

УДК 521.135

Исследование модельной системы, описывающей вековую эволюцию
«резонансных» объектов пояса Койпера

С.С. Ефимов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Поясом Койпера называют область Солнечной системы за орбитой Нептуна, простирающуюся на расстояние примерно в 50 а.е. от Солнца [1]. Важной динамической особенностью пояса Койпера является относительная распространенность объектов, находящихся в резонансе средних движений (РСД) с Нептуном. Самыми многочисленными из них являются плутино, совершающие два оборота вокруг Солнца за время трех оборотов Нептуна (резонанс 2:3).

Поведение системы при резонансе средних движений характеризуется наличием динамических процессов трех временных шкал: «быстрых», «полубыстрых» и «медленных». Они соответствуют орбитальному движению, изменению резонансной фазы φ (комбинации средних долгот и некоторых оскулирующих элементов [1]) и вековой эволюции орбиты малого тела. Интерес, при этом, представляют только два последних процесса. Поэтому от орбитального движения избавляются, проведя усреднение по периоду. Математически это эквивалентно исключению всех гармоник из разложения потенциала возмущающей функции, содержащих средние движения рассматриваемых объектов. В результате потенциал задачи получается рядом, состоящим из тригонометрических функций от резонансной фазы. При разложении до второго порядка по эксцентриситетам и наклонениям для резонанса 2:3, он сводится к виду:

$$W(x, y, \varphi) = x \cos \varphi + y \sin \varphi + \cos 2\varphi.$$

Переменные x и y здесь описывают «медленные» процессы. Гамильтониан системы при этом равен

$$\Xi(x, y, \varphi, \Phi) = \frac{\Phi^2}{2} + W(x, y, \varphi),$$

имея в виду симплектическую структуру $\omega = \varepsilon dy \wedge dx + d\Phi \wedge d\varphi$, где ε – малый параметр.

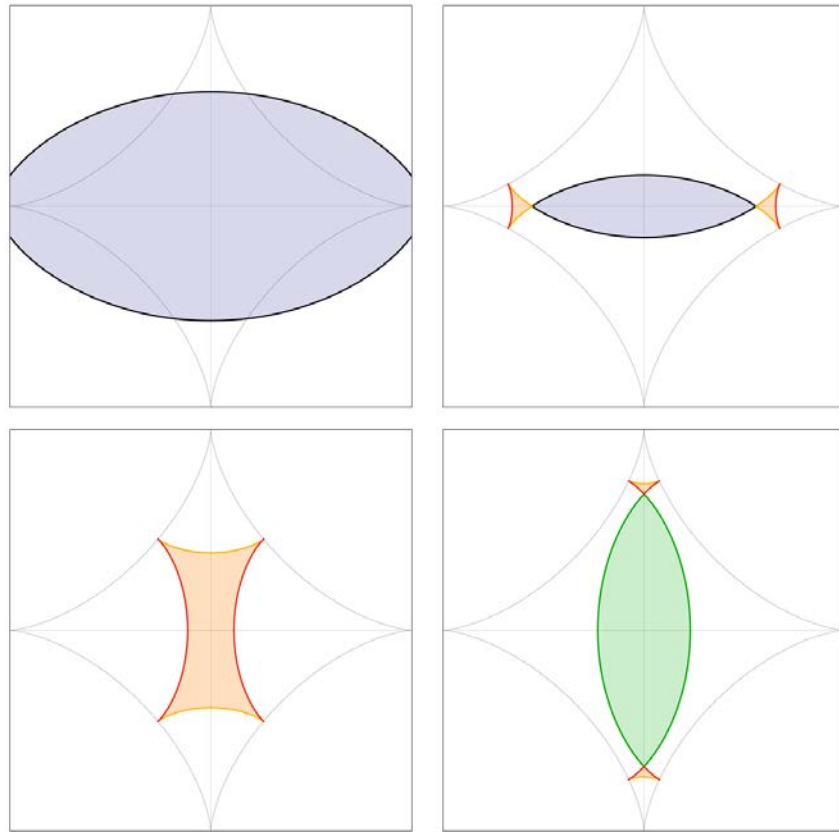


Рис. 1. Области «особых» движений. Зелёным обозначена зона вращения, черным – зона невозможного движения, оранжевым – зона двух колебательных решений.

