УДК 521.1

А.А.БЕКОВ, А.Н.БЕЙСЕКОВ, Л.Т.АЛДИБАЕВА

К ДИНАМИКЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМ С НЕИЗОТРОПНЫМ ИСТЕЧЕНИЕМ МАССЫ

Исследовано движение пробного тела в поле двойной звездной системы при медленном изменении некоторых физических параметров излучающих компонентов на основе ограниченной нестационарной фотогравитационной задачи трех и двух тел с неизотропным истечением масс тел. Найдены полярные и компланарные решения, дающие возможность интерпретации динамических и структурных особенностей в окрестности молодых эволюционирующих двойных звезд и галактик.

В настоящее время интенсивно разрабатываются нестационарные динамические проблемы астрономии [1–3]. Изменение со временем массы, размеров, формы и других физических параметров небесных тел допускает экспериментальное определение. Поэтому необходимы формулирование и исследование динамических задач с учетом изменения со временем этих физических параметров. В работе в качестве динамической модели рассматривается движение пробного тела во внешнем гравитационном поле двойной звезды или галактики с медленно меняющимися физическими параметрами: массой, размерами и формой. Дополнительно принимается во внимание изменение параметров редукции для излучающих и гравитирующих тел в фотогравитационной формулировке задачи. Движение частиц изучается в рамках ограниченной нестационарной фотогравитационной задачи трех и двух тел с анизотропным излучением масс всех тел. Полученные результаты дают возможность провести количественный и качественный анализ эффектов переменной гравитации в движении небесных тел.

Движение в окрестности двойной звездной системы. Исследуем движение пробного тела (газ, пыль, звезда) в гравитационном поле двойной звезды или галактики на основе ограниченной нестационарной фотогравитационной задачи трех тел. Частные решения стационарной задачи рассматривались в работе [4]. Для нестационарного случая можно указать аналогичные частные решения задачи [5]. Для изотропного случая изменения масс основных тел частные решения ограниченной задачи трех тел с переменными массами рассматривались в работах [6–9], неизотропный случай – в работе [10]. В рассматриваемой схеме ограниченной нестационарной фотогравитационной задачи трех тел принимаем, что массы и коэффициенты редукции всех трех тел со временем изменяются в одинаковом темпе при наличии реактивных сил, пропорциональных темпу изменения массы и скорости движения тел (неизотропный случай изменения масс тел, когда абсолютные скорости отделяющихся и присоединяющихся частиц равны нулю).

Уравнения движения пассивно гравитирующей материальной точки во вращающейся барицентрической системе координат Oxyz, плоскость xy которой совпадает с плоскостью движения основных тел, а ось x все время проходит через эти точки аналогично [10] имеют следующий вид:

$$\ddot{x}-2\omega\dot{y}=\omega^2 x+\dot{\omega}y-\mu_1\frac{x-x_1}{r_1^3}-\mu_2\frac{x-x_2}{r_2^3}-\frac{\dot{m}_3}{m_3}\left(\dot{x}-\omega y\right),$$

$$\ddot{y}+2\omega\dot{x}=\omega^2 y-\dot{\omega}x-\mu_1\frac{y}{r_1^3}-\mu_2\frac{y}{r_2^3}-\frac{\dot{m}_3}{m_3}\left(\dot{y}+\omega x\right), \quad (1)$$

$$\ddot{z}=-\mu_1\frac{z}{r_1^3}-\mu_2\frac{z}{r_2^3}-\frac{\dot{m}_3}{m_3}\dot{z}$$

Здесь r_1, r_2 – расстояния притягиваемой точки от основных тел, ω – их угловая скорость движения, и

$$\mu_i=Gq_iM_i,\ \frac{\dot{\mu}_i}{\mu_i}=\frac{\dot{m}_3}{m_3}=\frac{\dot{m}}{m},\ (\mathrm{i}=1,2), \qquad (2)$$

где G – гравитационная постоянная; M_i – массы основных тел; q_i – редукционные параметры, функции времени: m_3 – масса пробного тела; m – функция времени, характеризующая одинаковый темп изменения масс тел.

