

А. Е. Вольвач

Лаборатория радиоастрономии НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория»,
98688 АР Крым, г. Ялта, п. Кацивели

Двойные системы из сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик

На основе длительного мониторинга активных ядер галактик (АЯГ) 3C454.3, 1633+382 и 3C120, проведенного в НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» на частотах 22.2 и 36.8 ГГц в период с 1985 по 2008 гг., выполнен анализ наличия гармонических составляющих изменений потоков. Обнаружены долговременные периодические компоненты (12—14 лет), проинтерпретированные как прецессионные движения центрального тела в двойных системах. Выявлены также короткопериодические составляющие 1.5—3 г., связанные с орбитальными движениями компаньонов центральных сверхмассивных черных дыр. Сделан вывод, что наиболее яркие представители АЯГ, наблюдаемые как нестационарные источники в широком диапазоне длин волн, являются двойными системами из сверхмассивных черных дыр, находящимися на стадии эволюции, близкой к слиянию. Для двойных систем из сверхмассивных черных дыр получены массы центральных черных дыр и компаньонов, радиусы орбит компаньонов, время жизни до слияния. Отношение масс двойных систем во всех трех случаях составляет менее 10, что указывает на сильное гравитационное воздействие на центральную черную дыру со стороны компаньона. Скорости перемещения центрального тела значительны и составляют величины порядка 1000 км/с. Этот факт требует своего учета при вычислении темпа аккреции на центральное тело. Радиусы орбит компаньонов заключены в узких пределах (4—6) 10^{16} см, что отражает сильную зависимость масс двойных систем от размеров орбиты и потери энергии на гравитационное излучение. Внутри орбиты компаньона по пути его движения сквозь среду аккреционного диска достигается высокая температура окружающего газа. Высокая плотность среды 10^9 — 10^{10} см⁻³ в сочетании с наличием магнитных полей и ударных волн, распространяющимися по аккре-

ционному диску, создают условия для мощного энерговыделения в направленных джетах.

ПОДВІЙНІ СИСТЕМИ ІЗ НАДМАСИВНИХ ЧОРНИХ ДІР У ЯДРАХ АКТИВНИХ ГАЛАКТИК, Вольвач О. Є. — На основі тривалого моніторингу активних ядер галактик (АЯГ) 3С454.3, 1633+382 і 3С120, проведеного в НДІ «Кримська астрофізична обсерваторія» на частотах 22.2 і 36.8 ГГц у період з 1985 по 2008 рр., виконано аналіз наявності гармонійних складових змін потоків. У розглянутих АЯГ виявлено довгострокові періодичні компоненти (12—14 років), проінтерпретовані як прецесійні рухи центрального тіла у подвійних системах. Виявлено також короткоперіодичні складові 1.5—3 роки, пов'язані з орбітальними рухами компаньйонів центральних надмасивних чорних дір. Зроблено висновок, що найяскравіші представники АЯГ, що спостерігаються як нестационарні джерела в широкому діапазоні довжин хвиль, є подвійними системами з надмасивних чорних дір, що перебувають на стадії еволюції, близької до злиття. Для подвійних систем із надмасивних чорних дір отримано маси центральних чорних дір і компаньйонів, радіуси орбіт компаньйонів, час життя до злиття. Відношення мас подвійних систем у всіх трьох випадках менш за 10, що вказує на сильний гравітаційний вплив на центральну чорну діру з боку компаньйона. Швидкості переміщення центрального тіла значні і складають величини порядку 1000 км/с. Цей факт вимагає свого урахування при обчисленні темпу акреції на центральне тіло. Радіуси орбіт компаньйонів лежать у вузьких межах (4—6) 10^{16} см, що відбиває сильну залежність мас подвійних систем від розмірів орбіти і втрати енергії на гравітаційне випромінювання. У середині орбіти компаньйона на шляху його руху крізь середовище акреційного диска досягається висока температура навколишнього газу. Висока щільність середовища (10^9 — 10^{10}) см^{-3} у сполученні з наявністю магнітних полів і ударних хвиль, що поширюються по акреційному диску, створюють умови для могутнього енерговиділення в спрямованих джетах.

BINARY SYSTEMS OF SUPERMASSIVE BLACK HOLES IN THE ACTIVE GALAXY NUCLEI, by Volvach A. E. — We carried out an analysis of periodic components of flux variability on the basis of the long-term monitoring of the active galaxy nuclei 3C454.3, 1633+382 and 3C120 observed at the Crimean Astrophysical Observatory during 1985—2008 at 22.2 and 36.8 GHz. Long-period components of the variability (12—14 years) are determined in the sources and are interpreted as the precessional motion of the central body in a double system. The detected short-period components of the variability (1.5—3 years) are compared using the models of the orbital periods for motion in the central supermassive black holes. The brightest representative active galaxies observed as nonstationary sources in a broad range of wavelengths are binary systems of supermassive black holes

at the evolution stage close to coalescence. The following parameters for the supposed binary black-hole systems are determined: the masses of the central object and its companion, the radius of the companion's orbit, and coalescence time. The ratio of the masses of the double systems for all the sources is less than 10, that points to a strong gravitation effect of the companion on the central black hole. The motion velocities of the central body is about 1000 km/s. This fact requires an additional account in the calculation of the rate of the accretion on the central body. The orbital radii of the companions fall in the narrow range between $4 \cdot 10^{16}$ and $6 \cdot 10^{16}$ cm, which points to a strong interrelation between the masses of the binary systems and orbit sizes and the energy loss for gravitation radiation. Within the orbit of the companion during its motion through the accretion disk, a high temperature of surrounding gas is reached. High density of the medium which is $(10^9 - 10^{10}) \text{ cm}^{-3}$, combined with magnetic fields and shock waves spreading in the accretion disk, creates some conditions for powerful energy release in directed jets.

