

ДИНАМИКА ДВОЙНЫХ КОМПАКТНЫХ МАССИВНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЯДРАХ ГАЛАКТИК ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ШАРОВЫМИ СКОПЛЕНИЯМИ

А.С.КОНДРАТЬЕВ

Поступила 16 апреля 2010

Принята к печати 26 мая 2010

Изучается миграция двойных систем компактных массивных объектов в ядрах галактик за счет сближений с шаровыми скоплениями галактики. Движение двойной происходит в поле фиксированного потенциала балджа галактики. При этом используется эмпирическое соотношение между массами двойной и балджа $M_b = 1000(M_1 + M_2)$, где M_b - масса балджа, M_1 и M_2 - массы компонентов двойной. Найдены зависимости амплитуды дрейфа компонентов двойной от параметров начальной орбиты двойной, размера балджа, а также от начальной скорости и массы шарового скопления. Показано, что амплитуда дрейфа в большей степени зависит от параметров скопления, величина возмущения орбиты двойной слабо зависит от размера балджа, эксцентриситета и большой полуоси орбиты двойной. Амплитуда центра масс также в среднем уменьшается при возрастании разницы масс компонентов.

*Ключевые слова: ядра галактик:центральные компактные объекты:
двойные системы:динамика*

1. *Введение.* В последние годы в ядрах галактик обнаружено несколько сотен компактных массивных объектов (КМО) и выполнены их статистические исследования. Массы КМО коррелируют со светимостями и массами балджей соответствующих галактик (см., например, Феррарез и др. [1], обзор Черепашука [2]). Эти объекты могут испытывать колебания вблизи центра галактики за счет различных эффектов. Обзор некоторых из этих эффектов дан в нашей предыдущей работе (Кондратьев и Орлов, [3]). Более того, эти колебания могут приводить к изменению активности ядра, в частности, к асимметрии джетов (см., например, Бегельман и др. [4], Вольвач [5]).

В некоторых работах (см., например, Мерритт и др. [6]) рассматривалась миграция сверхмассивной черной дыры за счет взаимодействия ее со звездами окружающего плотного звездного скопления. В этих работах оцениваются амплитуды и скорости дрейфа черной дыры в зависимости от ее массы и массы скопления.

В наших работах [3 и 7] рассматривался другой механизм миграции компактного объекта в ядре - его движение в результате взаимодействия

с шаровыми скоплениями, сближающимися с ядром галактики. Мы рассмотрели ряд примеров моделей галактик, в частности, модель нашей Галактики. Было показано, что амплитуда дрейфа КМО может достигать нескольких сотен парсек и сильно зависит от массы и размера балджа, а также от параметров скопления.

В ядрах галактик, кроме одиночных КМО, могут встречаться и двойные (например, в результате слияния галактик, содержащих КМО). Бегельман и др. [4] показали, что эволюцию двойной можно разделить на 3 этапа: 1) галактическое слияние, когда КМО погружаются внутрь новой галактики за счет динамического трения, где и формируют двойную; 2) двойная продолжает разрушаться за счет эффектов "гравитационной рогатки", когда звезды, орбиты которых пересекают орбиту двойной, выталкиваются со скоростями, сравнимыми с орбитальной скоростью двойной, в то время, как энергия связи двойной увеличивается; 3) и, наконец, слияние двойной.

В работе Милосавлевича и Мерритта [8] изучается процесс перехода из второго этапа в третий и производятся оценки амплитуды дрейфа компонент в результате столкновений со звездами в центре галактики.

В данной работе изучается движение двойной системы компактных массивных объектов при взаимодействии с шаровыми скоплениями. При этом мы учитываем известное эмпирическое соотношение между массами КМО и балджа галактики (см. Черепашук [2], Шанкар [9]):

$$M_b = 10^3(M_1 + M_2), \quad (1)$$

где M_b , M_1 и M_2 соответственно массы балджа и компонентов двойной.

Цель исследования - выявление зависимостей амплитуды дрейфа компонент двойной и ее центра масс от различных параметров системы, таких как массы компонентов, размер балджа, большая полуось орбиты и ее эксцентриситет, а также начальная скорость и масса шарового скопления. Мы приводим количественные и качественные оценки амплитуды возмущенного движения (под влиянием скопления) по сравнению с невозмущенным (когда учитывается только потенциал балджа).