Будем рассматривать случай изменения параметров q_i в интервале реальных масштабов для планетных систем:

$$0 < q_i \leq 1. \tag{3}$$

Тогда, так же как и в случае ограниченной задачи трех тел переменной массы с неизотропным истечением массы [10], можно указать частные решения рассматриваемой задачи при законе изменения параметров μ_i и m_3 по закону Эддингтона–Джинса при значениях показателя $n = 3$ и $n = 6$:

$$\dot{\mu}_i = \alpha_i \mu_i^n \ , \ \dot{m}_3 = \alpha m_3^n \ , \tag{4}$$

$$(i = 1,2) \ , \ (n = 3,6)$$

Уравнения (1) преобразованием

$$r(x,y,z) = \left(\frac{\mu_0}{\mu}\right)^3 \rho(\xi,\eta,\zeta), \tag{5}$$

$$d\tau = \left(\frac{\mu}{\mu_0}\right)^5 dt, \ \omega = \left(\frac{\mu}{\mu_0}\right)^5 \omega_0$$

приводятся к автономному виду

$$\begin{aligned} &\xi'' - 2\omega_0 \eta' = \frac{\partial U}{\partial \xi}, \\ &\eta'' + 2\omega_0 \xi' = \frac{\partial U}{\partial \eta}, \\ &\zeta'' = \frac{\partial U}{\partial \zeta}, \end{aligned} \tag{6}$$

где

$$U = \frac{\chi\omega_0^2}{2}\left(\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2\right) - \frac{\omega_0^2 \zeta^2}{2} + \frac{\mu_{01}}{\rho_1} + \frac{\mu_{02}}{\rho_2},$$

$$\rho_i^2 = \left(\xi - \xi_i\right)^2 + \eta^2 + \zeta^2 \ (i = 1,2) \tag{7}$$

$$\xi_1 = -\frac{\mu_{02}}{\mu_0}\rho_{12}, \quad \xi_2 = \frac{\mu_{01}}{\mu_0}\rho_{12},$$

причем ρ_{12}, χ – постоянные:

$$r_{12} \mu m^2 = \chi C^2, \ \rho_{12} \mu_0 = \chi C^2, (\chi > 0) \tag{8}$$

Здесь r_{12} – расстояния между основными телами, C – постоянная интеграла площадей. Уравнения (7) задачи по виду совпадают с соответствующими уравнениями для случая изотропного истечения масс [3, 8], следовательно, в рассматриваемом анизотропном случае существуют аналогичные частные решения задачи.

Частные решения уравнений (6) определяются из системы уравнений

$$\frac{\partial U}{\partial \xi} = 0, \ \frac{\partial U}{\partial \eta} = 0, \ \frac{\partial U}{\partial \zeta} = 0. \tag{9}$$

Существуют прямолинейные решения L_i (i=1, 2, 3)

$$\xi_L = \alpha_i, \ \eta = 0 \ \zeta = 0, (i = 1, 2, 3), \tag{10}$$

треугольные решения L_4, L_5, которые определяются условием

$$\rho_1^3 = \rho_2^3 = \rho_{12}^3 = \frac{\chi^3 C^6}{\mu_0^3}. \tag{11}$$

Если в уравнениях (9) положить $\zeta \neq 0$, то имеем компланарные решения L_6, L_7 $(\xi, 0, \zeta)$, которые, как и в ограниченной задаче трех тел переменной массы [8,9], можно определить из уравнения

$$\begin{aligned} &2\left(\xi + \mu_{20}\right) - 1 - \left[\frac{\mu_{10}\chi}{\xi + \mu_{10}(\chi - 1)}\right]^{\frac{2}{3}} + \\ &+ \left[\frac{\mu_{20}\chi}{-\xi + \mu_{20}(\chi - 1)}\right]^{\frac{2}{3}} = 0. \end{aligned} \tag{12}$$

Таким образом, рассмотренная фотогравитационная задача имеет в области изменения параметров (3) семь частных решений, аналогичных решениям ограниченной задачи трех тел переменной массы. Дополнительные частные решения для различных законов изменения массы и светимости можно определить аналогично работе [8].

