

О КОЛЕБАНИЯХ ФАЗОВОЙ ПЛОТНОСТИ В ДВУХ МОДЕЛЯХ РАССЕЯННЫХ ЗВЁЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

On Phase Density Fluctuations in Two Open Cluster Models

Abstract. Fourier transformation amplitude and phase components of the mutual correlation functions between phase density fluctuations near the z -axis passing through the center of an open cluster perpendicular to the Galactic plane and near surfaces of coaxial cylinders are used to obtain and analyze the frequency spectra of phase density fluctuations in two open cluster models; frequencies of the fluctuations are determined.

Результаты исследований динамики гравитирующих систем и, в частности, рассеянных звёздных скоплений (РЗС), выполненных различными авторами, указывают на возможность возникновения колебаний в таких системах. В работе (Danilov V. M. ARep, 2010, **54**, 514) исследовались колебания фазовой плотности (ФП) в нескольких РЗС и в 6 сферических моделях РЗС, имеющих начальную структуру «ядро-гало» с различными значениями параметров: $\xi = R_1/R_2$; $\mu = N_1/N_2$; $\eta = R_2/R_t$, движущихся по круговым орбитам в галактической плоскости на расстоянии 8200 пк от центра в модели потенциала Галактики (Кутузов С.А., Осипков Л.П. АЖ, 1980, **57**, 28). Здесь R_i, N_i – радиусы и числа звёзд в ядрах ($i = 1$) и гало ($i = 2$), R_t – приливный радиус скоплений. Модели пронумерованы в порядке убывания степени нестационарности, мерой которой является относительная амплитуда колебаний вириального коэффициента. В работе (Danilov V. M., Putkov S. I. AstBu, 2013, **68**, 154) впервые получены спектры колебаний ФП и дисперсионные кривые с помощью корреляционного метода анализа, который применяется в физике плазмы для исследования неустойчивых колебаний в плазме (например, Бернар М., Бриффо Ж., Бюссак Ж. и др. Диагностика плазмы. М.: Атомиздат, 1973, вып. 3, с. 449). ВКФ между флуктуациями ФП в центре модели скопления и в точках на окружающих его сферических поверхностях (S -поверхностях) вычислялись по фазовым координатам (ФК) звёзд, полученным в работе (Danilov V.M., Dorogavtseva L.V. ARep, 2008, **52**, 467) при интегрировании задачи N -тел для 6 моделей рассеянных звездных скоплений (РЗС). Достигнутая в этой работе точность ФК звезд позволяет получать надёжные результаты вычисления ВКФ на промежутке $t/\tau_{v.r.} \in [0, 3.0 - 3.9]$ для центральных областей моделей и $t/\tau_{v.r.} \in [0, 3.6 - 5.1]$ на периферии моделей скоплений. В данной работе вычисляется спектральный состав колебаний ФП для моделей 5 ($\xi = 0.45, \mu = 1.50, \eta = 0.8$) и 6 ($\xi = 0.63, \mu = 4.00, \eta = 0.8$), имеющих наиболее протяжённые ядра и наименьшую степень нестационарности среди описанных моделей 1–6 на промежутке времени t от 0 до $3\tau_{v.r.}$. ВКФ между колебаниями ФП вычисляются для 692 пар точек с одинаковыми z -координатами парных точек. Одна из точек пары всегда находится на оси скопления ($r = 0$), а другая – на

цилиндрической поверхности (C -поверхности) радиуса $r_j = j$ пк, ограниченной плоскостями $z = \pm z_{\max}$, ($z_{\max} = 1, 2, 3, 4, 5$ пк). Точки на C -поверхностях имеют координаты $(\rho, \phi, z) = (r_j, \frac{\pi n}{16}, \pm m z_{\max}/10)$, где $n = 0, 1, \dots, 31; m = 0, 1, \dots, 10$ (точки на оси определяются координатами $\rho = 0, z = \pm m \Delta z$). Расчёты ВКФ и их усреднение по узлам проводятся для 10 C -поверхностей радиусами $r_j = j$ пк, $j = 1, 2, \dots, 10$. Алгоритм вычислений ВКФ и Фурье-преобразование ВКФ такой же, как в работе (Danilov V. M., Putkov S. I. *AstBu*, 2013, **68**, 154).