2. Модели балджей галактик и методика расчетов. Поскольку движение КМО происходит вблизи центра галактики, мы учитываем только влияние потенциала балджа и пренебрегаем влиянием других подсистем (в частности, диска и гало).

Введем систему координат с началом в центре балджа. Потенциал балджа соответствует модели Пламмера [10]:

$$\Phi(r) = \frac{GM_b}{(r^2 + b^2)^{1/2}}, \quad (2)$$

где G - постоянная тяготения, b - эффективный радиус балджа, M_b - масса балджа, r - расстояние до центра балджа. Балдж предполагается

сферически-симметричным. В начальный момент времени компоненты двойной помещаются на ось X так, чтобы центр масс системы находился в начале координат (см. рис.1). Начальные скорости КМО вычисляются, исходя из координат компонентов и эксцентриситетов их орбит. Векторы скорости направлены в противоположные стороны вдоль оси OY .

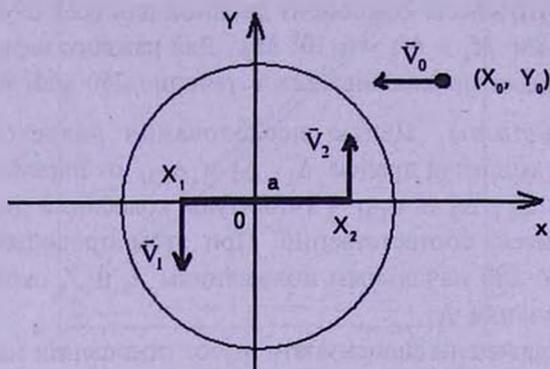


Рис.1. Задание начальных условий движения компонент двойной.

Рассмотрим сближение двойного КМО с массами компонентов M_1 и M_2 и шарового скопления с массой M_c . Вначале компоненты двойной расположены в апоцентре относительной орбиты на оси OX в точках с координатами $(X_1, 0, 0)$ и $(X_2, 0, 0)$, шаровое скопление находится в точке с координатами $(X_0, Y_0, 0)$ и движется вдоль оси OX со скоростью V_0 в направлении центра галактики.

Расчеты движения компонентов системы производятся следующим образом. Учитывается взаимодействие обоих КМО и шарового скопления, а также влияние на них балджа. Поскольку балдж имеет массу на несколько порядков больше, чем КМО и шаровое скопление, то их влиянием на движение балджа мы пренебрегаем.

Начальные параметры сближения приняты равными:

$X_0 \in (0.65; 1.3)$ кпк с шагом 0.05 кпк, $Y_0 \in (0.05; 0.1)$ кпк с шагом 0.005 кпк, $V_0 = 200$ км/с, $M_c = 10^6 M_\odot$, $b = 1$ кпк, $M_1 = M_2 = 5 \cdot 10^6 M_\odot$, эксцентриситет орбиты двойной $e = 0.7$, величина большой полуоси орбиты двойной $a = 50$ пк, такая, что $|X_2 - X_1| = a(1 + e)$. Скорости компонентов двойной вычисляются через элементы орбиты.

При этом для изучения движения системы поочередно были рассмотрены в отдельности вариации каждого из 6 следующих параметров (при этом остальные 5 параметров фиксировались, и их значения принимались равными указанным выше):

1. $M_2/M_1 = 1; 0.1; 0.01; 0.001$, где $M_1 = 10^7 M_\odot$;
2. $a = (5, 10, 50, 100, 150, 200)$ пк;

3. $e \in (0.0 + 0.9)$ с шагом 0.1;
4. $b = (0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 2.0)$ кпк;
5. $V_0 = (50, 100, 150, 200, 300, 400)$ км/с;
6. $M_{cl} = 10^5 M_\odot, 3 \cdot 10^5 M_\odot, 10^6 M_\odot, 3 \cdot 10^6 M_\odot, 10^7 M_\odot, 3 \cdot 10^7 M_\odot$.

Масса двойного КМО бралась каждый раз в соответствии с формулой (1). Заметим, что массы компонент двойной для всех случаев, кроме п.1, брались равными $M_1 = M_2 = 5 \cdot 10^6 M_\odot$. Для каждого варианта начальных условий эволюция прослеживалась в течение 250 млн лет.