ВВЕДЕНИЕ

Активные ядра галактик (АЯГ), наблюдаемые в сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн, представляют одну из важнейших популяций среди радиоизлучающих объектов [2]. Большинство из них на данных длинах волн — сильно переменные источники [2, 5, 32].

Согласно современным представлениям нестационарные источники излучения являются компактными образованиями, находящимися в центральных областях галактик. Центральная система состоит из сверхмассивных двойных черных дыр [27]. Более массивный компонент обладает аккреционным диском, вращение и прецессия которого во многом определяют динамику и процессы излучения в системе [astro-ph/0412416]. Считается, что источником энерговыделения в АЯГ является аккреция на сверхмассивную черную дыру и диск окружающего газового вещества.

Массивная вращающаяся черная дыра может преобразовывать обшей с внутренними областями аккреционного диска момент вращения вещества в выбрасываемую с релятивистскими скоростями плазму. Выбрасываемое вещество формируется в узкие противоположно направленные выбросы — «джеты» [19]. Вспышечная составляющая переменности потока излучения может возникать посредством механизма системы ударных волн в выбросах, которые создают уплотнения в релятивистской плазме [13, 21]. Как следствие прецессионных движений центрального тела могут наблюдаться винтовые движения в истекающих струях [12, 15, 16, 18].

Является ли аккреция единственным механизмом энерговыделения в АЯГ? В принципе, излучение в выбросах и в дисковой составляющей в широком диапазоне длин волн (от радио- до рентгеновского) может определяться и другими физическими процессами. Наличие

тесной корреляции излучения в радио- и в оптическом диапазоне при развитии вспышки в источнике могло бы указывать на общий механизм процессов генерации излучения, происходящих в направленных джетах. Рассмотрение этого вопроса представляется крайне важным с астрофизической точки зрения, так как его решение может пролить свет на механизм источников энерговыделения в ядрах активных галактик. Поэтому очень важно иметь наблюдательные данные по переменности потоков излучения АЯГ в широком диапазоне длин волн. Другой важный момент — необходимость своевременных научных прогнозов при интерферометрических наблюдениях. Это дает возможность проводить изучение процессов, происходящих внутри орбиты двойной системы из сверхмассивных черных дыр в АЯГ. Такая ситуация будет реализовываться в будущей наземно-космической миссии «РадиоАстрон».

Именно в преддверии проекта «РадиоАстрон» очень важной составляющей готовящегося наземно-космического интерферометрического эксперимента является установление связи между переменностью ядра и структурой внутренних областей джетов. При наблюдениях с помощью одиночной антенны мы принимаем интегральный поток от источника. Но при этом долговременный мониторинг АЯГ является эффективным инструментом исследования структуры внутренних областей источников и динамики происходящих в них вспышечных явлений (т. е. областей, которые не доступны даже современным глобальным интерферометрам). В работе [6] из анализа световых кривых длительного мониторинга АЯГ было показано, что в кривых блеска есть компоненты переменности потока с различными спектральными характеристиками. Иногда на миллиметровых длинах волн наблюдается растущий степенной спектр излучения вспышки ($F \sim \nu^{-2.5}$) со спектральным индексом -2.5 . Такой спектр получается при вычитании фоновой составляющей излучения из излучения объекта, механизм которой может быть другим как по спектральным характеристикам, так и по области возникновения. В других случаях подъема излучения в источнике спектральные характеристики указывают на возможность объяснения излучением оптически тонкого слоя газа. Это может свидетельствовать в пользу того, что мы можем наблюдать проявление вспышки дважды в процессе ее развития от истоков джета (сначала как оптически толстый слой газа, затем, после расширения и при подходящем угле зрения, — как оптически тонкий слой [6]).

Из сказанного становится ясно, что длительный мониторинг нестационарных источников открывает хорошую перспективу для установления связи между структурой источника, полученной из интерферометрических наблюдательных сессий, и переменностью его интегрального потока.

Целью работы является проведение исследований длительного мониторинга АЯГ: 3C454.3, 1633+382 и 3C120, выполненных в НИИ

«КраО» в течение последних 25 лет на частотах 22.2 и 36.8 ГГц с целью построения физической картины динамики двойных систем из сверхмассивных черных дыр в их ядерных областях. При этом использованы данные развития нестационарных явлений как в радио-, так и в оптическом диапазоне длин волн.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Экспериментальные данные получены с помощью 22-м радиотелескопа (РТ-22) НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» на частотах 22.2 и 36.8 ГГц. К результатам измерений [7, 10, 25, 30, 33] добавлены данные наблюдений по 2006 г. включительно.

При наблюдениях использованы модуляционные радиометры [9, 11]. Программой наблюдений предусматривалась процедура определения антенной температуры от источников методом «ON-ON», описанным в работе [8]. Для определения поправок наведения на источник его положение уточнялось сканированием по прямому восхождению и склонению. При использовании диаграммной модуляции обеспечивалась фильтрация неоднородностей атмосферы, а сам принцип модуляции позволял исключить флуктуации коэффициентов усиления приемных трактов радиометров. Антенная температура от источника определялась как разность между усредненными в течение 30 с откликами радиометра в двух различных положениях антенны. В зависимости от величины потока источника выполнялись серии из 5—20 измерений, после чего рассчитывалось среднее значение сигнала, и оценивалась средняя квадратичная ошибка среднего. Ход изменения антенной температуры от угла места радиотелескопа позволял определить поглощение сигнала в атмосфере Земли. Такая процедура калибровки атмосферы выполнялась через каждые 3–4 ч.