В зависимости от значений «медленных» переменных и уровня $\Xi = \xi$ характер зависимости резонансной фазы от времени может быть разным. По этому признаку можно поделить плоскость xu на зоны. Так, помимо областей обычных периодических колебаний, существуют области монотонного изменения φ (вращение), области, в которых движение невозможно, а также области, в которых могут существовать два различных колебательных решения для φ (колебания в окрестности двух различных локальных минимумов). Примеры регионов с такими «особыми» движениями для различных уровней ξ представлены на рис. 1. Область невозможного движения существует при значениях $\xi < -1$, вращательных движений – при $\xi > 1$, область с двумя колебаниями – при $\xi \in (-3; 3)$. В трёхмерном пространстве $xu\xi$ границы областей образуют поверхности, изображенные на рис. 2.

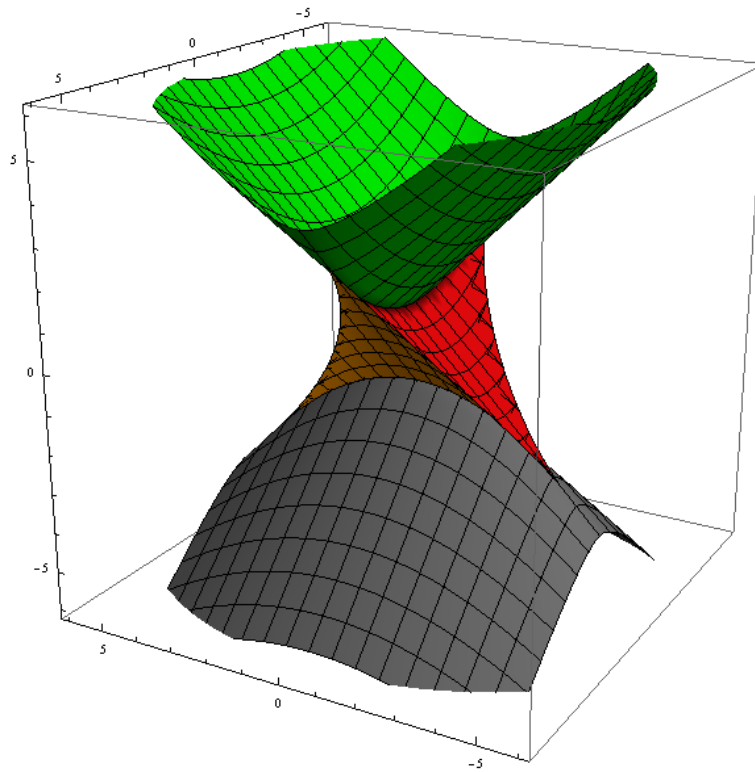


Рис. 2. Трёхмерное представление границ областей «особых» движений.

При помощи метода усреднения были построены эволюционные уравнения для «медленных» переменных и получены соответствующие фазовые портреты. Важным результатом здесь является существование стационарных точек при $\xi > 1$. Они изображены на рис. 3.

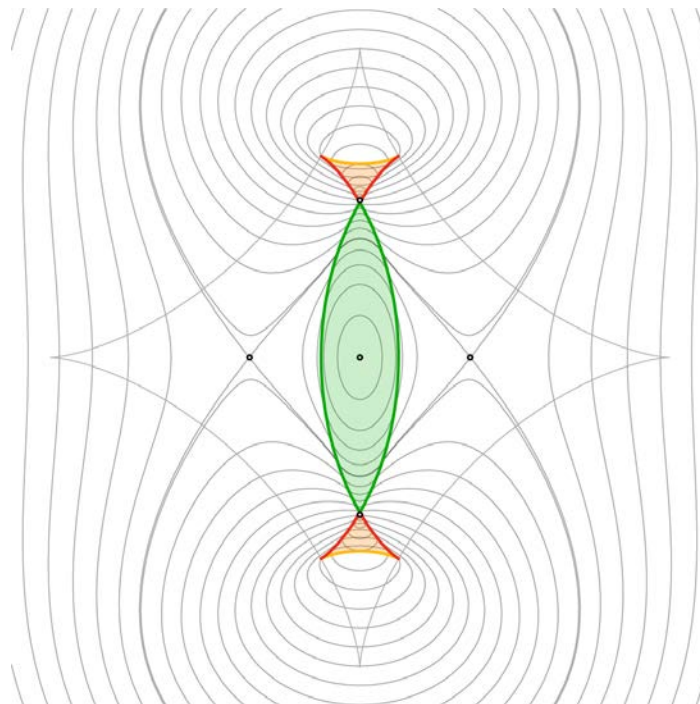


Рис. 3. Фазовый портрет в пространстве «медленных» переменных.
Кружочками отмечены положения равновесия.