3. Результаты. Целью исследования является определение зависимостей амплитуд дрейфа Δ_1 , Δ_2 и Δ_{CM} от параметров начального движения, где Δ_1 , Δ_2 и Δ_{CM} - амплитуды колебаний двух компонентов и их центра масс, соответственно. При этом проводилось усреднение каждого Δ_i по 280 начальным положениям X_0 и Y_0 скопления: бралось медианное значение Δ_i .

На рис.2 приведены зависимости Δ_i от отношения масс компонент двойной. Как видно из рисунка, с ростом отношения масс компонент амплитуда дрейфа меньшего компонента Δ_2 растет, а Δ_1 , наоборот, убывает. Центр масс системы менее стабилен при равных массах компонент. Это вполне объяснимо: при уменьшении массы второго компонента центр масс все больше смещается в сторону первого компонента и сильнее удерживается его массой, а также массой балджа.

На рис.3 представлены зависимости Δ_i от параметра a . Как и следовало

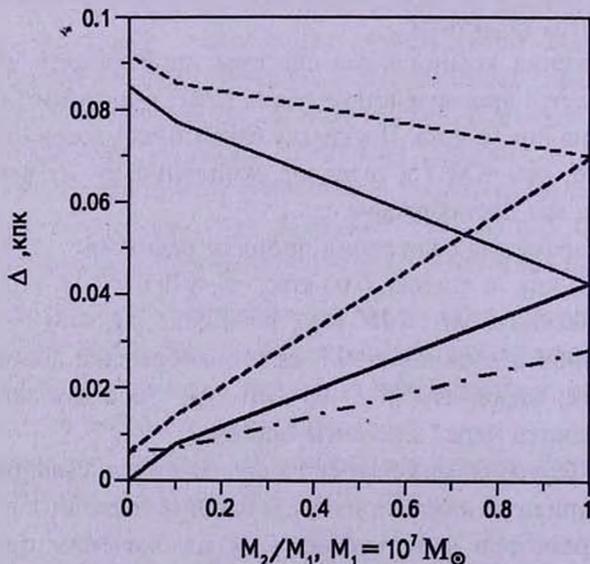


Рис.2. Зависимости амплитуды дрейфа двойной системы от отношения масс компонент. Толстая и тонкая штриховые линии принадлежат возмущенному движению компонентов с массами, соответственно M_1 и M_2 , толстая и тонкая сплошные — их невозмущенному движению, штрих-пунктирная — возмущенному движению их центра масс.

ожидать, амплитуды колебаний компонент растут от тесных двойных к широким. Но при этом остаются почти постоянными их относительные

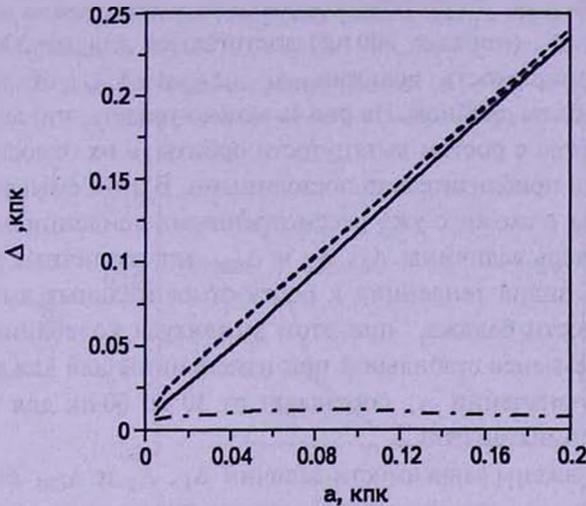


Рис.3. Зависимости Δ_1, Δ_2 и Δ_{CM} от большой полуоси орбиты двойной. Штриховые линии соответствуют возмущенному движению компонент двойной (они практически совпадают), сплошная линия соответствует их невозмущенному движению, штрих-пунктирная - возмущенному движению их центра масс.