Измеренные антенные температуры, исправленные за поглощение излучения в атмосфере Земли, пересчитывались в плотности потоков по данным наблюдений калибровочных источников [9], которые представлены в табл. 1. Во второй и третьей графах таблицы указаны принятые плотности F потоков, в четвертой и пятой — яркостные температуры T_a .

Для определения плотностей потоков источников учитывалась также зависимость эффективной площади $A_{эф}$ антенны от угла места h через изменения антенных температур при изменении угла места радиотелескопа. Значения $A_{эф}$ радиотелескопа, определенные по наблюдениям калибровочных источников, аппроксимировались зависимостью вида

$$A_{эф} = a \sinh + b \cosh + c. \quad (1)$$

Коэффициенты a , b и c определялись методом наименьших квадратов.

При расчете средней квадратичной ошибки плотности потока учитывались ошибка ΔT_a измерений антенной температуры T_a и ошиб-

Таблица 1. Параметры калибровочных источников

Объект	F , Ян		T , К	
	= 36.8 ГГц	= 22.2 ГГц	= 36.8 ГГц	= 22.2 ГГц
DR21	18.3	19.5	—	—
3C 274	14.3	21.5	—	—
Юпитер	—	—	158	138
Сатурн	—	—	148	128

ка α_2 аппроксимации $A_{\text{эф}}$ (типичные значения $\alpha_1 = 2\text{—}4\%$, $\alpha_2 = 3\text{—}6\%$). При такой методике обработки данных автоматически учитываются ошибки измерений, возникающие вследствие влияния шумов аппаратуры, ошибок наведения телескопа, ошибок определения коэффициента поглощения, нестабильности коэффициента усиления радиометра.

На основе полученных баз данных миллиметрового диапазона длин волн проведен гармонический анализ кривых изменения потока излучения источника методом Шустера, который приведен в работе В. В. Витязева [1], а его применение к анализу радиоданных — в работе [31].

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ ИСТОЧНИКОВ 3C454.3, 1633+382 И 3C120

Исследование вариаций потоков АЯГ на частотах $\nu = 22.2$ и 36.8 ГГц в НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» проводятся с 1980 г. [7] и параллельно финской группой [29]. За это время в вариациях потока были обнаружены многие периодические составляющие с периодами примерно 1–30 лет [3, 17]. Кроме того, оказалось, что на периодические составляющие налагаются более быстрые изменения плотности потока (импульсная составляющая изменения потока).

Кривые блеска для трех источников на двух частотах приведены на рисунке. Анализируя экспериментальные данные, можно отметить несколько особенностей в изменениях плотности потока на различных частотах.

В указанных источниках проявляются вариации потока с различными периодами от 1 г. до 30 лет в обеих частотных диапазонах.

Есть компоненты спектров как с уменьшением амплитуды в сторону высоких частот, почти не зависящие от частоты, так и с увеличением спектральной плотности в сторону высоких частот. Такое спектральное поведение изменений потока является очень важным для физической интерпретации полученных данных.

Наблюдаются более быстрые изменения потока, но с меньшей относительной амплитудой. Все это указывает на сложный характер излучения нестационарных объектов. Более гладкие изменения потока на низких частотах могут служить указанием на то, что излучение на этих частотах поступает к нам из менее компактных областей, чем излучение на высоких частотах.

ГАРМОНИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИСТОЧНИКА 3C454.3

В графах 1—3 табл. 2 приведены значения периодов гармоник, обнаруженных в рядах потока излучения источника 3C454.3 на двух частотах радиодиапазона и средние значения периодов по всем частотам (см. также рисунок). Можно видеть, что в вариациях плотности потока имеется набор гармонических составляющих. Наиболее достоверными являются долгопериодическая составляющая (13.8 г.), примерно половинная составляющая (6.5 г.) и короткопериодическая гармоника (1.5 г.). Естественно связать составляющую 13.8 лет с прецессионным периодом в системе из двойных сверхмассивных черных дыр, как это делают и другие исследователи. Тогда короткопериодической составляющей 1.5 г. соответствует орбитальный период двойной системы. Ниже мы подробнее остановимся на получении физических характеристик системы, исходя из приведенных предположений.

В графах 4—6 табл. 2 представлены данные анализа в системе отсчёта, связанной с излучающим объектом ($z = 0.86$), но без учета Лоренц-фактора.

Естественно считать, что небольшие значения периодов орбит компаньонов двойных систем из черных дыр связаны с тем, что мы наблюдаем релятивистское движение вещества под малым углом зрения. Поэтому периодические изменения в системе отсчета, связанной с центром тяжести двойных черных дыр, будут другими после введения лоренц-фактора [astro-ph/0506720]. Тогда связь между наблюдаемым периодом $T_{\text{набл}}$ и периодом в системе отсчета источника T определяется выражением

$$T = T_{\text{набл}} \sqrt{1+z}. \quad (2)$$

В графах 7—9 табл. 2 приведены значения периодов гармоник для источника 3C454.3, полученные при умеренных значениях лоренц-фактора $\gamma = 5$.

В системе отсчёта, связанной с центром масс двойной черной дыры, периоды процессов увеличиваются более чем в десять раз. Интересно отметить, что диапазон изменения периодов от самого длинного до самого короткого составляет величину около десяти. Это отношение может оказаться типичным для сверхмассивных систем, являющихся наиболее яркими представителями АЯГ.

