АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Динамическая эволюция тройных иерархических звездных систем

Н. А. Соловая

Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ).
Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 13.
E-mail: solov@sai.msu.ru

Статья поступила 13.07.2009, подписана в печать 12.03.2010

Динамическая эволюция тройных иерархических звездных систем с использованием возмущений высших порядков исследована в рамках неограниченной задачи трех тел. Тройные иерархические звездные системы — это такие звездные системы со сравнимыми массами, которые образуют близкую пару и имеют далекого компонента. Предполагалось, что такие звездные системы устойчивы на космологических временных интервалах в противоположность системам со сравнимыми расстояниями. Для промежуточного движения получено решение, в котором оба компонента в средних движениях имеют вековые члены. Возмущения далекого компонента замедляют среднее движение близкой пары, и наоборот, среднее движение далекого компонента возрастает под действием возмущений близкой пары. Величины возмущений малы, но на космологических временных интервалах могут изменить конфигурацию системы. Вероятность, что такие системы станут неустойчивы, высока.

Ключевые слова: тройные системы, эволюция, устойчивость.
УДК: 521.19. PACS: 95.10.Ce, 45.50.Pk, 45.50.Jf.

Введение

Двойные и тройные звездные системы — общее явление во Вселенной. Когда известны массы компонентов, расстояния между ними и значения кеплеровских элементов, возможно определить динамическую эволюцию системы, используя аналитическую теорию неограниченной задачи трех тел. Настоящее исследование посвящено изучению динамической эволюции таких тройных звездных систем, которые Д. Эванс [3] назвал иерархическими. В таких системах звезды имеют сравнимые массы, две из них образуют близкую пару и имеют удаленного компонента. Предполагалось, что такие системы устойчивы в противоположность системам со сравнимыми взаимными расстояниями. Численные эксперименты [6] по динамическому поведению трех масс, движущихся под влиянием взаимного гравитиционного притяжения, показали, что в 73% случаев такие тройные системы распадаются. Среднее время распада тройных звездных систем, согласно работе [6], составляет 10^9 лет.

Статистика показывает, что ускользающая масса не всегда наименьшая. Присутствие третьего компонента, даже далекого, может вызвать большие возмущения в эволюции орбитальных элементов. Предполагается, что в звездных системах наклоны орбит и их эксцентриситеты произвольные и могут изменяться в больших пределах в противоположность наклонам и эксцентриситетам планет в солнечной системе. Обычно большие эксцентриситеты вызывают большие сближения компонент в периастре, что также приводит к большим возмущениям и разрушению системы.

Устойчивость движения на основе численного интегрирования 412 орбит исследовалась в работе [5]. Под устойчивостью понималось либо ускользание одного из компонентов, либо образование двумя компонентами настолько близкой пары, что между ними могли произойти приливные или материальные взаимодействия. В результате в работе [5] был дан следующий критерий устойчивости S. Для прямых движений, т. е. когда угол взаимного наклона меньше $90°$, величина $S = a_2(1-e_2)/a1 > 3.5$, где a_1, a_2 — большие полуоси орбит, e_2 — эксцентриситет орбиты удаленного компонента. Для обратных движений, когда угол взаимного наклона больше $90°$, величина $S > 2.75$.

Промежуточные орбиты

Рассмотрим движение тройной звездной системы в рамках неограниченной задачи трех тел. В промежуточном движении используем первые три члена гамильтониана, разложенного по полиномам Лежандра по отношению больших полуосей. Из гамильтониана методом Цейпеля исключены короткопериодические члены.

Короткопериодические возмущения малы и не могут быть получены из наблюдений. Массы трех компонент одного порядка, эксцентриситеты и наклоны их орбит могут меняться в больших пределах. Тройная система имеет близкую пару (внутренняя орбита) и далекого компонента (внешняя орбита), медленно вращающегося вокруг их центра масс. Движение рассмотрено в якобиевой системе координат. За основную плоскость принята плоскость Лапласа. Гамильтониан в промежуточном движении имеет вид

$$F = \frac{\gamma_1}{2L_1^2} + \frac{\gamma_2}{2L_2^2} - \frac{1}{16}\gamma_3 \frac{L_1^4}{L_2^3 G_2^3} \times$$
$$\times \left[(1-3q^2)(5-3\eta^2) - 15(1-q^2)(1-\eta^2)\cos(2g_1)\right], \quad (1)$$

где коэффициенты γ_1, γ_2, и γ_3 зависят от масс,

$$q = \frac{c^2 - G_1^2 - G_2^2}{2G_1G_2}, \quad \eta = \sqrt{1 - e_1^2}, \tag{2}$$

c — постоянная углового момента системы, g_1 — аргумент периастра близкой пары в плоскости Лапласа, q – косинус угла взаимного наклона орбит.