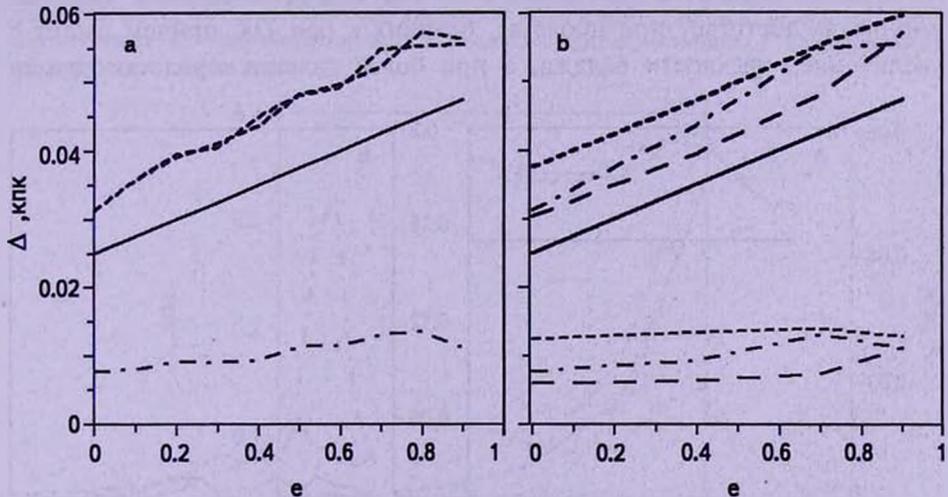


Рис.4а. Зависимости Δ_1, Δ_2 и Δ_{CM} от эксцентриситета орбиты двойной. Штриховые линии соответствуют возмущенному движению компонент двойной, сплошная линия соответствует их невозмущенному движению, штрих-пунктирная - возмущенному движению центра масс двойной.

Рис.4б. Зависимости Δ_1, Δ_2 и Δ_{CM} от эксцентриситета при различных размерах балджа на примере одного из компонент двойной. Жирная частая штриховая линия соответствует возмущенному движению компонента при $b = 2.0$ кпк, жирная штрих-пунктирная - при $b = 1.0$, жирная редкая штриховая - при $b = 0.3$. Сплошная линия соответствует невозмущенному движению. Тонкие линии в нижней части рисунка соответствуют возмущенному движению центра масс двойной при соответствующих b .

амплитуды $\Delta_{lr} = \Delta_l - \Delta_{l0}$. Центр масс двойной слабо смещается, и его смещение почти не зависит от начального размера орбиты. В связи с этим можно сделать вывод об отсутствии корреляции между a и Δ_l . Максимальные значения Δ_l (порядка 200 пк) достигаются для $a = 200$ пк.

Рассмотрим зависимость величин Δ_1 , Δ_2 и Δ_{CM} от значения эксцентриситета орбиты двойной. На рис.4а можно увидеть, что амплитуды дрейфа увеличиваются с ростом вытянутости орбиты, а их относительные амплитуды остаются приблизительно постоянными. В этом смысле зависимости от параметра e схожи с уже рассмотренными тенденциями для a .

Рассмотрим теперь величины Δ_1 , Δ_2 и Δ_{CM} для различных размеров балджа. На рис.4б видна тенденция к росту относительных амплитуд с увеличением рыхлости балджа, при этом амплитуда колебаний центра масс остается более-менее стабильной при изменении e для каждого типа балджа. Диапазон значений Δ_l составляет от 30 до 60 пк для орбит от круговой до сильно вытянутой.

На рис.5а изображены зависимости величин Δ_1 , Δ_2 и Δ_{CM} от размера балджа. Можно заметить, что, несмотря на общую тенденцию к увеличению амплитуд с ростом рыхлости балджа, значения Δ_1 , Δ_2 и Δ_{CM} для всего диапазона размеров балджа меняются не более чем на 10 пк.