Таблица 2. Значения периодов гармоник (T , годы) для источника 3C454.3, полученные в наблюдательных данных, в системе отсчета источника и с учетом лоренц-фактора

В наблюдательных данных			В системе отсчета источника			С учетом лоренц-фактора $\gamma = 5$		
22.2 ГГц	36.8 ГГц	Среднее	22.2 ГГц	36.8 ГГц	Среднее	22.2 ГГц	36.8 ГГц	Среднее
14.8	12.9	13.8±1.0	7.96	6.94	7.29±0.54	198.9	173.4	186.2±13.5
6.5	6.4	6.5±0.1	3.49	3.44	3.49±0.08	87.4	86.0	86.7±2.0
—	4.3	4.3±0.1	—	2.31	2.33±0.06	—	57.8	57.8±1.5
3.6	—	3.6±0.1	1.94	—	1.94±0.08	48.4	—	48.4±1.9
1.5	1.6	1.5±0.1	0.81	0.86	0.84±0.03	20.2	21.5	20.8±0.7

Слияния сверхмассивных черных дыр в центральных областях галактик может быть крайне редким явлением. Естественней предположить, из статистических соображений, что чаще наблюдается слияние центрального тела большой массы, уже поглотившего неоднократно черные дыры меньших масс, с менее массивной черной дырой. Тогда мы будем наблюдать систему из двух черных дыр неравных масс. Компаньон центральной сверхмассивной черной дыры вращается по эллиптической орбите с периодом обращения $T_{орб}$. При этом ось вращения центрального тела может быть не перпендикулярной к плоскости орбиты. То же самое относится и к аккреционному диску сверхмассивной черной дыры. Кроме того, периоды вращения центральной черной дыры $T_{вр}$ и внешних областей аккреционного диска могут не совпадать из-за отсутствия «вмороженности» магнитного поля в среду в основной массе диска. В этом случае прецессия центральной черной дыры в совокупности с центральными областями аккреционного диска, откуда происходят выбросы релятивистского вещества, может происходить за счет возмущения компаньона, двигающегося по орбите с орбитальным периодом $T_{орб}$, при этом

$$m + M = (4 \pi^2 r^3) / (G T_{орб}^2), \tag{3}$$

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

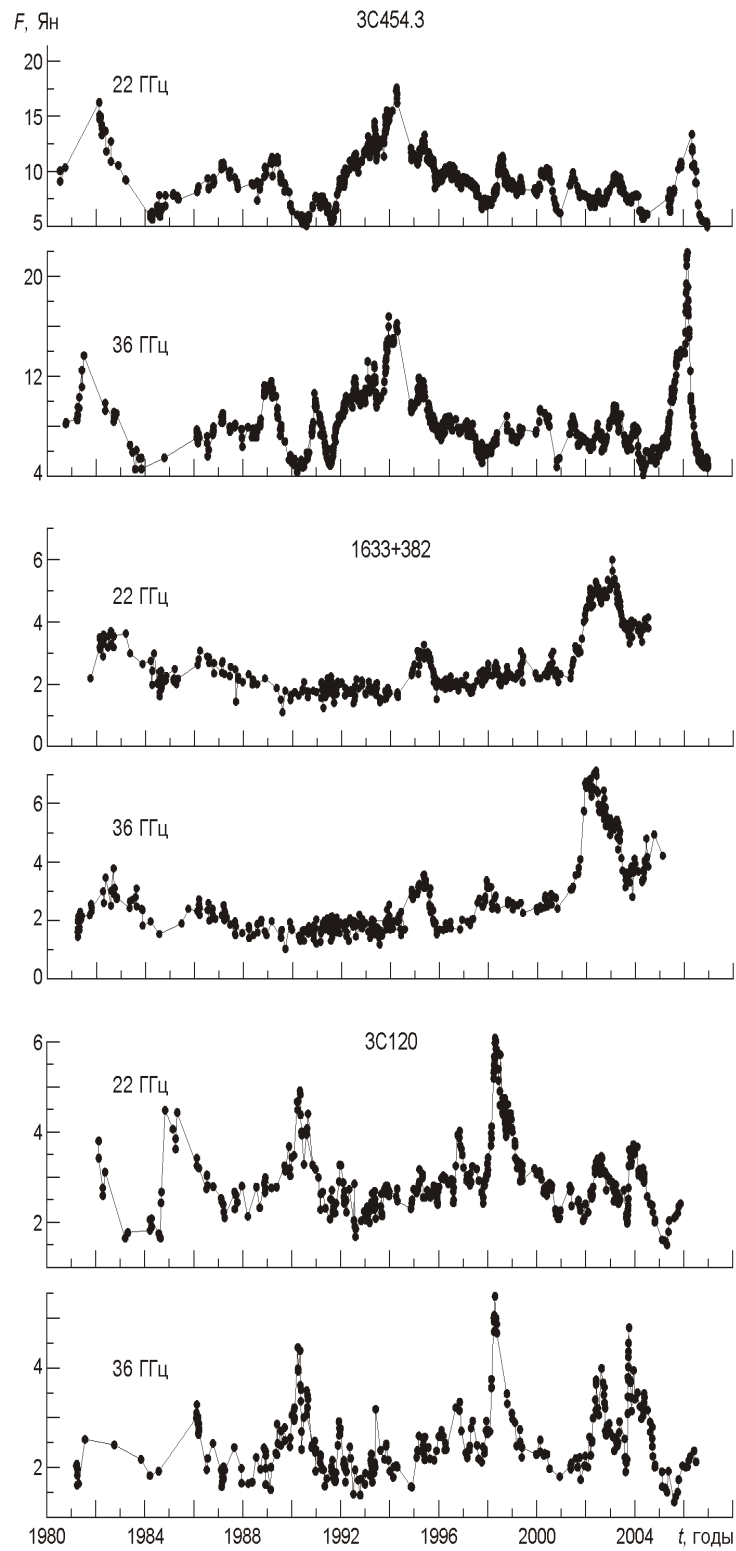
С другой стороны, угловая скорость $\omega_{пр}$ прецессии центрального тела определяется из соотношения

$$\omega_{пр} = (3Gm \cos \theta) / (4r^3), \tag{4}$$

где θ — половинный угол конуса прецессии, $\omega_{вр}$ — угловая скорость вращения центрального тела.