Основные результаты. Частоты колебаний ФП, соответствующие частотам максимумов на спектре мощности, вычисленные при использовании C -поверхностей с разными z_{\max} и S -поверхностей, практически одинаковы, хотя сами амплитуды могут различаться (рис. 1а). Следовательно, для установления спектрального состава колебаний ФП способ выбора точек для вычисления ВКФ между колебаниями ФП не имеет существенного значения. Дисперсионные кривые при использовании различных поверхностей меняются больше, чем спектры частот, из-за наличия фазового сдвига $\Delta\phi = k_\nu r$ между колебаниями ФП в двух точках при использовании C - и S -поверхностей.

Для ряда моментов времени в модели 5 ($t/\tau_{v.r.} = 0.28; 0.64; 2.10$) и в модели 6 ($t/\tau_{v.r.} = 0.35; 0.66; 1.24$) профили плотности $n(r)$ и ФП $f(r)$ имеют локальный минимум при $r = 0$ (рис. 1с). Таким образом, модели скоплений с протяжёнными и массивными ядрами ($\xi \geq 0.45; \mu \geq 1.50$) могут проходить через кратковременные стадии ($\Delta t \leq 0.2\tau_{v.r.}$) с торообразной структурой, которая не образуется в моделях с более компактными ядрами. Возникновение тороидальной структуры плотности в 6-й модели впервые было отмечено в работе (Danilov V.M., Leskov E.V., *ARep*, 2005, **49**, 190).

Амплитуды колебаний ФП в моделях РЗС уменьшаются с увеличением расстояния до оси $r = 0$ скоплений. В 5-й (6-й) модели при $r \in [4, 7]$ пк ($r \in [6, 7]$ пк) колебания ФП близки к периодическим с частотой $\nu \approx 1.5$ ($\nu \approx 1.7$). Здесь и далее величины ν равны числу колебаний ФП за время бурной релаксации $\tau_{v.r.}$ (рис. 1d). Спектры частот для указанных диапазонов расстояний содержат мощный пик на частоте $\nu \approx 1.51(1.77)$. В центральных областях и на периферии скопления колебания ФП становятся менее регулярными. Обнаруженным колебаниям ФП соответствуют комплексно-сопряжённые корни дисперсионного уравнения, что указывает на неустойчивость этих колебаний.

В моделях 5, 6 при $r = 5$ пк средние разности частот $\overline{\Delta\nu}$ между соседними локальными максимумами спектра мощности равны соответственно 0.28 ± 0.01 и 0.29 ± 0.02 (что составляет $1.5\nu_G$, где $\nu_G \approx 0.19$ – частота орбитального обращения) или кратны им, что видно из почти линейной зависимости частоты ν от номера N максимума (рис. 1b). На этом графике бары погрешностей не превышают размеров значков. Наименьшие частоты колебаний ФП в гало для 5-й и 6-й моделей приблизительно равны $2\nu_G$ и $1.5\nu_G$. Поэтому орбитальное обращение моделей скоплений оказывает большое влияние на формирование спектра частот. Спектры колебаний ФП в центральных областях моделей содержат большее количество частот, которые также находятся друг с другом в рациональных отношениях.

Частоты колебаний ФП в интервале значений $r \in [2, 7]$ пк от оси $r = 0$ очень слабо зависят от r . При $r < 2$ пк и при $r > 2$ пк низкочастотные колебания ФП в моделях существенно отличаются по частоте (например, $\nu \simeq 0.25$ против $\nu \simeq 0.36$ в 5-й модели; $\nu \simeq 0.46$ против $\nu \simeq 0.30$ в 6-й модели соответственно). Отмеченным здесь колебаниям в моделях соответствуют бегущие от оси $r = 0$ волны. Частоты волн с $\nu > 1$ на всех $r \leq 7$ пк мало меняются с r .

Заключение. Полученные в данной работе частоты колебаний ФП практически не зависят от способа выбора узловых точек для расчетов ВКФ. Колебания ФП в моделях 5,6 РЗС при $r \in [4 - 6, 7]$ пк содержат хорошо выраженные составляющие с частотами $\nu \approx 1.5$ и $\nu \approx 1.7$ соответственно. Частоты колебаний ФП в каждой из моделей находятся друг с другом в рациональных отношениях. В центральных областях моделей РЗС и при $r > 2$ пк колебания ФП с $\nu < 1$ могут значительно отличаться по частоте. При $r > 2$ пк от оси $r = 0$ частоты волн ФП почти постоянны на разных r .

