

ГРАВИТАЦИОННЫЙ УДАР КАК ВОЗМОЖНЫЙ ФАКТОР СТРУКТУРНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКЕ

Г.А.МАЛАСИДЗЕ, Г.Н.САЛУКВАДЗЕ, Р.А.ЧИГЛАДЗЕ

Поступила 8 августа 2013

Помимо изолированных самогравитирующих динамических систем, особо важными следует считать исследование взаимодействующих влияний между различными галактическими образованиями. С учетом того, что степень свободы звездных систем намного больше степени свободы внутренней структуры отдельно взятой звезды, фактор реакции на внешнее воздействие этих систем носит более разнообразный характер. Целью настоящей работы является оценка интервала времени ошутимой структурной эволюции шаровых скоплений звезд в результате возможных гравитационных ударов при их прохождении через плоскость симметрии Галактики. Для 22-х шаровых скоплений с известными массами, радиусами, собственными движениями, а также некоторыми орбитальными элементами, определенными на базе одной трехкомпонентной модели Галактики, было установлено, что лишь очень редко, искомым интервал времени не превосходит возраст Галактики.

Ключевые слова: *Галактика: модель: скопление: гравитация: удар: эволюция: структура*

1. *Введение.* Наряду с изолированными гравитирующими динамическими системами, особо важным явлением следует считать исследование взаимодействующих влияний между различными галактическими образованиями. Известно, что приливные взаимодействия [1] могут обеспечить передачу энергии и момента импульса, которые способны были бы стимулировать изменения внутренней структуры разного рода звездных образований Галактики. Поскольку степень свободы звездных систем намного больше, чем степень свободы внутренней структуры отдельно взятой звезды, поэтому их реакции на внешнее воздействие более многообразнее. Наша основная цель состоит в описании процессов, происходящих при быстром прохождении шарового скопления звезд через плоскость симметрии Галактики. Здесь слова "быстрое" и "медленное" носят относительный характер в том смысле, что когда отношение между орбитальным периодом (или квазипериодом) и характерным временем изменения внешних сил - малая величина, тогда возможно применение адиабатических инвариантов, или в общем случае мультиполных разложений по времени для исследования такого явления, каким является сегрегация орбит.

Если это отношение великое, тогда возможно применение импульсного

приближения. Мгновенное изменение внешнего поля сил вызывает гравитационный удар.

Вполне ожидаемо и возможно, что существование орбит двух типов - общее свойство гравитирующих систем, одна из которых на внешние изменения реагирует гладко, а вторая - внезапно (очень резко). Реакция разных частей системы на воздействие может быть неодинаковой, что осложняет ее поведение. Например, гало шарового скопления звезд более сильно реагирует на резкие возмущения, чем его ядро.

2. *Общая характеристика гравитационного ударного процесса.* При прохождении шарового скопления звезд через плоскость симметрии Галактики, оно будет испытывать гравитационные удары со стороны многих источников, какими являются встречающиеся там шаровые скопления, гигантские газо-пылевые туманности и усредненное гравитационное поле Галактики. Все они вместе образуют вдоль орбиты скопления быстро меняющихся условий. Для примера интересно рассмотреть сжимающийся удар, когда шаровое скопление пересекает плоскость симметрии Галактики [2]. Этот удар считается сжимающимся, поскольку с учетом долгопериодичности орбиты скоплений, плоскость симметрии Галактики как бы молниеносно появляется в центре скопления и также молниеносно исчезает. Суммарные приливные силы сразу заставляют скопление сначала сжиматься, а затем начинают колебаться. Перемещение фаз, затухание Ландау и парная релаксация постепенно перераспределяют энергию этого колебания вдоль скоплений. Когда скопление вновь возвращается в спокойное начальное состояние, т.е. в равновесное состояние, оно будет уже иметь новую структуру, предопределенную количеством энергии, поглощенной ею при ударе. Многократные последовательные удары могут обеспечить скопление достаточным количеством приобретенной энергии, чтобы начался процесс испарения звезд, или включался пусковой механизм термодинамической неустойчивости.