Движение в окрестности массивного излучающего компонента звезды и галактики. Исследуем теперь движение вблизи одной из компонент двойной звездной системы (звезды или галактики). Полагая малым гравитационное влияние вторичной компоненты и считая это влияние возмущающим по сравнению с влиянием основной компоненты, им можно пренебречь. Или рассмотрим случай, когда масса вторичной компоненты пренебрежимо мала по сравнению с массой первичной, основной компоненты звездной системы. Тогда в качестве динамической модели движение будем рассматривать в рамках ограниченной нестационарной фотогравитационой задачи двух тел. Частные решения стационарной задачи рассматривались в работах [11,12]. В нашем случае дополнительно учитываем переменность массы, размеров и формы основного компонента, принимаемого за трехосный излучающий и гравитирующий эллипсоид [13].

Рассмотрим движение пассивно гравитирующей точки во внешнем поле тяготения вращающегося с угловой скоростью Ω излучающего трехосного эллипсоида с медленно меняющимися со временем массой $M(t)$, редукционным параметром q ($0<q\le 1$), размерами и формой. Принимаем анизотропный случай изменения массы пассивно гравитирующей точки (абсолютная скорость отделяющихся и присоединяющихся частиц равна нулю), т. е. дополнительно учитываем реактивную силу, пропорциональную темпу изменения массы и скорости движения материальной точки. Полагаем, что медленное изменение физических параметров эллипсоида не приводит к смещению его центра масс. Полуоси эллипсоида a, b, c в общем являются функциями времени, и пусть, как и в стационарном случае, эллипсоид мало отличается от однородного шара радиуса R и имеет объем, равный объему этого шара. Тогда

$$a^2 = R^2 + \alpha', \; b^2 = R^2 + \beta', \; c^2 = R^2 + \sigma', \quad (13)$$

где α', β', σ' – малые по сравнению с R^2 величины, которые вследствие равенства объемов эллипсоида и шара удовлетворяют с точностью до малых более высокого порядка соотношению $\alpha' + \beta' + \sigma' = 0$.

Уравнения движения материальной точки во вращающейся прямоугольной системе координат Oxyz с началом в центре масс O эллипсоида, с осями Ox, Oy, Oz, совпадающими с главными центральными осями инерции эллипсоида и с направлением угловой скорости Ω вращения эллипсоида, совпадающим с направлением оси Oz, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - 2\Omega\dot{y} - \dot{\Omega}y - \Omega^2 x &= \frac{\partial \tilde{V}}{\partial x} - \frac{\dot{m}_3}{m_3}\left(\dot{x} - \Omega y\right), \\ \ddot{y} + 2\Omega\dot{x} + \dot{\Omega}x - \Omega^2 y &= \frac{\partial \tilde{V}}{\partial y} - \frac{\dot{m}_3}{m_3}\left(\dot{y} + \Omega x\right), \\ \ddot{z} &= \frac{\partial \tilde{V}}{\partial z} - \frac{\dot{m}_3}{m}\dot{z}, \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\tilde{V} = \frac{GqM}{r} + \frac{3}{10}GqM\,\frac{\alpha' x^2 + \beta' y^2 + \sigma' z^2}{r^5} + \cdots, \quad (15)$$

есть представление внешнего потенциала эллипсоида в ряд по малым α', β', σ' и m_3 – масса материальной точки.

