



УДК 524.7

Определение замкнутых орбит вокруг трехосных вращающихся галактик энергетическим методом

В.А. Антонов¹, О.А. Железняк², А.А. Терещенко²¹Главная астрономическая обсерватория РАН²Национальный авиационный университет

Исследуется влияние трехосности галактики на форму и ориентацию замкнутых орбит, расположенных вблизи тела галактики, которое моделируется трехосным эллипсоидом. Установлено, что угол наклона замкнутых орбит зависит от величины трехосности галактики.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАМКНЕНИХ ОРБІТ НАВКОЛО ТРИВІСНИХ ГАЛАКТИК, ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ, ЕНЕРГЕТИЧНИМ МЕТОДОМ, Антонов В.А., Железняк О.О., Терещенко А.О. — Досліджується вплив тривісності галактики на форму та орієнтацію замкнених орбіт, що розташовані поблизу тіла галактики, яке моделюється тривісним еліпсоїдом. Встановлено, що кут нахилу замкнених орбіт залежить від величини тривісності галактики.

DETERMINATION OF CLOSED ORBITS AROUND ASYMMETRICAL ROTATING GALAXIES BY AN ENERGY METHOD, by Antonov V.A., Zheleznyak O.O., Tereshchenko A.A. — The influence of galaxy's triaxiality on the form and orientation of closed orbits laying near the central galactic body being modeled by triaxial ellipsoid is investigated. The inclination of closed orbits around a galaxy depends on the galaxy's triaxiality.

Ключевые слова: несимметричное гравитационное поле; галактики; замкнутые орбиты.

Key words: nonsymmetric gravitational field; galaxies; closed orbits.

1. ВВЕДЕНИЕ

Спектральные астрономические исследования показали, что вокруг некоторых эллиптических галактик существуют газопылевые образования в виде дисков и колец [2,4,10]. Часто такие структуры лежат в плоскости, которая не совпадает с главными плоскостями симметрии галактик, т.е. образуют некоторые углы наклона. Наклонные газопылевые диски и кольца вращаются, причем направление их вращения не всегда совпадает с вращением галактик.

Иногда наблюдается явление противотоков, когда галактика вращается в одну сторону, а внешнее газопылевое вещество — в противоположную [3]. В случае, когда газопылевые образования расположены в плоскости, близкой к меридиональной плоскости галактики, они называются *полярными* [1,6,7,12]. Если связывать существование описанных газопылевых структур вокруг эллиптических галактик с орбитальным движением частиц, то возникает необходимость определения параметров замкнутых орбит вокруг вращающихся трехосных галактик. В настоящей работе предложен энергетический метод нахождения замкнутых орбит вокруг трехосной эллиптической галактики, которая имеет форму трехосного эллипсоида, имеющего малую трехосность и медленное вращение (это вполне приемлемое приближение для эллиптических и линзовидных галактик). С точки зрения динамики звездных систем, трехосность галактик может возникнуть благодаря особенностям их вращения и как проявление анизотропии дисперсии скоростей звезд.

Движение частиц в несимметричном поле тяготения трехосной галактики имеет ряд особенностей по сравнению со случаем ротационной симметрии [8,11]. Трехосность приводит к уменьшению количества интегралов движения: из классических интегралов кинетического момента и энергии остается только интеграл энергии, а это в свою очередь влечет за собой разнообразие хаотических и регулярных орбит вокруг таких небесных тел.

Дополнительные особенности в движении частиц может вносить вращение галактик, поскольку при этом возникает асимметрия движения в экваториальной плоскости.

2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАМКНУТЫХ ОРБИТ

Для проведения исследований необходимо во вращающейся системе координат составить функцию Лагранжа L частицы, движущейся в возмущенном гравитационном поле

$$L = T - \Pi = \frac{m}{2} \{ (\dot{x} - \Omega y)^2 + (\dot{y} + \Omega x)^2 + \dot{z}^2 \} + \frac{GMm}{r} + \frac{GMm \cdot \vec{r} \cdot \vec{S} \cdot \vec{r}}{r^5} \quad (1)$$

где $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ — компоненты скорости частицы, T и Π — кинетическая и потенциальная энергия частицы, m — масса частицы, Ω — угловая скорость вращения галактики;

$$S = \frac{1}{10} \begin{pmatrix} 2a^2 - b^2 - c^2 & 0 & 0 \\ 0 & 2b^2 - a^2 - c^2 & 0 \\ 0 & 0 & 2c^2 - a^2 - b^2 \end{pmatrix};$$

a, b, c — полуоси эллипсоида.

В предположении малой трехосности полуоси эллипсоида представим как

$$a = r_0 + a'; \quad b = r_0 + b'; \quad c = r_0 + c',$$

где $r_0 = (abc)^{1/3}$.