Для оценки количества переданной энергии, предположим, что орбита скоплений пересекает плоскость симметрии Галактики почти вертикально, так, чтобы ускорение зависело только от высоты z , т.е. $d^2z/dt^2 = g(z)$. Вертикальная скорость звезды относительно центра скопления, находящегося в точке с координатной z_c , является дифференциальной скоростью

$$v_z = \frac{dz}{dt} - \frac{dz_c}{dt}. \quad (1)$$

Дифференциальное ускорение этой же звезды, определенное дифференциальной (т.е. приливной) гравитационной силой в приближении первого порядка будет

$$\frac{dv_z}{dt} = g(z) - g(z_c) \approx \left. \frac{dg}{dz} \right|_{z=z_c} \cdot \Delta z, \quad (2)$$

где $\Delta z = z - z_c$. Суть импульсного приближения состоит в том, что звезда-член скопления переместится очень мало за интервал времени, в течение которого скопление пересекает галактическую плоскость. Поэтому $\Delta z \approx \text{const}$. Этот короткий интервал времени пересечения связан приблизительно с вертикальной постоянной скоростью скоплений соотношением

$$dz_c = v_{z_c} dt.$$

Согласно формулы (2), приближенно имеем:

$$\Delta v_z \approx \frac{\Delta z}{v_{z_c}} \int_{-z_m}^{z_m} dg(z_x) = \frac{2g_m}{v_{z_c}} \cdot \Delta z_c, \quad (3)$$

где $g_m = g_{\max}$ - максимальное ускорение над и под галактической плоскостью.

В течение интервала времени пересечения плоскости симметрии Галактики:

$$t_z = \frac{2z_m}{v_{z_c}}, \quad (4)$$

который начинается с высоты z_m , где $g = g_m$ - изменение, вызванное приливным ударом, т.е. $t_z \cdot \Delta v_z$, должно быть существенно мало по сравнению с Δz . Таким образом, условие, для которого приемлемо наше приближение, имеет вид

$$2z_m \Delta v_z \ll v_{z_c} \Delta z, \quad \text{или} \quad \frac{1}{2} v_{z_c} \gg 2z_m \cdot g_m. \quad (5)$$

Такая форма зависимости указывает на то, что работа, выполненная Галактикой на перемещение звезды - члена шарового скопления - должна быть намного меньше начальной энергии звезды.

Величина изменения ударом энергии единичной массы звезды будет:

$$\Delta E = \Delta \left(\frac{1}{2} \vec{v} \cdot \vec{v} \right) = \frac{1}{2} \left[2\vec{v} \cdot \Delta \vec{v} + (\Delta \vec{v})^2 \right], \quad (6)$$

с точностью приближения второй степени. Многократное пересечение галактической плоскости скоплением за всю историю существования терпит много ударов. Хотя, поскольку ни пересечения плоскости симметрии Галактики и ни орбиты звезд-членов скопления не являются строго периодическими, \vec{v} и $\Delta \vec{v}$ в общем случае не коррелируют между собой, поэтому $(\vec{v} \cdot \Delta \vec{v}) = 0$ - при осреднении по многократным пересечениям (или по множеству звезд скопления при однократном пересечении). Такая манипуляция дает

$$\Delta E = \frac{(\Delta \vec{v})^2}{2}.$$

Промежуток времени между ударами составляет примерно половину орбитального периода скопления, что и определяет приблизительную

скорость возрастания энергии

$$\frac{dE}{dt} = \frac{(\Delta \bar{V})^2}{P_c} = \frac{4g_m^2(\Delta z)^2}{P_c \cdot v_{z_c}^2}. \quad (7)$$

Для определения характерного времени τ_s , в течение которого гравитационные удары существенно меняют структуру скопления, используется явная зависимость

$$\tau_s \frac{dE}{dt} = T,$$

Средняя энергия T единичной массы звезды-члена шарового скопления, согласно теореме вириала, равна $0.5\Phi_*$, поэтому получается выражение

$$\tau_s = \frac{\Phi_* P_c v_{z_c}^2}{8(\Delta z)^2 g_m^2}, \quad (8)$$

где $\Phi_* = \Phi(r_{max})$ - граничное значение потенциала скоплений с радиусом $r_* = r_{max}$.