Учитывая, что $\omega_{пр} = 2\pi / T_{пр}$ и $\omega_{вр} = 2\pi / T_{вр}$, соотношения (3) и (4) можно преобразовать к виду

$$T_{вр} T_{пр} = (16 \pi^2 r^3) / (3Gm \cos \theta). \tag{5}$$



Измеренные плотности потока источников 3C454.3, 1633+382 и 3C120 на двух частотах радиодиапазона

Если разделить выражение (3) на (5) и учесть, что угол 2 раствора конуса прецессии центрального тела в тесных двойных системах, как правило, не превышает $10\text{--}20$ ($\cos \approx 1$), получим

$$(m + M)/m = 0.75 T_{\text{вр}} T_{\text{пр}} / T_{\text{орб}}^2. \quad (6)$$

В случае тесных двойных систем из черных дыр может возникнуть ситуация, когда из-за сильных приливных воздействий друг на друга период орбитального движения компаньона совпадет с периодом вращения более массивного центрального объекта или компаньона.

Как уже отмечалось, естественно предположить, что в нашем случае наблюдаемый период $T = 13.8$ г. следует отнести к прецессионным движениям центральной массивной черной дыры и связанных с нею центральных областей аккреционного диска. Самый короткий наблюдаемый период $T = 1.5$ г. можно сопоставить с периодами вращения центрального тела и компаньона по орбите. В этом случае получим соотношение масс

$$(m + M)/m \approx 8.7. \quad (7)$$

Отличие массы центрального тела и компаньона менее чем на порядок величины (7.7 раза) может ощутимо скорректировать физические условия в аккрецирующем диске центрального тела. Это связано с тем, что центральное тело под действием гравитационного воздействия компаньона приобретает значительные скорости движения относительно общего центра масс. Темп аккреции вещества на диск может от этого существенно изменяться.

Умножив правые и левые части выражений (3) и (5) соответственно друг на друга и учитывая (7) получим выражение для массы компаньона:

$$m = (8^{-2} r^3) / [G T_{\text{орб}} (3 T_{\text{вр}} T_{\text{пр}})^{1/2}]. \quad (8)$$

Видно, что масса компаньона сильно зависит от размеров его орбиты. Увеличивая размеры орбиты компаньона, мы увеличиваем его массу, а вместе с ней и массу центрального тела. Ниже будет показано, что это может поставить ограничения на размеры орбиты двойных сверхмассивных черных дыр.

Используя приведенные выше соотношения для периодов, масс компаньона и центрального тела для заданных значений радиусов орбиты компаньона, получим значения масс компаньона и центрального тела (табл. 3).

Мы учли, что $T_{\text{вр}} = T_{\text{орб}}$, и в выражении (6) отношение $(m + M)/m$ не изменяется при переходе из одной системы отсчета в другую. Кроме того, сохраняются прежние значения масс компаньона и центральной черной дыры (выражение (8) остается неизменным при пропорциональном изменении числителя и знаменателя).

Как следует из табл. 3, все значения для радиуса r орбиты компаньона и масс черных дыр являются приемлемыми. Если принять

Таблица 3. Значения масс компаньона и центрального тела для источников 3C454.3, 1633+382 и 3C120

$r, 10^{16}$ см	3C454.3		1633+382		3C120	
	$m, 10^9 M_{\odot}$	$M, 10^9 M_{\odot}$	$m, 10^9 M_{\odot}$	$M, 10^9 M_{\odot}$	$m, 10^9 M_{\odot}$	$M, 10^9 M_{\odot}$
13	5	35	6	40	7	40
6.5	0.62	4.8	0.70	5.5	0.86	6.3
4.3	0.18	1.4	0.21	1.6	0.25	2.0

значение первой строки, то масса центрального тела получается предельно возможной. Известно, что значение массы центральной черной дыры ограничено величиной $M \sim 10^{10} M_{\odot}$. С другой стороны, при орбите с радиусом $r < 3 \cdot 10^{16}$ см потери энергии за счет гравитационного излучения и динамического трения уже начинают серьезно сказываться на времени жизни двойной системы. Однако во всех приведенных нами случаях вопрос о потерях на гравитационное излучение остро не стоит.

Суммируя, можно отметить, что для второго и третьего значений радиусов орбиты реализуются приемлемые значения масс компаньона и центральной черной дыры. При выборе меньших радиусов орбиты компаньона, как упоминалось, существенным образом увеличиваются потери орбитального момента, связанные с гравитационным излучением и динамическими потерями за счет динамического сопротивления среды, сквозь которую с высокой скоростью (до нескольких тысяч километров в секунду) может двигаться компаньон. При выборе $r > 10^{17}$ см требуемая масса центральной черной дыры становится непомерно большой. При более высоком принятом значении Лоренц-фактора с увеличением периода стабильность орбиты только возрастает. Рассчитанные параметры указывают на то, что очень большого разброса в массах между центральным телом и компаньоном в данных моделях нет.

Из списка полученных периодов в двойной системе можно рассмотреть еще два периода: 4.33 и 3.6 г. Использование указанных периодов в качестве орбитальных, при сохранении периодов вращения центральной черной дыры и прецессии, приводит к уменьшению исходного значения массы компаньона и центрального тела в 2.3 и 2.9 раза соответственно. Существенным образом это не меняет физическую картину явления.

