactic nuclei," *Astron. Reports*, vol. 54, no. 1, pp. 28—37, 2010. doi: 10.1134/S106377291001004X
- [5] A. E. Volvach, L. N. Volvach, and M. G. Larionov, "The Variability of a Blazar 3C 454.3 over a 40-Year Period," *Astron. Reports*, vol. 51, no. 6, pp. 450—459, 2007. doi: 10.1134/S1063772907060030
- [6] V. F. Shvartsman, "The Influence of Stellar Wind on Accretion," *Astron. Zhurnal*, vol. 47, pp. 660—667, 1970.
- [7] T. P. Krichbaum, S. Britzen, K. J. Standke, A. Witzel, C. J. Schalinski, and J. A. Zensus, "Very-long-baseline radio interferometry (VLBI) observations of gamma-ray blazars: results from millimeter-VLBI observations," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 92, pp. 11377—11380, 1995.
- [8] M. Böttche and W. Collmar, "Spectral variability in PKS 0528+134 at gamma-ray energies," *Astron. Astrophys.*, vol. 329, pp. L57—L60, 1998.