На рис.5б приведены зависимости амплитуды дрейфа компонент от прицельного параметра Y_0 на примере Δ_1 . Как видно, наибольших значений амплитуда достигает при пролетах, близких к оси OX , причем растет с увеличением рыхлости балджа, а при более далеких пролетах размер

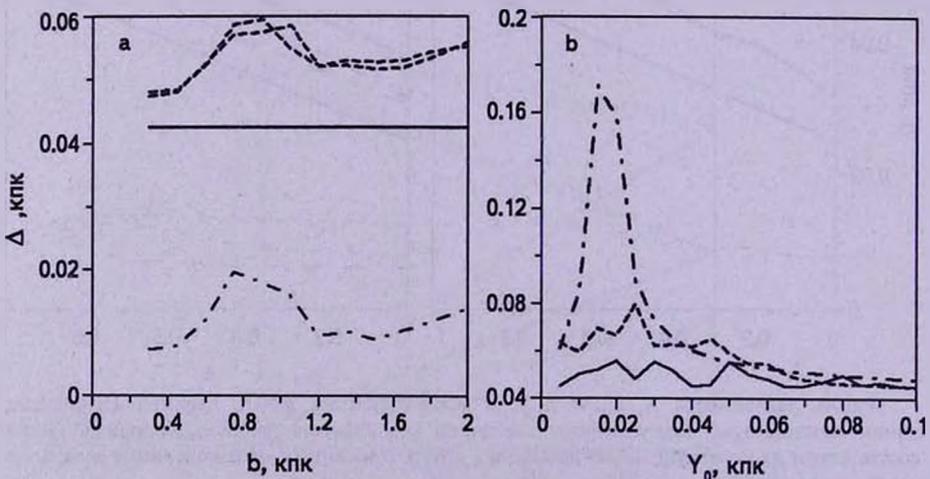


Рис.5а. Зависимость Δ_1 , Δ_2 и Δ_{CM} от размера балджа. Штриховые линии соответствуют возмущенному движению компонент двойной, сплошная линия соответствует их невозмущенному движению, штрих-пунктирная - возмущенному движению их центра масс.

Рис.5б. Зависимость Δ_1 от прицельного параметра Y_0 при различных значениях размера балджа. Сплошная линия соответствует $b = 0.3$ кпк, штриховая - 0.9 кпк, штрих-пунктирная - 2.0 кпк.

балджа практически не влияет на Δ_1 . Поэтому медианные значения для всего диапазона размеров балджа примерно одинаковы, чем и объясняется не совсем явная тенденция к росту величин Δ_1 , Δ_2 и Δ_{CM} с увеличением размера балджа.

На рис.6 и 7 приведены зависимости Δ_1 , Δ_2 и Δ_{CM} от параметров

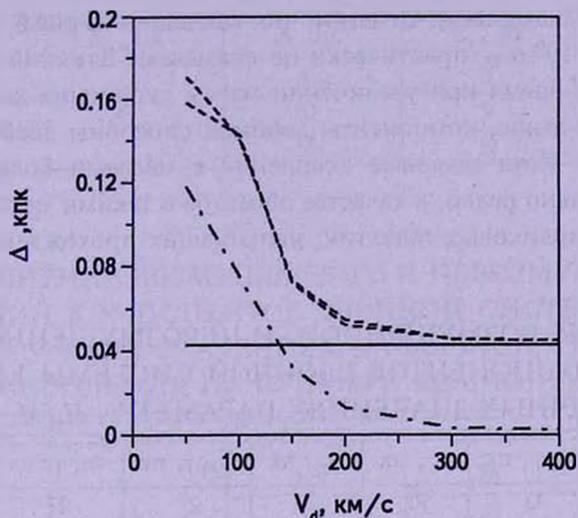


Рис.6. Зависимость Δ_1, Δ_2 и Δ_{CM} от начальной скорости скопления. Штриховые линии соответствуют возмущенному движению компонентов двойной, сплошная линия соответствует их невозмущенному движению, штрих-пунктирная - возмущенному движению их центра масс.

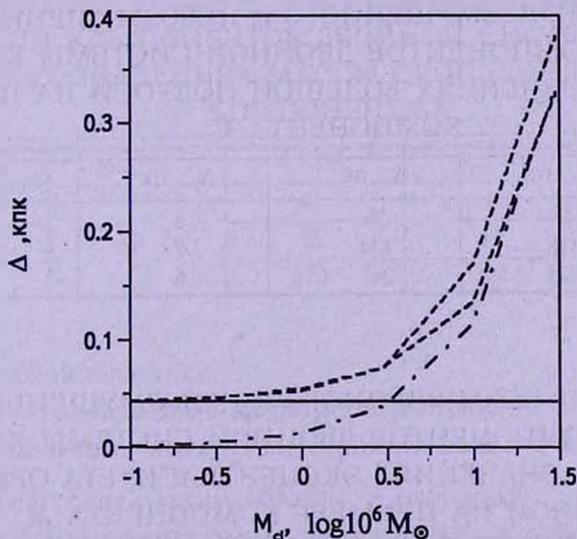


Рис.7. Зависимость Δ_1, Δ_2 и Δ_{CM} от массы скопления. Штриховые линии соответствуют возмущенному движению компонентов двойной, сплошная линия соответствует их невозмущенному движению, штрих-пунктирная - возмущенному движению их центра масс.