Приведенные данные показывают, что если рассмотренная физическая картина соответствует наблюдаемой действительности, то двойная система из сверхмассивных черных дыр может находиться в той фазе развития, которая достаточно близка к финальной стадии слияния.

Оценки времени слияния компонентов, определенные по формуле (1) работы [astro-ph/0506720], с приведенными во второй строке

табл. 3 значениями параметров двойной системы из черных дыр, дают значение $t_{\text{сл}} = 67$ лет. Близкие значения получаются и при оценке по соотношению (25) из работы [24]. Как уже отмечалось, рассмотренная картина поведения двойной системы из сливающихся черных дыр является типичной для немногочисленных примеров ярких АЯГ.

ГАРМОНИЧЕСКИЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПЕРЕМЕННОСТИ ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЪЕКТАХ 1633+382 И 3С120

В работе [17] также сообщалось, что в известном источнике OJ287 выделено два периода: 11.65 и 1.6 г. по оптическим [22, 27, 26] и радиоданным [14]. Период переменности потока в 12.4 г., выделенный в 3С120, также объяснялся наличием в двойной системе прецессионных движений [astro-ph/0312407]. Такой же период получается и из анализа изменений позиционного угла поляризации. В системе 3С120 отмечено наличие и менее периодических компонентов переменности потока излучения [28, 34]. Период переменности потока излучения около одного года в 3С120 отмечает Келлерманн [astro-ph/0304165]. Прецессионный период в 16 лет выделен и в источнике 3С273 [astro-ph/0304165]. Вероятно, наблюдаемые диапазоны периодов, которые можно отнести к прецессионным и орбитальным движениям в двойной системе из черных дыр, не очень велики.

Близость значений периодов в OJ287, 3С120, 3С454.3 и отношений периодов между долгопериодическими и короткопериодическими компонентами потока излучения (около 10) нам представляются важными фактами. Прецессионный и орбитальный периоды в двойных системах из черных дыр отличаются на порядок величины или более [23]. В нашем случае мы получили близкое значение отношения около 8.

Анализ данных долговременной переменности источника 1633+382 на частотах 22.2 и 36.8 ГГц обнаруживает 3-летнюю составляющую переменности потока (см. рисунок). Этот период наблюдался с 1982 по 2005 гг. На этих волнах изменения потока излучения превышают базовый уровень более чем в два раза. Но особенно высокая активность была отмечена в 1974 г. и 2003 г., что может указывать на наличие периода около 30 лет, связанного с прецессией в двойной системе из сверхмассивных черных дыр. В этом случае отношение орбитального и прецессионного периодов также равно десяти. Используя соотношения предыдущего раздела, получим данные для массы компаньона и центральной черной дыры, а также радиуса орбиты компаньона значения (см. табл. 3). Можно сделать вывод о том, что параметры системы 1633+382 и 3С454.3 близки друг к другу.

Таким образом, долговременный мониторинг объекта, возможно, указывает на то, что с прецессионным периодом 30 лет происходит уменьшение угла зрения между выбросами из полярной области цен-

тральной черной дыры и направлением на наблюдателя, за счет чего возрастает амплитуда активности с орбитальным периодом.

В источнике 3C 120 отмечен компонент с периодом 12.4 г. [26]. По данным длительного мониторинга на 22.2 и 36.8 ГГц (рисунок) мы обнаружили компонент с периодом 2 г. [6]. При единообразных представлениях о α -факторе и угле раствора конуса прецессии центрального тела получим по аналогии с объектами 3C454.3 и 1633+382 значения масс двойных систем и размеров орбиты компаньона (табл. 7).

Значение орбиты $6.5 \cdot 10^{16}$ см, как и в предыдущем случае, является наиболее приемлемым с точки зрения массы центральной черной дыры и потерь на гравитационное излучение.

ВОЗМОЖНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АЯГ

Полученные нами размеры орбит компаньонов (4—6) 10^{16} см соответствуют периодами их обращения 15—30 лет (в системе координат, связанных с центрами масс двойных черных дыр). При этом скорости движения по орбитам достигают 5—10 тыс. км/с. Такие скорости реализуются при разлете вещества в момент взрыва сверхновых звезд. Расчеты показывают, что при таких скоростях движения компаньона и плотностях вещества, сквозь которое движется сверхмассивная черная дыра, температуры газа поднимаются до величин 10^9 К и даже выше. Это является следствием термализации плазмы, когда направленное движение среды преобразуется в хаотическое за фронтом ударной волны. Следует учесть, что компаньоны двигаются со сверхзвуковыми скоростями. Ударные волны достигают истоков джетов, подпитывая энергию выбросов. Оценки показывают, что темп потери орбитального момента компаньона из-за динамического трения о среду обеспечивает необходимый уровень энергии, излучаемой АЯГ [4]. При высокой температуре центральных областей аккреционного диска может реализовываться ситуация «вмороженности» магнитного поля в плазму, если только турбуленция плазмы в этих областях не разрушает регулярное магнитное поле. В этом случае центральная черная дыра и внутренние области аккреционного диска могут вращаться с одинаковой угловой скоростью. По мере удаления от центральных областей к периферии аккреционного диска температура снижается, и «вмороженность» поля в среду нарушается. Благодаря этому внешние области аккреционного диска могут вращаться независимо от черной дыры. Изменение конфигурации центральной черной дыры относительно аккреционного диска в процессе прецессионного движения может привести к появлению нутационной составляющей дополнительно к прецессии центрального тела.