Движение описывется в канонических элементах Делоне — L_i, G_i, l_i, g_i $(i = 1, 2)$:

$$\begin{aligned} &L_1 = \beta_1\sqrt{a_1} = A_1, && L_2 = \beta_2\sqrt{a_2} = A_2, \\ &G_1 = L_1\sqrt{\xi}, && G_2 = L_2\sqrt{1 - e_2^2} = A_4, \\ &l_1 = M_1 = n_1(t - t_0), && l_2 = M_2 = n_2(t - t_0), \\ &g_1 = w_1, && g_2 = w_2, \end{aligned} \tag{3}$$

где $\xi = 1 - e_1^2$, β_1 и β_2 — функции масс, a_j — большие полуоси орбит, e_j — их эксцентриситеты, l_j — средние аномалии $(j = 1, 2)$.

Если бы звезды двигались по невозмущенным орбитам, их средние движения определялись бы из 3-го закона Кеплера:

$$n_1 = k\sqrt{\frac{m_0 + m_1}{a_1^3}}, \quad n_2 = k\sqrt{\frac{m_0 + m_1 + m_2}{a_2^3}}. \tag{4}$$

В работе [1] получено решение для промежуточного движения, которое позволяет определить максимальные и минимальные изменения эксцентриситета близкой пары, определяемые формулами

$$e_{1\,\min} = \sqrt{1 - \xi_2}, \quad e_{1\,\max} = \sqrt{1 - \xi_1}. \tag{5}$$

Здесь ξ_j $(j = 1, 2)$ — два корня полинома 5-го порядка в знаменателе промежуточного решения, полученного методом Гамильтона–Якоби.

Средние движения звезд S_i, $\nu_i = 2\pi P_i^{-1}$ (P_i — период обращения), движущихся по возмущенным орбитам, выражаются как

а) среднее движение звезды S_1

$$\nu_1 = \left\{1 + \frac{1}{16}\frac{\gamma m^2}{(1 - e_2^2)^{3/2}} \times \right.$$
$$\left. \times \left[4A_3 + \frac{3\pi\delta}{K\Sigma_1\overline{G}_2^2}(\Sigma_1 Q_1 + \Sigma_2 Q_2 + \Sigma_3 Q_3)\right]\right\} n_1; \tag{6}$$

б) среднее движение звезды S_2

$$\nu_2 = \left[m - \frac{1}{16}\frac{\gamma m^2}{(1 - e_2^2)^{3/2}}\frac{3A_3\sqrt{1 - e_2^2}}{\overline{G}_2}\right] n_1, \tag{7}$$

где $A_3 = (1 - 3q^2)(5 - 3\eta^2) - 15(1 - q^2)(1 - \eta^2)\cos(2g_1)$, Σ_i $(i = 1, 2, 3)$ — вековые части гиперэллиптических интегралов, $\overline{G}_2 = G_2/L_1$, $\gamma = m_2/(m_0 + m_1 + m_2)$, m — отношение средних движений.

Тогда средние аномалии l_1 и l_2 определятся по формулам

$$l_1 = B_1 + \nu_1(t - t_0) + PT, \quad l_2 = B_2 + \nu_2(t - t_0) + PT, \tag{8}$$

где PT — периодические члены.

Так как звезды испытывают взаимные возмущения, оказалось, что движение звезды по внутренней орбите замедляется под влиянием возмущений удаленной звезды на величину $\Delta n_1 = \nu_1 - n_1$, а среднее движение далекой звезды ускоряется под влиянием возмущений близкой пары на величину $\Delta n_2 = \nu_2 - n_2$.

Тройная звездная система ε Hydrae (ADS6993) была выбрана для иллюстрации теории. Система является пятикратной, но только для трех ярких компонентов, возможно сверхгигантов, определены значения кеплеровских элементов. Далекий компонент имеет слабого близкого спутника, масса которого включена в массу удаленного компонента. Пятый компонент удален больше чем на 400 а.е. и практически не влияет на эволюцию трех компонентов. Три ярких компонента удовлетворяют всем условиям для иллюстрации теории. Необходимые значения кеплеровских элементов были взяты из работы [4] (таблица). Компоненты имеют массы $m_0 = 1.50M_\odot$, $m_1 = 1.30M_\odot$, $m_2 = 2.74M_\odot$.