Вблизи краев областей «особых» движений нарушаются условия применимости использованных приближений, из-за чего при прохождении через границу траектория испытывает некоторый квазислучайный скачок [2]. В результате серии таких скачков, с учетом наличия описанных выше стационарных точек, поведение «медленных» переменных может качественно измениться. Так, при пересечении сепаратрисы (рис. 4), объект из синей области может перейти в красную, оказавшись на траектории, уходящей в область с большими наклонениями (им соответствуют большие значения y).

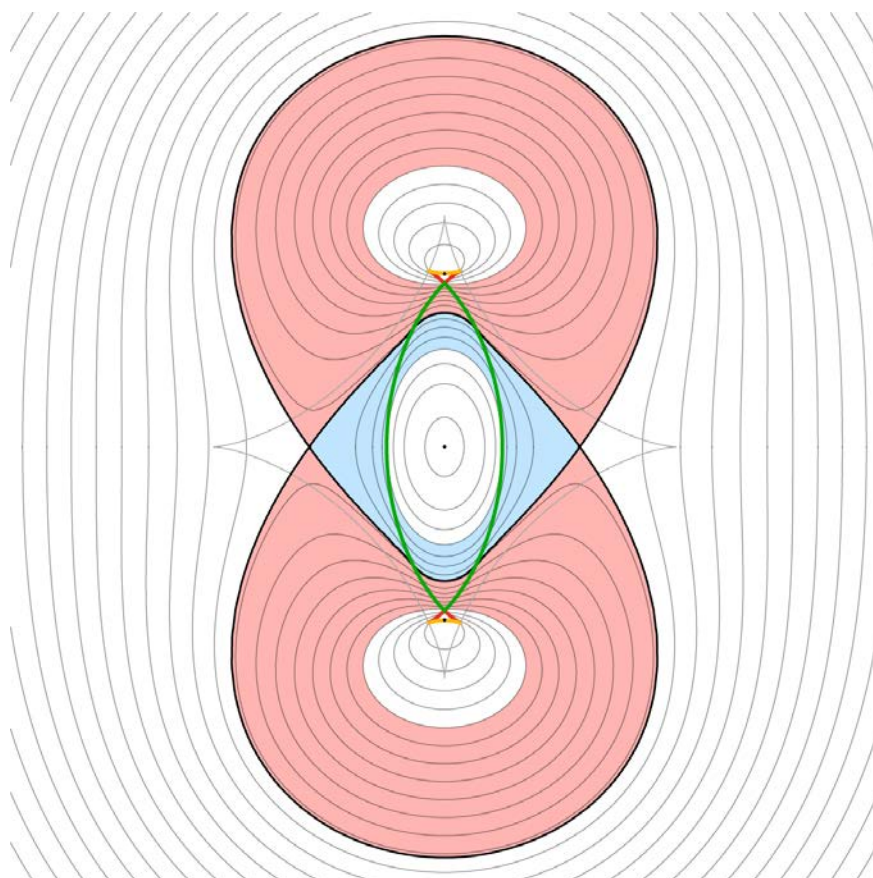


Рис. 4. Два семейства траекторий, пересекающих область вращений φ

Это даёт основание полагать, что РСД лежит в основе механизма, ответственного за появление в поясе Койпера объектов, движущихся под большими углами к плоскости эклиптики.

Литература

1. *Мюррей К., Дермотт С.* Динамика Солнечной системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 588 с.
2. *Sidorenko V.V., Neishtadt A.I.* Wisdom system: Dynamics in the adiabatic approximation. – *Celestial mechanics and dynamical astronomy.* – 2004. – 90(3). – С. 307-330.