Здесь интересно было бы рассмотреть широко апробированные сферические модели с выражением гравитационного потенциала Кузмина-Маласидзе [3]:

$$\Phi(r) = \Phi_0(\beta+1)(\beta+W)^{-1} + C, \quad (9)$$

где

$$W = \sqrt{1 + (\beta+1)(\beta+3) \frac{r^2}{r_0^2}}. \quad (10)$$

Очевидно, что при $r=0$, $\Phi_0 = \Phi(0)$ - значение потенциала в центре скопления, r_0 параметр, имеющий размерность длины, а β является структурным параметром потенциала, C - произвольная аддитивная постоянная.

Для закона изменения плотности массы было найдено, что

$$\rho(r) = \frac{(\beta+1)^2(\beta+3)\Phi_0}{4\pi G r_0^2} \frac{2\beta W^2 + 3W + \beta}{W^3(\beta+W)^3}, \quad (11)$$

где G - универсальная постоянная тяготения.

Для полной модельной массы, соответственно, имеем выражение

$$M_* = M(r_*) = 4\pi \int_0^{r_*} r^2 \rho(r) dr = \frac{\sqrt{\beta+1} r_0 \Phi_0 (W_*^2 - 1)^{3/2}}{\sqrt{\beta+3} G W_* (\beta+W_*)^2}. \quad (12)$$

На границе модели, т.е. при $W_* = W(r_*)$ выполнено условие

$$2\beta W_*^2 + 3W_* + \beta = 0, \quad (13)$$

согласно которого находим, что

$$W_0 = -\frac{3 + \sqrt{9 - 8\beta^2}}{4\beta} \quad (14)$$

и интервалом изменения параметра β будет

$$-0.75\sqrt{2} \leq \beta < 0. \quad (15)$$

Произвольная постоянная C определяется выражением

$$C = -\Phi_0(\beta+1) \frac{1+\beta W_0}{W_0(\beta+W_0)^2}, \quad (16)$$

тогда как для параметров r_0 и Φ_0 , соответственно, имеем:

$$r_0 = \sqrt{\frac{1(\beta+1)(\beta+3)}{W_0^2-1}}, \quad (17)$$

$$\Phi_0 = \frac{GM_* W_0 (\beta + W_0)^2}{r_0 |\beta+1| (W_0^2-1)}. \quad (18)$$

Формулу (8) можно записать так

Таблица 1

НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ О ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЯХ

№	NGC	$\log M_* / M_\odot$	r_* пк	V_σ км/с	e	R_* кпк	P_r 10^5 год	τ_* 10^{11} год	$\log \tau_*$	$ z _{\text{max}}$ кпк
1	104	6.1	60.3	+33	0.07	7	16.73	0.70	10.84	3
2	288	4.9	37.0	+52	0.51	12	22.40	0.38	10.58	9
3	362	5.5	25.9	-73	0.80	10	13.09	1.96	11.29	8
4	4147	4.7	36.4	+160	0.59	52	187.03	15.16	12.18	46
5	5139	6.6	65.7	-87	0.63	7	8.90	9.55	11.98	3
6	5272	5.8	17.4	-106	0.48	13	26.03	24.39	12.39	12
7	5466	5.2	96.3	+225	0.75	52	161.97	18.94	12.28	50
8	5904	5.6	64.1	-202	0.83	37	90.91	52.99	12.72	33
9	6171	5.1	41.5	-43	0.22	3	3.86	0.05	9.70	3
10	6205	5.8	55.5	-114	0.53	21	50.85	17.28	12.24	21
11	6218	5.1	28.1	-168	0.38	6	9.06	2.63	11.48	5
12	6254	5.4	31.2	+197	0.28	5	7.72	5.55	11.74	5
13	6341	5.3	37.2	+70	0.86	11	14.38	0.87	10.94	5
14	6397	5.4	24.7	-103	0.35	6	9.37	2.32	11.37	2
15	6626	5.4	25.5	-45	0.25	2	2.02	0.09	9.95	1
16	6656	5.7	30.2	-113	0.55	10	16.39	7.99	11.90	2
17	6712	5.0	19.9	-133	0.92	7	6.96	1.42	11.15	4
18	6779	5.0	34.3	+15	0.81	33	77.85	0.12	10.08	5
19	6838	4.5	17.6	-2	0.19	7	14.27	0.24	10.38	0
20	6934	5.3	33.7	+254	0.49	32	99.53	97.44	11.94	22
21	7078	6.3	59.1	-197	0.60	37	111.20	335.20	13.52	30
22	7089	6.0	56.4	-306	0.67	28	68.65	262.90	13.42	24