скопления: его начальной скорости V_0 и массы M_c . Вполне очевидно, что наибольшие значения Δ_i достигаются для самых медленных скоплений. Поскольку средняя скорость движения скопления возле центра галактики составляет порядка 70 км/с (к примеру, в нашей Галактике), то характерные значения Δ_i составляют около 150 пк (при соответствии прочих параметров выбранным выше значениям). Отметим, что, как видно из рис.6, скопления с массами менее $10^6 M_\odot$ практически не оказывают влияния на орбиту двойной. В то же время при увеличении массы скопления до значения массы двойной и выше, компоненты двойной способны дрейфовать на 200 пк и дальше. Хотя шаровые скопления с массами более $10^7 M_\odot$ встречаются довольно редко, в качестве объектов с такими массами могут выступать ядра карликовых галактик, испытавших прохождение вблизи

Таблица 1

СРАВНЕНИЕ ВОЗМУЩЕННОГО И НЕВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЙ КОМПОНЕНТОВ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ КМО ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ПАРАМЕТРА M_2/M_1

M_2/M_1	$\Delta_{0(1)}$, пк	$\Delta_{0(2)}$, пк	Δ_1 , пк	Δ_2 , пк	$\Delta_r(1)$, пк	$\Delta_r(2)$, пк	Δ_{CMr} , пк
1	43	43	70	70	27	27	28
0.1	8	77	14	86	6	9	7
0.01	0.8	84	7	91	6.2	7	6

Таблица 2

СРАВНЕНИЕ ВОЗМУЩЕННОГО И НЕВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЙ КОМПОНЕНТОВ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ КМО ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ БОЛЬШОЙ ПОЛУОСИ НА ПРИМЕРЕ КОМПОНЕНТА M_1

A, пк	Δ_0 , пк	Δ , пк	Δ_r , пк	Δ_{CMr} , пк
10	17	25	8	7
100	118	124	7	12
200	235	241	6	7

Таблица 3

СРАВНЕНИЕ ВОЗМУЩЕННОГО И НЕВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЙ КОМПОНЕНТОВ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ КМО ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ОРБИТЫ ДВОЙНОЙ НА ПРИМЕРЕ КОМПОНЕНТА M_1

e	Δ_0 , пк	Δ , пк	Δ_r , пк	Δ_{CMr} , пк
0	25	30	5	7
0.4	35	39	4	6
0.9	48	57	9	11

Таблица 4

СРАВНЕНИЕ ВОЗМУЩЕННОГО И НЕВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЙ КОМПОНЕНТОВ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ КМО ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ РАЗМЕРА БАЛДЖА НА ПРИМЕРЕ КОМПОНЕНТА M_1

b , пк	Δ_0 , пк	Δ , пк	Δ_r , пк	Δ_{CMr} , пк
0.3	43	48	5	7
1.2		52	9	10
2.0		55	12	14

Таблица 5

СРАВНЕНИЕ ВОЗМУЩЕННОГО И НЕВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЙ КОМПОНЕНТОВ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ КМО ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ НАЧАЛЬНОЙ СКОРОСТИ СКОПЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ КОМПОНЕНТА M_1

V_{sp} км/с	Δ_0 , пк	Δ , пк	Δ_r , пк	Δ_{CMr} , пк
50	43	129	86	60
150		88	45	32
300		62	19	3

Таблица 6

СРАВНЕНИЕ ВОЗМУЩЕННОГО И НЕВОЗМУЩЕННОГО ДВИЖЕНИЙ КОМПОНЕНТОВ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ КМО ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ МАССЫ СКОПЛЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ КОМПОНЕНТА M_1

M_{sp} , M_\odot	Δ_0 , пк	Δ , пк	Δ_r , пк	Δ_{CMr} , пк
10^5	43	44	1	0.9
10^6		55	12	13
10^7		170	127	115

ядра гигантской галактики.