Составляется лагранжиан как для обычной кеплеровой орбиты с произвольными параметрами, учитывая ее поворот вместе с галактикой. В этом подходе будем пренебрегать членами с Ω^2 , принимая медленное вращение галактики. Удобно ввести средние величины по орбите:

$$\left\langle \frac{1}{r} \right\rangle = \frac{1}{a_0}.$$

Из теоремы о вириале следует

$$\langle \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 \rangle = \frac{GM}{a_0}.$$

Для средних от возмущений гравитационного потенциала при обычной ориентации кеплеровой орбиты, когда она лежит в экваториальной плоскости галактики, ось Ox направлена в ее перигентр, имеем

$$\left\langle \frac{x^2}{r^5} \right\rangle = \left\langle \frac{y^2}{r^5} \right\rangle = \frac{1}{2a_0^3(1-e^2)^{3/2}}; \quad \left\langle \frac{z^2}{r^5} \right\rangle = 0. \quad (2)$$

Обобщая (2) на произвольную ориентацию орбиты, выразим возмущение потенциала через кинетический момент:

$$\langle \delta\Phi \rangle = -\frac{GM}{2a_0^3(1-e^2)^{3/2}} \cdot \frac{\vec{K} \cdot \vec{S} \cdot \vec{K}}{K^2} = -\frac{(GM)^{5/2}}{2a_0^{3/2}} \cdot \frac{\vec{K} \cdot \vec{S} \cdot \vec{K}}{K^5} \quad (3)$$

Входящие в кинетическую энергию члены, которые содержат Ω в первой степени, выражаются через интеграл площадей

$$x\dot{y} - y\dot{x} = K_z; \quad \Omega(x\dot{y} - y\dot{x}) = \vec{\Omega} \cdot \vec{K}.$$

При рассмотрении вариации от интеграла действия $\int L dt$ достаточно ограничиться возмущениями, сохраняющими периодический характер орбиты. В нулевом приближении интеграл действия остается постоянным при фиксированном периоде орбиты и соответственно фиксированной большой полуоси a_0 , потому подлежат вариации только члены, содержащие a', b', c' и Ω , точнее, ищем экстремум выражения

$$\langle \delta L \rangle = m \left[\Omega K_z - \frac{(GM)^{5/2}}{2a_0^{3/2}} \cdot \frac{\vec{K} \cdot \vec{S} \cdot \vec{K}}{K^5} \right] \quad (4)$$

по допустимым выражениям компонент K_x, K_y, K_z . Отметим, что в нашем приближении вектор Лапласа не входит в (4) и поэтому ориентация эллиптической орбиты в ее плоскости остается произвольной. Для эллиптических орбит вариации всех компонент \vec{K} можно считать независимыми: 1) компонента \vec{K} , перпендикулярная плоскости орбиты, меняется при вариации e ; 2) компоненты, параллельные этой плоскости, связаны с наклоном орбиты. Для круговых орбит появляется дополнительное соотношение:

$$K_x \delta K_x + K_y \delta K_y + K_z \delta K_z = 0, \quad (5)$$

поскольку в данном случае $\delta(1-e^2) = 2e\delta e$.

Рассмотрим возможность существования вокруг вращающейся трехосной галактики замкнутых *экваториальных орбит*. Для них $K_x = K_y = 0$ и вариация (4) по K_x и K_y также равна нулю. В случае эллиптических орбит остается (4) продифференцировать по K_z , что даст

$$\Omega = -\frac{9c'r_0 \cos i}{10a_0^3(1-e^2)^2} \left(\frac{GM}{a_0} \right)^{1/2}.$$

Для круговых экваториальных орбит из (5) получаем $\delta K_z = 0$ и ограничение на величину a_0 отсутствует.

Наклонные орбиты могут также быть круговыми и эллиптическими. Уравнения, из которых определяются круговые наклонные орбиты, имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial \langle \delta L \rangle}{\partial K_x} = \frac{m(GM)^{5/2}}{a_0^{3/2}} \left(\frac{5}{2} \frac{\vec{K} \cdot \vec{S} \cdot \vec{K}}{K^7} - \frac{3}{5} \frac{r_0 a'}{K^5} + \lambda \right) K_x = 0, \\ \frac{\partial \langle \delta L \rangle}{\partial K_y} = \frac{m(GM)^{5/2}}{a_0^{3/2}} \left(\frac{5}{2} \frac{\vec{K} \cdot \vec{S} \cdot \vec{K}}{K^7} - \frac{3}{5} \frac{r_0 b'}{K^5} + \lambda \right) K_y = 0, \\ \frac{\partial \langle \delta L \rangle}{\partial K_z} = \frac{m(GM)^{5/2}}{a_0^{3/2}} \left(\frac{5}{2} \frac{\vec{K} \cdot \vec{S} \cdot \vec{K}}{K^7} - \frac{3}{5} \frac{r_0 c'}{K^5} + \lambda \right) K_z + m\Omega = 0. \end{cases} \quad (6)$$

где λ — неопределенный множитель Лагранжа, появляющийся вследствие связи (5).