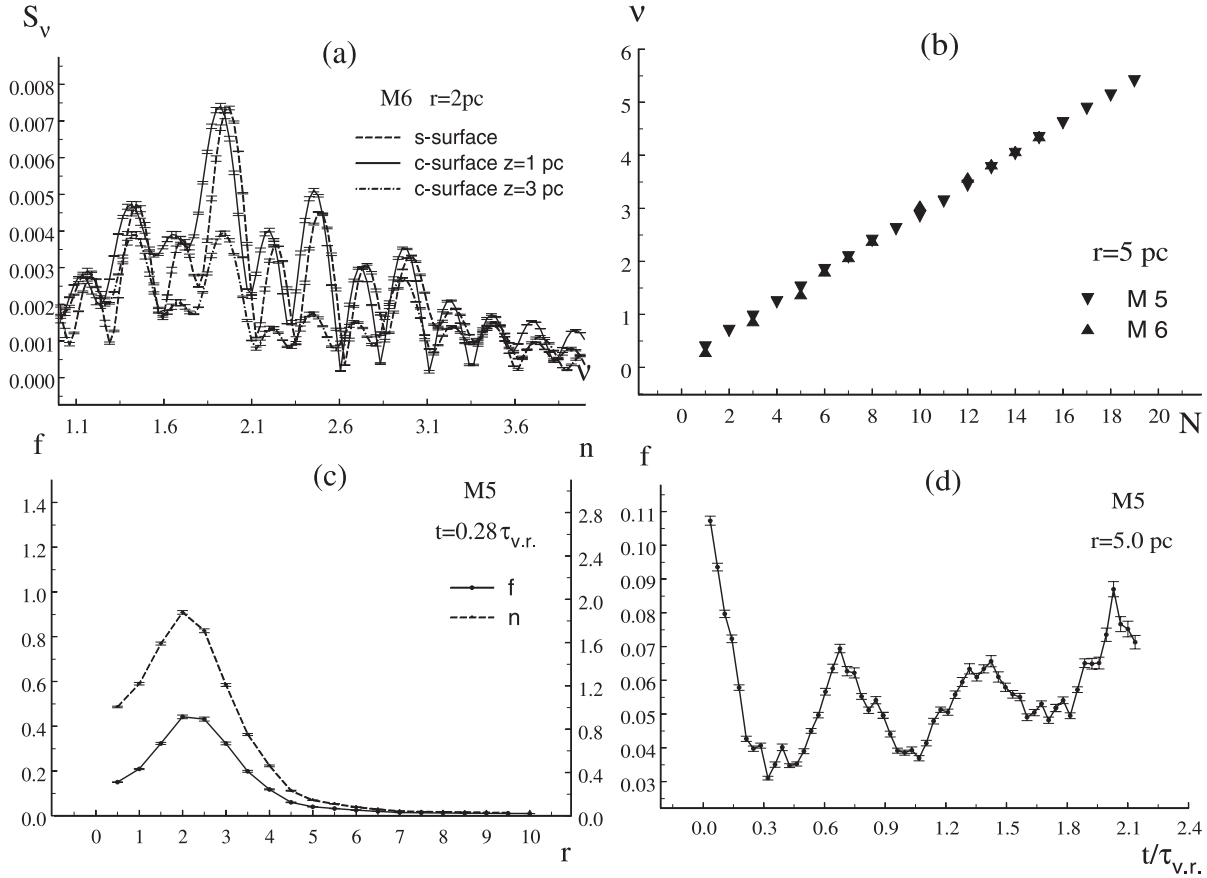


Рис. 1: Графики: (a) спектры частот $S_\nu(\nu)$; (b) частоты максимумов $S_\nu(\nu)$ в зависимости от номеров максимумов; (c) профили плотности $n(r)$ и фазовой плотности $f(r)$; (d) фазовая плотность в зависимости от $t/\tau_{v,r}$ в 5-й и 6-й моделях (M5, M6 соответственно)

Ural Federal University named after
 the first President of Russia B.N. Yeltsin
 Lenin's av., 51, Ekaterinburg, 620000, Russia.
Putkov_S@mail.ru
 Received September 30, 2013

С.И. ПУТКОВ

S.I. Putkov