Уравнения (14) преобразованием

$$\vec{r}(x,y,z) = l(t)\vec{\rho}(\xi,\eta,\varsigma),\; d\tau = \Omega dt, \quad (16)$$

где $l^3\Omega^2\kappa = \mu(t)$; $\kappa = const$; $\mu(t) = GqM(t)$, G – гравитационная постоянная, могут быть приведены к автономному виду

$$\xi'' - 2\eta' = \frac{\partial V}{\partial \xi}, \; \eta'' + 2\xi' = \frac{\partial V}{\partial \eta}, \; \varsigma'' = \frac{\partial V}{\partial \varsigma}, \quad (17)$$

где

$$V = \kappa U, \; U = \frac{\rho^2}{2} - \frac{1}{\kappa}\frac{\varsigma^2}{2} + \frac{1}{\rho} + \varepsilon\frac{\alpha\xi^2 + \beta\eta^2 + \sigma\varsigma^2}{\rho^5} + \ldots,$$

$$\rho^2 = \xi^2 + \eta^2 + \varsigma^2. \quad (18)$$

Здесь ε – параметр ($0 < \varepsilon \ll 1$); α, β, σ – постоянные, определяемые соотношениями

$$\frac{3}{10}\frac{\alpha'(t)}{l^2(t)} = \varepsilon\alpha, \; \frac{3}{10}\frac{\beta'(t)}{l^2(t)} = \varepsilon\beta, \; \frac{3}{10}\frac{\sigma'(t)}{l^2(t)} = \varepsilon\sigma. \quad (19)$$

Сами функции $l(t)$ и $\Omega(t)$, определяющие преобразование (16), находим из соотношений

$$\begin{aligned} l^2\Omega m_3 &= l_0^2\Omega_0 m_3 = C_0, \\ \ddot{l} + \frac{\dot{m}_3}{m_3}\dot{l} &+ (\kappa - 1)\Omega^2 l = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Отсюда с помощью адиабатического инварианта

$$l\mu m_3^2 = \kappa C_0^2 = const \quad (21)$$

с учетом одинакового темпа изменения масс

$$\frac{\dot{\mu}}{\mu} = \frac{\dot{m}_3}{m_3} = \frac{\dot{m}}{m}, \quad (22)$$

где m – функция времени, характеризующая одинаковый темп изменения масс тел, находим частные решения законов изменения со временем параметров μ и m_3 в форме закона Эддингтона–Джинса при показателях $n = 3$ и $n = 6$:

$$\dot{\mu} = \alpha_0\mu^n, \; \dot{m}_3 = \beta_0 m_3^n \; (n=3,6). \quad (23)$$

Автономные уравнения (17) имеют такой же вид, как и в случае изотропного истечения масс [3, 13], следовательно, в рассматриваемом неизотропном случае существуют аналогичные частные решения задачи.

Система (17) имеет частные решения вида

$$\xi = const\,,\ \eta = const\,,\ \varsigma = const\,, \qquad (24)$$

аналогичные экваториальным и полярным решениям стационарной задачи.

Экваториальные решения P_i определяются из выражений

$$P_1(P_3):\ \xi = \pm 1 \pm \varepsilon\alpha + \ldots,\ \eta = 0\,,\ \varsigma = 0\,,$$

$$P_2(P_4):\ \xi = 0\,,\ \eta = \pm 1 \pm \varepsilon\beta + \ldots,\ \varsigma = 0\,. \quad (25)$$

Полярные решения определяются в виде

$$P_5(P_6):\ \xi = 0\,,\ \eta = 0\,,$$
$$\varsigma = \pm\left(\frac{\kappa}{\kappa - 1}\right)^{\frac{1}{3}} \pm \varepsilon\left(\frac{\kappa - 1}{\kappa}\right)^{\frac{1}{3}}\sigma + \ldots \qquad (26)$$

Кроме указанных решений существует другой класс полярных решений – z-решения в окрестности гравитирующего и излучающего эллипсоида, расположенные вдоль оси вращения эллипсоида [13].

Заключение. Результаты исследования динамики двойных звездных систем на основе рассматриваемой фотогравитационной задачи двух и трех тел с переменной массой и световым давлением компонент системы с неизотропным истечением масс представляются важными, поскольку позволяют исследовать новые свойства полученных гомографических решений и построить аналоги поверхностей Хилла для последующего количественного и качественного анализа динамической проблемы [14].