Из (6) видно, что K_x и K_y не могут одновременно отличаться от нуля, иначе в (6) на K_x и K_y можно было бы сократить и получить противоречие с нашим условием трехосности $a' \neq b'$. Итак, либо $K_x = 0$, $K_y \neq 0$, или $K_y = 0$, $K_x \neq 0$. В первом случае восходящий узел лежит на оси Ох, а во втором — на оси Оу. В первом случае находим λ из второго равенства (6) и подставляем в третье. Тогда

$$\Omega = -\frac{3}{5} \frac{r_0(b' - c') \cos i}{a_0^3} \left(\frac{GM}{a_0} \right)^{1/2}$$

Во втором случае вместо $(b' - c')$ нужно подставить $(a' - c')$.

Наконец, для эллиптических наклонных орбит $\lambda = 0$, тогда из второго равенства (6) находим угол наклона для орбит, проходящих через ось Ох:

$$i = \arctg \left(\frac{2}{3} - \frac{5}{3} \frac{c'}{b'} \right)^{1/2}$$

Если орбиты проходят через Оу, то в последней формуле b' меняется на a' .

Таким образом, энергетический метод показывает, что наклон эллиптических орбит зависит от трехосности галактик, причем такие орбиты существуют при условии $\frac{c'}{b'} < \frac{2}{5}$, либо при $\frac{c'}{a'} < \frac{2}{5}$.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенных исследований найдены различные семейства замкнутых орбит вокруг трехосных эллиптических галактик. В одних случаях они могут быть экваториальными, а в других — наклонными. Как те, так и другие могут быть круговыми или эллиптическими, причем для различных трехосностей наклон орбит определяется соотношением больших полуосей эллипсоида, описывающего форму галактики. Необходимо распространить исследования на произвольную величину трехосности галактик, хотя из наблюдательных данных известно, что она достигает нескольких процентов. Что касается скорости вращения, то она для эллиптических галактик не постоянна, а зависит от расстояния до ее центра.

Образования газопылевых структур связано с взаимодействием частиц между собой. В связи с этим в газопылевом кольце происходит перераспределение углового момента и диссипация энергии [5, 9]. По этой причине в точных динамических расчетах необходим учет градиента давления и вязкости газопылевой среды.

1. *Arnaboldi M., et al.* Studies of narrow polar rings around E galaxies. I. Observations and model of AM 2020-504 // 1993. — *Astron. Astroph.* — **267**. — P.21-30.
2. *Arnaboldi M., et al.* New HI observations of the prototype polar ring galaxy NGC 4650A // 1997. — *Astron. J.* **113**, №2. — P.585-598.
3. *Bettoni D., et al.* The gas content of peculiar galaxies: Counterrotators and polar rings // 2001. — *Astron. Astroph.* — **374**. — P.421-434.
4. *Charmandaris V., Combes F., van der Hulst J.M.* Shells and rings around galaxies // 2000. — *Astron. Astroph. Lett.* — **356**. — P.L1-L4.
5. *Christodoulou D.M., Katz N., Rix H.-W., Habe A.* Dynamical evolution of highly inclined rings // 1992. — *Ap. J.* — **395**. — P.113-118.
6. *Combes F., et al.* Molecular clouds in a polar ring // 1992. — *Astron. Astroph. Lett.* — **259**. — P.L65-L68.
7. *Galletta G., Sage L.J., Sparke L.S.* Molecular gas in polar-ring galaxies // 1997. — *MN RAS.* — **284**. — P.773-784.
8. *Katz N., Richstone D.O.* Orbital characteristics of polar rings of galaxies // 1984. — *Astron. J.* — **89**, №7. — P.975-978.
9. *Katz N., Rix H.-W.* Cooling and longevity of polar rings // 1992. — *Ap. J. Lett.* — **389**. — P.L55-L58.
10. *Kruman N., van Driel W., van Woerden H.* Distribution and motions of atomic hydrogen in lenticular galaxies. IV. A ring of HI around NGC 4262 // 1985. — *Astron. Astroph.* — **144**. — P.202-210.
11. *Pearce F.R., Thomas P.A.* Ring formation in triaxial potentials // 1991. — *MN RAS.* — **248**. — P.688-700.
12. *Whitmore B., et al.* New observations and a photographic atlas of polar-ring galaxies // 1990. — *Astron. J.* — **100**. — №5. — P.1489-1522.

Поступила в редакцию 19.10.2012