$$\tau_s = \frac{GM_\odot v_c^2 P_c}{8(\Delta z)^2 g_m^2 r} \cdot \frac{M_\odot}{M_\odot}, \quad (19)$$

где M_\odot - масса, а $GM_\odot \approx 132718 \cdot 10^6 \text{ км}^3 \text{ с}^{-2}$ - гравитационный параметр Солнца.

Для шаровых скоплений звезд в нашей Галактике и других спиральных галактиках типичными являются значения $\Delta z = 5 \text{ пк}$, $g_m = 10^{-8} \text{ см с}^{-2}$. В табл.1 приведены некоторые данные для 22 шаровых скоплений звезд [4] с известными массами, радиусами, кинематическими характеристиками и галактическими орбитальными элементами, оцененными на базе трехкомпонентной модели гравитационного потенциала Галактики [5]. В столбце со значениями $\log \tau_s$ для всех перечисленных скоплений убеждаемся, что лишь только очень редко величина $\log \tau_s$ не превосходит возраст Галактики. Этот результат вполне убедительно свидетельствует о неэффективности процесса возможного гравитационного удара в структурной эволюции шаровых скоплений звезд.

Абастуманская астрофизическая обсерватория им. Е.К.Харадзе,
Грузия, e-mail: gmalasi@yahoo.com revazchigladze@yahoo.com

GRAVITATIONAL IMPACT AS A POSSIBLE FACTOR IN THE STRUCTURAL EVOLUTION OF THE GLOBULAR STAR CLUSTERS IN GALAXY

G.A.MALASIDZE, G.N.SALUKVADZE, R.A.CHIGLADZE

Besides from isolated self-gravitating dynamical systems should be consider as particularly important the study of interacting effects between the different galactic formations. With taking into account the degree of stellar system's freedom¹ is much greater than the degree of freedom of a single star internal structure, the reaction factor to an external effect of these systems has more diverse nature. The purpose of presented article is to assess the amount of time perceptible structural evolution of globular clusters as a result of the gravitational potential impacts at their pass through the plane of galaxy symmetry. For a 22 globular clusters with known masses, radiuses, proper motions, as well as some of the orbital elements defined on the basis of a three-component model of the galaxy, it was found that only very rarely the time interval does not exceed the age of the galaxy.

Key words: *Galaxy: model: cluster: gravity: impact: evolution: structure*

ЛИТЕРАТУРА

1. У.Салсау, Гравитационная физика звездных и галактических систем. Изд-во М., "Мир", 1989, с.457.
2. J.P.Ostriker, L.Spitzer, Jr., R.A.Chevelier, *Astrophys. J. Lett.*, **176**, 1-51, 1972.
3. Г.Г.Кузмин, Г.А.Маласидзе, Публ. Тартуск. Астрофиз. Обсерв., **38**, 180, 1969.
4. B.Dauphole, M.Geffert, J.Colin, M.Odenkirchen, H.J.Tucholke, *Astron. Astrophys.*, **313**, 119, 1996.
5. B.Dauphole, J.Colin, *Astron. Astrophys.*, 1994, submitted (Proceeding in IAU Symposium 169) Unsolved Problems of the Milky Way 15-27 august, 1994. The Hague, The Netherlands.