Найденные частные решения можно использовать в различных задачах звездной динамики, например для изучения движения газопылевых частиц в окрестности двойной или одиночной формирующейся переменной звезды или движения звезд и газопылевых частиц во внешнем поле тяготения двойной галактики с медленно меняющимися рассматриваемыми физическими параметрами ядер галактик, а также в астрофизических приложениях для возможной интерпретации возникающих транзиентных структурных особенностей в окрестности таких эволюционирующих звезд и галактик.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Omarov T.B.* (Editor). Non-Stationary Dynamical Problems in Astronomy// Nova Science Publishers Inc. New-York, 2002. P.248.

2. *Bekov A.A., Omarov T.B.* The theory of orbits in non-stationary stellar systems// Astron. and Astroph. Transactions. 2003. V.22(2). P. 145-153.

3.*Bekov A.A.* On the dynamics of non-stationary binary stellar systems // Order and chaos in stellar and planetary systems // ASP Conference series. 2004. V. 316. P. 366-370.

4. *Радзиевский В.В.* Пространственный случай ограниченной задачи трех излучающих и гравитирующих тел // Астрон. журн. 1953. Т. 30, вып. 3. С. 265-273.

5. *Беков А.А., Рыстыгулова В.Б.* О частных решениях нестационарной фотогравитационной задачи трех тел //Известия МОН РК, НАН РК. Сер. физ.-мат. 2002. № 4. С. 47-49.

6. *Гельфгат Б.Е.* Об аналогах интеграла Якоби в ограниченной задаче трех тел переменной массы//Современные проблемы небесной механики и астродинамики. М., 1973. С. 7-13.

7. *Беков А.А.* Точки либрации ограниченной задачи трех тел переменной массы //Астрон. журн.1988. Т. 65, вып. 1. С. 202-204.

8. *Беков А.А.* О существовании и устойчивости точек либрации в ограниченной задаче трех тел с переменными массами // Проблемы физики звезд и внегалактической астрономии. Алматы, 1993. С. 91-111.

9. *Лукьянов Л.Г.* О частных решениях в ограниченной задаче трех тел с переменными массами// Астрон. журн. 1989. Т. 66. Вып. 1. С. 180-187.

10. *Беков А.А.* Об аналогах интеграла Якоби в ограниченной задаче трех тел переменной массы // Труды АФИ. 1987. Т 47. С. 12-29.

11. *Батраков Ю.В.* Периодические движения частицы в поле тяготения вращающегося трехосного эллипсоида// Бюл. ИТА. 1957. Т.6, № 8. С. 524-542.

12. *Журавлев С.Г.* Фотогравитационная ограниченная задача двух тел// Вопросы небесной механики и звездной динамики. Алма-Ата: Наука, 1990. С. 23-28.

13. *Беков А.А.* О движениях частицы в окрестности гравитирующего вращающегося трехосного эллипсоида с переменными физическими параметрами// Труды АФИ. 1992. Т.50. С. 45-61.

14. *Bekov A.A.* Surfaces of zero velocity in the restricted nonstationary photogravitational three-body problem// Transactions of Kazakh-American University. 2001. N 2. P.23-26.

Резюме

Материалдық бөлшегінің қос жұлдыздар жүйелері өрісіндегі қозғалыс қарастырылады, осында сәуле шығарғыш компонентінің баяу өзгерісі негізгі стационарлық емес фотогравитациялық үш және екі дене изотропикалық емес массаның ағыны есебімен қарастырылады. Полярлық және компланарлык шешімдер, жас қос жұлдыздар мен галактикалар жүйелерінің динамикалык және құрылымдық ерекшеліктерін интерпретация мүмкіншілік беру үшін табылды.

Summary

The motion of test body in the external gravitational field of the binary stellar systems with slowly variable some physical parameters of radiating components is considered on the base of restricted nonstationary photogravitational three and two bodies problem with nonisotropic mass flow. The family of polar and coplanar solutions are obtained. These solutions give the possibility of the dynamical and structure interpretation of the binary young evolving stars and galaxies.

Астрофизический институт
им. В.Г.Фесенкова МОН РК,
г. Алматы

Поступила 21.04.2006 г.