Значения кеплеровских элементов

Близкая пара	Далекий компонент
$a_1 = 3.967$ AU	$a_2 = 75.76$ AU
$e_1 = 0.67$	$e_2 = 0.29$
$T_{\pi_1} = 1961.05$	$T_{\pi_2} = 1933.00$
$\omega_1 = 264.00°$	$\omega_2 = 203.1°$
$\Omega_1 = 109.30°$	$\Omega_2 = 55.5°$
$i_1 = 49.30°$	$i_2 = 42.0°$
$T_0 = 2000.0$	$T_0 = 2000.0$

Полученные результаты показывают, что под влиянием возмущений далекого компонента среднее движение n_1 близкой пары замедляется на величину 0.019° в год и, наоборот, среднее движение n_2 далекой звезды ускоряется на величину 0.002° в год.

Эксцентриситет близкой пары изменяется в интервале от $e_{1\,\min} = 0.62$ до $e_{1\,\max} = 0.77$. В периастре звезды сближаются до величины $r_{1\pi} = a_1(1 - e_{1\,\max}) = 0.90516$ а.е. и возможны большие возмущения.

Возмущения третьего порядка

Общее решение дифференциальных уравнений промежуточного движения зависит от десяти произвольных постоянных A_i и B_i $(i = 1, 2, \ldots, 5)$. Будем считать эти постоянные в возмущенном движении функциями времени. Так как постоянные возникают в процессе интегрирования системы дифференциальных уравнений методом Гамильтона–Якоби, то метод вариации произвольных постоянных осуществляется автоматически. В промежуточном движении внутренняя орбита есть некеплеровский эллипс с движущимся узлом и периастром и изменяющимся эксцентриситетом. Внешняя орбита — некеплеровский эллипс с движущимся узлом и периастром. Средние движения компонентов имееют вековые члены.

Будем рассматривать промежуточное движение как невозмущенное, а члены третьего порядка в гамильтониане R будем рассматривать как возмущения. Из решения системы с упрощенным гамильтонианом (1) видно, как угловые переменные — средние аномалии l_1 и l_2 — связаны со временем. Возмущения третьего порядка дадут вековые ускорения в средних движениях. Они малы, но на космологическом временном интервале

могут вызвать изменения в конфигурации системы. Возмущающая функция имеет следующий вид:

$$R = \frac{15}{512}\gamma^4 \frac{L_1^6}{L_2^8} \frac{e_1 e_2 \sqrt{1-e_2^2}}{(1-e_2)^3(1+e_2)^3} \times$$
$$\times [(4+3e_1^2) + (-1-11q+5q^2+15q^3)\cos(g_1-g_2) +$$
$$+ 35e_1^2(1-q)(1+q)^2\cos(3g_1-g_2) +$$
$$+ (4+3e_1^2)(-1+11q+5q^2-15q^3)\cos(g_1+g_2) +$$
$$+ 35e_1(-1+q)^2(1+q)\cos(3g_1+g_2), \quad (9)$$

где

$$\gamma_4 = k^2\mu_1 \frac{m_0-m_1}{m_0+m_1}\frac{\beta_2^6}{\beta_1^8}. \quad (10)$$

Воспользуемся методом вариации произвольных постоянных, разработанным в работе [7], и сохраним все употребляемые в ней обозначения. Автоматически получаем необходимые дифференциальные уравнения и решаем их, используя классические методы небесной механики:

$$\frac{dB_1}{dt} = -\frac{\partial R}{\partial L_1} - \frac{d\nu_1}{dt}t, \quad \frac{dB_2}{dt} = -\frac{\partial R}{\partial L_2} - \frac{d\nu_2}{dt}t. \quad (11)$$

Введем обозначения:

$$\Delta n_1^{(3)} = \frac{\partial R}{\partial L_1}, \qquad \Delta n_2^{(3)} = \frac{\partial R}{\partial L_2},$$
$$\sigma_1 = \frac{1}{4}\frac{\gamma m^2}{(1-e_2^2)^{3/2}}\frac{dA_3}{dt}n_1, \quad \sigma_2 = -\frac{3}{16}\frac{\gamma m^2}{(1-e_2^2)\overline{G}_2}\frac{dA_3}{dt}n_1,$$

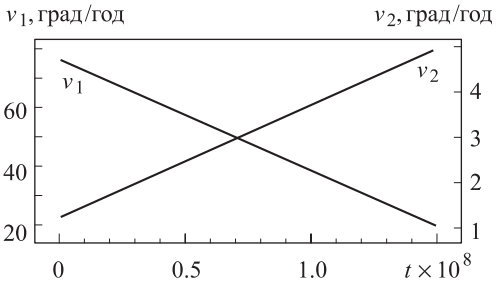

Рис. 1. Изменения средних движений ν_1 и ν_2 [градус/год] звездной системы ε Hydrae на внутренней и внешней орбитах на интервале $1.5 \cdot 10^8$ лет