Начальная тепловая вспышка излучения в оптическом, рентгеновском и гамма-диапазонах длин волн может происходить, когда

компаньон двойной системы со сверхзвуковой скоростью проникает в аккреционный диск первичной сверхмассивной черной дыры [astro-ph/0212475]. При незначительном наклоне оси вращения центрального тела к плоскости орбиты компаньона движение компаньона в перицентре происходит в области аккреционного диска длительное время. По этой причине увеличение амплитуды вспышки занимает более длительное время, чем ее спад, который начинается после выхода компаньона из среды аккреционного диска. Сильные ударные волны, возникающие в диске, через временную задержку на распространение со скоростью звука $t = 0.3$ г. (для случая OJ287 [astro-ph/0212475]) достигают истоков выброса, увеличивая плотность среды и магнитного поля.

Ускорение частиц электрическими полями, генерируемыми ударными волнами в намагниченной плазме, может приводить к возникновению узкого направленного пучка из электронно-позитронных пар, окруженного джетом из релятивистской плазмы [20]. Это инициирует нетепловую оптическую вспышку, рост оптической поляризации и вращение угла поляризации в истоках джета. При этом возможны вспышки в гамма- и рентгеновском диапазонах длин волн за счет аннигиляции электрон-позитронных пар при распаде центрального узкого пучка с небольшими временными сдвигами относительно оптических возмущений.

Параллельное центральному течению магнитное поле становится тороидальным в основной части джета. Тороидальность магнитного поля, возможно, является причиной острой коллимации в джете, в котором распространяются ударные возмущения, порождающие подъем температуры за фронтом ударной волны и увеличение плотности поля.

По мере продвижения возмущений в джете изменяется длина волны регистрируемой вспышки. Временные задержки между оптической вспышкой и вспышкой в миллиметровом диапазоне длин волн уже значительны. Эти задержки имеют нелинейный вид с изменением частоты. Так, задержка между оптической вспышкой и вспышкой радиоизлучения (8 ГГц) в квазаре 3C345 ($z = 0.86$) составляет около 1 г. [20]. Развитие самого оптического всплеска (на 2.5^m) происходит за 0.6 г. Характерной особенностью поведения кривой блеска, как уже отмечалось, является более пологий подъем и более быстрый спад (за счет высвечивания и других потерь энергии).

ВЫВОДЫ

1. Данные длительных наблюдений АЯГ 3C454.3, 1633+382 и 3C120, выполненные в НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» на частотах 22.2 и 36.87 ГГц, позволили построить ряды измерений потоков достаточно длинные для гармонического анализа.

2. Во всех рассмотренных АЯГ обнаружены как долговременные периодические компоненты, отражающие, возможно, прецессионные движения в двойных системах, так и короткопериодические составляющие, которые были интерпретированы как орбитальные движения компаньонов центральных сверхмассивных черных дыр.

3. Обнаружены некоторые признаки того, что наиболее яркие представители АЯГ, наблюдаемые как нестационарные источники в широком диапазоне длин волн, являются двойными системами из сверхмассивных черных дыр, находящихся на стадии эволюции, близкой к слиянию.

4. Отношение масс центральной черной дыры и компаньона во всех трех случаях составляет менее 10. Это приводит к тому, что центральная черная дыра испытывает сильное гравитационное воздействие со стороны компаньона. Скорости перемещения центрального тела становятся значительными (порядка 1000 км/с), что требует учета при вычислении темпа аккреции на центральное тело.

5. Радиусы орбит компаньонов заключены в узких пределах (4—6) 10^{16} см, что связано с сильной зависимостью масс двойных систем от размеров орбиты и потерь энергии на гравитационное излучение.

6. Высокая температура окружающего газа при высокой его плотности 10^9 — 10^{10} см⁻³ в сочетании с магнитными полями и ударными волнами, распространяющимися по аккреционному диску, создают условия для мощного энерговыделения в направленных джетах.

1. *Витязев В. В.* Анализ неравномерных временных рядов: Учеб. пособие. — Санкт-Петербург: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001.—68 с.
2. *Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. и др.* Переменность излучения блазара 3С 454.3 за период 40 лет // *Астрон. журн.*—2007.—**84**, № 6.—С. 503—513.
3. *Вольвач А. Е., Ларионов М. Г., Аллер Х. Д., Аллер М.Ф.* Переменность потока излучения блазара 1633+382 в радиодиапазоне // *Радиофизика и радиоастрономия.*—2005.—**10**, № 4.—С. 377—385.
4. *Вольвач А. Е., Вольвач Л. Н., Ларионов М. Г. и др.* Корреляция развития вспышечного явления в блазаре 3С454.3 в радио- и оптическом диапазонах // *Астрон. журн.*—2008.—**85**, № 9.—С. 1—9.
5. *Вольвач А. Е., Кардашев Н. С., Ларионов М. Г. и др.* Исследование статистических и спектральных характеристик радиисточников каталога «Радиоастрон» в мм-диапазоне длин волн // *Кинематика и физика небес. тел.*—2007.—**23**, № 3.—С. 174—185.
6. *Вольвач А. Е., Пушкарев А. Б., Ларионов М. Г. и др.* Вариации интегральных потоков и структуры радиисточника 3С120 // *Астрофизика.*—2007.—**50**.—С. 325—334.
7. *Ефанов В. А., Моисеев И. Г., Нестеров Н. С. и др.* Наблюдения радиисточников на РТ-22 КАО и РТ-14 РХУТ в мм-диапазоне волн // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—1981.—**64**.—С. 103—108.
8. *Ефанов В. А., Моисеев И. Г., Нестеров Н. С.* Обзор внегалактических радиисточников на длине волны 1.35 см // *Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.*—