Основные количественные результаты отражены в табл.1-6. Данные, приведенные в ней, подтверждают описанные выше тенденции.

4. *Заключение.* Таким образом, в настоящей работе исследованы движения двойных центральных компактных массивных объектов в поле балджей галактик под воздействием шаровых скоплений, проходящих вблизи центров галактик.

Выявлены зависимости амплитуды дрейфа компонентов двойной

системы от параметров их орбиты, размера балджа, начальной скорости и массы скопления.

Показано, что наибольшее влияние на возмущение орбиты двойной оказывает масса скопления и его начальная скорость. Для самых медленных скоплений амплитуда дрейфа компонент двойной может достигать 150 пк, а при массах скопления, сравнимых с массой двойной, эта величина может принимать значения до 300 пк.

Исследование показало также, что изменение эксцентриситета, большой полуоси орбиты и размеров балджа не приводит к значительному увеличению относительной амплитуды дрейфа компонентов, оставляя его равным примерно $5 + 15$ пк, а возмущение центра масс двойной системы остается стабильным внутри всего диапазона перечисленных параметров. Кроме того, установлено, что наибольшего значения амплитуда дрейфа центра масс двойной системы достигает при равных массах компонент.

Заметим, что используемая нами модель точечной массы для шарового скопления не вполне адекватно отражает реальную ситуацию, поскольку скопление должно разрушаться за счет приливного взаимодействия с балджем галактики и КМО. Однако, как было показано нами ранее (см. Кондратьев и Орлов [3]), величина приливного радиуса, как правило, существенно больше радиуса скопления, и скопление можно приближенно считать сферически-симметричным. Следовательно, эффект приливного разрушения играет несущественную роль.

Автор благодарит В.В.Орлова за обсуждение результатов и Президентскую программу поддержки Ведущих научных школ (грант НШ-3920.2010.2) за финансовую поддержку.

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, e-mail: semenych@inbox.ru

THE DYNAMICS OF BINARY COMPACT MASSIVE OBJECTS AMPLITUDE IN GALACTIC NUCLEI IN INTERACTIONS WITH GLOBULAR CLUSTERS

A.S.KONDRATIEV

The migration of binary central massive objects in galactic nuclei through their encounters with galactic globular clusters is studied. The black holes move in the field of the galactic bulge with a fixed potential. At that empirical relation

between CMO and bulge masses is used: $M_b = 1000(M_1 + M_2)$, where M_b is mass of bulge, M_1 and M_2 are masses of components of binary. The dependences of the binary components drift amplitude on initial orbit parameters, bulge mass and size, globular cluster initial velocity and mass have been found. It was demonstrated that drift amplitude mostly depends on cluster parameters, drift value weakly depends on bulge size, eccentricity and size (semi-major axis) of binary orbit. Drift amplitude of center-of-mass on average decreases as the difference between component masses grows.

Key words: *galactic nuclei:centeral compact objects:binaries:dynamics*

ЛИТЕРАТУРА

1. *L.Ferrarese et al.*, *Astrophys. J.*, **644**, L21, 2006.
2. *А.М.Черепашук*, *Астрономия: традиции, настоящее, будущее*, СПб: СПбГУ, 2007, с.198.
3. *А.С.Кондратьев, В.В.Орлов*, *Письма в Астрон. ж.*, **34**, 593, 2008.
4. *M.C.Begelman, R.D.Blandford, M.J.Rees*, *Reviews of Modern Physics*, **56**, 255, 1984.
5. *А.Е.Вольвач*, *Кинематика и Физика небесных тел*, **25**, № 5, с.260-268, 2008.
6. *D.Merritt, P.Berczik, F.Laun*, *Astrophys. J.*, **133**, 553, 2007.
7. *А.С.Кондратьев*, *Астрофизика*, **53**, 95, 2010.
8. *M.Milosavljevic, D.Merritt*, *Astrophys. J.*, **596**, 860, 2003.
9. *F.Shankar*, arXiv:0907.5213v1, 2009.
10. *H.C.Plummer*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **71**, 460, 1911.