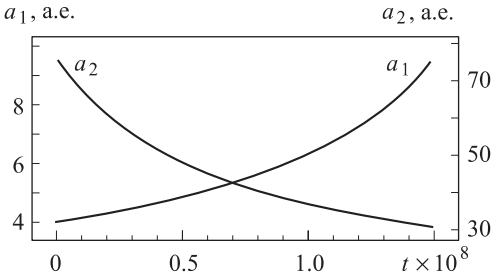

Рис. 2. Изменения больших полуосей a_1 и a_2 звездной системы ε Hydrae на внутренней и внешней орбитах на интервале $1.5 \cdot 10^8$ лет

где σ_1, σ_2 — коэффициенты при t в уравнениях (11). Среднее движение ν_1 близкой пары уменьшается под действием возмущений далекой звезды:

$$\nu_1 = n_1 - \Delta n_1 - \Delta n_1^{(3)} - \sigma_1 t, \quad (12)$$

а большая полуось a_1 увеличивается. Изменения этих величин на интервале $1.5 \cdot 10^8$ лет представлены на рис. 1 и 2. За этот промежуток времени большая полуось внутренней орбиты увеличится до 9.8 а.е.

Среднее движение ν_2 далекой звезды ускоряется:

$$\nu_2 = n_2 + \Delta n_2 + \Delta n_2^{(3)} + \sigma_2 t, \quad (13)$$

а большая полуось a_2 уменьшается. Изменение этих величин на интервале $1.5 \cdot 10^8$ лет также представлено на рис. 1 и 2. За этот промежуток времени большая полуось a_2 далекой звезды уменьшится до 30 а.е. Принимая во внимание критерий устойчивости S [5], после $1.5 \cdot 10^8$ лет коэффициент S будет приблизительно равен 2. Система трансформируется из иерархической в систему с расстояниями одного порядка, которые считаются неустойчивыми.

Заключение

В рамках частного случая аналитической теории неограниченной задачи трех тел с использованием возмущений третьего порядка показано, что на космологическом временном интервале в процессе динамической эволюции иерархические звездные системы трансформируются в звездные системы со сравнимыми расстояниями. В качестве промежуточных орбит использованы некеплеровские эллипсы с движущимися периастрами и узлами. Под влиянием взаимных возмущений среднее движение близкой пары замедляется, что приводит к увеличению большой полуоси. И наоборот, движение далекого компонента ускоряется и его большая полуось уменьшается. Для иллюстрации теории приведена система ε Hydrae. Система из иерархической с отношением больших полуосей порядка 19 трансформируется в систему с отношением больших полуосей меньше 3.

Коэффициент $S < 3.5$. Согласно критерию [5], система станет неустойчивой. Подтверждаются предположения, высказанные в работе [2] о возможном распаде тройных систем независимо от знака полной энергии системы.

Список литературы

1. *Орлов А.А., Соловая Н.А.* // Труды ГАИШ. 1974. **45**. С. 119.
2. *Birkhoff, G.D.* Dynamical Systems. Providence, 1927.
3. *Evans D.* // Q.H.R. Astron. Soc. 1968. **9**. P. 388.
4. *Heintz W.D.* // Zeitschrift für Astrophysics. 1963. **57**. P. 3.
5. *Harrington R.* // Celestial Mech. 1972. **9**. P. 322.
6. *Szebehely V.* // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1972. **69**. P. 1077.
7. *Соловая Н.А.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1997. № 4. С. 47.

Dynamical evolution of triple hierarchical stellar systems

N. A. Solovaya

P. K. Sternberg State Institute of Astronomy, Moscow State University, Moscow 119191, Russia.
E-mail: solov@sai.msu.ru.

The dynamical evolution of triple hierarchical stellar systems is studied with using of the perturbations of high orders. It is supposed that such systems are stable contrary to stellar systems with of comparable distances. We consider the motion in the frame of the general three-body problem. In the differential equations of motion we used the Hamiltonian without short-periodic terms. They are very small and cannot be obtained from observations. In the solution the mean motions of the both components have the secular terms. Under the influence of perturbations of a distant companion the mean motion in the near pair is slowed and vice versa. The mean motion of distant star is increased. This changes are little, but on the cosmological time interval the hierarchical systems will convert to stellar systems which components have comparable distances. Such systems are unstable.

Keywords: triple hierarchical stellar systems, dynamical evolution, dynamical stability.
PACS: 95.10.Ce, 45.50.Pk, 45.50.Jf.
Received 13 July 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 4(2010).

Сведения об авторе

Соловая Нина Андреевна — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.; тел.: (495) 939-37-64, e-mail: solov@sai.msu.ru.