- 1979.—**60**.—С. 3—13.
9. *Моисеев И. Г., Нестеров Н. С.* Калибровочные радиосточники в миллиметровом диапазоне волн // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1985.—**73**.—С. 154—159.
 10. *Нестеров Н. С., Вольвач А. Е., Стрелка И. Д.* Наблюдения переменных внегалактических радиосточников на частоте 36 ГГц // Письма в Астрон. журн.—2000.—**26**, № 4.—С. 249—252.
 11. *Струков И. А., Скулачев Д. П.* // Итоги науки и техники / ВИНТИ. Астрономия.—1986.—**31**.—С. 336.
 12. *Шаховской Н. М., Ефимов Ю. С.* «Астрофизика на рубеже веков» // Труды Всероссийской конф., Пушинская радиоастрономическая обсерватория, 17—22 мая 1999 г. / Под ред. Н. С. Кардашева, Р. Д. Дагкесаманского, Ю. А. Ковалева. — М.: Янус-К, 2001.—С. 435—442.
 13. *Aller H. D., Aller M. F., Hughes P. A.* Polarized radio outbursts in BL Lacertae. I. Polarized emission from a compact jet. II. The flux and polarization of a piston-driven shock // *Astrophys. J.* —1985.—**298**.—P. 296—315.
 14. *Aller M. F., Aller H. D., Hughes P. A., Latimer G. E.* Variability of blazars // Eds E. Valtaoja, M. Valtonen. — Cambridge: Univ. Press, 1992.—P. 126.
 15. *Begelman M. C., Blandford R. D., Rees M. J.* Massive black hole binaries in active galactic nuclei // *Nature*.—1980.—**287**.—P. 307—309.
 16. *Camenzind M., Krockenberger M.* The lighthouse effect of relativistic jets in blazars — A geometric origin of intraday variability // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**255**.—P. 59—62.
 17. *Ciaramella A., Bongardo C., Aller H. D., et al.* A multifrequency analysis of radio variability of blazars // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**419**.—P. 485—500.
 18. *Efimov Yu. S., Shakhovskoy N. M., Takalo L. O., Sillanpaa A.* Photopolarimetric monitoring of OJ 287 in 1994—1997 // *Astron. and Astrophys.*—2002.—**381**.—P. 408—419.
 19. *Kaastra J. S., Roos N.* Massive binary black-holes and wiggling jets // *Astron. and Astrophys.*—1992.—**254**.—P. 96—98.
 20. *Lobanov A. P., Roland J.* A supermassive binary black hole in the quasar 3C 345 // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**431**.—P. 831—846.
 21. *Marscher A. P., Gear W. K.* Models for high-frequency radio outbursts in extragalactic sources, with application to the early 1983 millimeter-to-infrared flare of 3C 273 // *Astrophys. J.*—1985.—**298**.—P. 114—127.
 22. *Pietila H., Takalo L. O., Tosti G., et al.* OJ 287 and the predicted fade of 1998 // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**345**.—P. 760—768.
 23. *Rieger F. M.* On the geometrical origin of periodicity in blazar-type sources // *Astrophys. J.*—2004.—**615**.—P. 5—8.
 24. *Romero G. E., Fan J., Nuza S. E., et al.* The binary black hole scenario for the BL Lacertae object AO-0235+16 // *Chinese J. Astron. and Astrophys.*—2003.—**3**, N 6.—P. 513—525.
 25. *Salonen E., Terasranta H., Urpo S., et al.* Five years monitoring of extragalactic radio sources. Observations at 12, 22 and 37 GHz // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1987.—**70**.—P. 409—435.
 26. *Sillanpaa A., Haarala S., Valtonen M. J., et al.* OJ 287 — Binary pair of supermassive black holes // *Astrophys. J.*—1988.—**325**.—P. 628—634.
 27. *Sillanpaa A., Takalo L. O., Pursimo T., et al.* Confirmation of the 12-year optical outburst in blazar OJ 287 // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**305**.—P. 17—20.

28. *Shukla H., Stoner R. E.* Correlation of ultraviolet and radio flux in three active galactic nuclei // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1996.—**106**.—P. 41—49.
29. *Tarasranta H., Tornikoski M., Mujunen A., et al.* Fifteen years monitoring of extragalactic radio sources at 22, 37 and 87 GHz // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1998.—**132**.—P. 305—331.
30. *Tarasranta H., Tornikoski M., Valtaoja E., et al.* Ten years monitoring of extragalactic radio sources at 22, 37 and 87 GHz // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1992.—**94**.—P. 121—173.
31. *Volvach A., Larionov M., Ryabov M., et al.* Flux density evolution of the sources 3C273, 3C279 and 3C454.3 at the frequencies 102 MHz–36.8 GHz // *Astron. and Astrophys. Transactions.*—2006.—**25**, N 5.—P. 385—391.
32. *Volvach A. E., Pushkarev A. B., Aller H. D., Aller M. F.* 3C120: total flux variations and evolution of the very-long-baseline interferometry structure // *Astron. and Astrophys. Transactions.*—2006.—**25**.—P. 405—410.
33. *Volvach A., Ryabov M.* Evolutionary features in variations of fluxes of selected extragalactic radiosources at 102 MHz, 22 GHz and 36 GHz // *Astron. and Astrophys. Transactions.*—2005.—**34**, N 5.—P. 403—408.
34. *Zdziarski A. A., Grandi P.* The broadband spectrum of 3C 120 observed by BeppoSAX // *Astrophys. J.*—2001.—**551**.—P. 186—196.

Поступила в редакцию 18.09.08