АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 5 НОЯБРЬ, 1969 ВЫПУСК 4

ОБРАЗОВАНИЕ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ ПРИ ТРОЙНЫХ СБЛИЖЕНИЯХ

Т. А. АГЕКЯН, Ж. П. АНОСОВА, В. Н. БЕЗГУБОВА

Поступила 16 апреля 1969

Рассмотрен вопрос о вероятности образования двойных систем при случайном сближении трех гравитирующих тел. Численные решения уравнений движения выполнены на ЭВМ. В рассмотренной случайной выборке 1600 тройных сближений, 656 сближений завершились образованием двойных систем. Вероятность образования двойной звезды зависит от характеристики H—отношения полной энергии системы к абсолютному значению потенциальной энергии в момент наибольшего тройного взаимодействия. Кроме того, наибольшая вероятность образования двойных систем соответствует случаю, когда расстояния между телами в момент наибольшего тройного взаимодействия сравнимы между собой.

Проблема образования двойной системы при сближении трех гравитирущих тел, хотя и является классической по своему характеру, еще мало изучена. В 1937 году В. А. Амбарцумян [1] указал на реальность такого процесса. Тем не менее существовало и, основывающееся главным образом на работах Шази, убеждение в невозможности захвата при сближении трех тел. В 1947 году О. Ю. Шмидт [2] привел численный пример, иллюстрирующий возможность захвата. В работах Г. Ф. Хильми [3], Г. А. Мермана [4, 5] и В. Ф. Проскурина [6] эта возможность была теоретически обоснована.

Вопрос о вероятности образования двойной системы при случайном сближении трех гравитирующих тел был рассмотрен Р. А. Саакяном [7], показавшим, что эта вероятность отлична от нуля. В работе [7] ввиду сложности аналитического изучения задачи рассматривался лишь случай, когда при сближении трех тел одно из расстояний во много раз меньше двух других расстояний между телами.

В настоящее время благодаря использованию ЭВМ имеется возможность исследовать поставленную задачу, не делая каких-либо ограничений.

Характеристика тройного сближения, определяющая вероятность образования двойной системы. В работах [8—10] было установлено, что распад тройной системы с отрицательной энергией практически всегда происходит после тесного *тройного* сближения тел, то есть такого сближения, когда все три расстояния между телами сравнимы между собой. Практически не было случаев распада после тесного двойного сближения при присутствии на некотором отдалении третьего тела. Можно поэтому предвидеть что и в задаче образования двойных систем при тройных сближениях более эффективны сближения, характеризующиеся сильным *тройным* взаимодействием.

В процессе тройного сближения потенциальная энергия тройной системы по абсолютной величине сначала растет, достигает максимума (максимумов может быть два), а затем, если не образовалась двойная система, убывает, стремясь к нулю.

Взаимодействие между двумя телами тем сильнее, чем больше в данный момент по абсолютной величине их взаимная потенциальная энергия. Однако, было бы неправильным утверждать, что и *тройное* взаимодействие тем сильнее, чем больше в данный момент по абсолютной величине потенциальная энергия тройной системы. Часто максимум абсолютной величины потенциальной энергии будет достигаться в момент тесного сближения двух тел при относительной отдаленности третьего тела. В этот момент будет сильное двойное взаимодействие, а не тройное.

Уместно считать, что наиболее сильное тройное взаимодействие при сближении происходит в момент, когда достигает минимума сумма квадратов расстояний между телами

$$\lambda = \sum_{i \neq j} r_{i,j}^2. \tag{1}$$

Так как образованию двойной системы способствует сильное тройное взаимодействие, то естественно предполагать, что образование двойной системы при тройном сближении тем более вероятно, чем больше абсолютная величина потенциальной энергии

$$-U_1 = Gm^2 \sum_{i \neq j} \frac{1}{r_{i,j}} \tag{2}$$

в момент, когда λ достигает минимума.

С другой стороны, чем больше полная положительная энергия E тройной системы сближающихся тел, тем меньше должна быть вероятность образования двойной системы.

Поэтому можно предвидеть, что основной характеристикой сближения, определяющей вероятность образования двойной системы, является величина H — отношение полной энергии системы к абсолютной величине потенциальной энергии системы в момент, когда λ достигает минимума.

$$H = \frac{E}{-U_1} = \frac{T_0 + U_0}{-U_1}. \tag{3}$$

Здесь T_0 и U_0 — соответственно, кинетическая и потенциальная энергия системы в некоторый момент, который можно принять за начальный.

Чем больше H, тем вероятность образования двойной системы должна быть меньше.

Примем массы тел равными единице. Если единицы расстояния и времени принять равными отвлеченным единицам, то $G = 6{,}67 \cdot 10^{-8}$.

Применение метода Монте-Карло и результаты. Для получения представительной случайной выборки начальных условий рассмотрим с некоторого (начального) момента прицельные движения сближающихся тел, т. е. движения, которые происходили бы при отсутствии сил взаимодействия. Начало координат совместим с центром инерции системы. Точку на прицельной прямой, ближайшую к началу координат, назовем прицельной точкой тела. Проведем плоскость XOY через прицельные точки первого и второго тела, а ось OX через прицельную точку первого тела. Расстояние этой точки от начала координат примем за единицу длины. Полярные координаты прицельной точки второго тела обозначим ρ и φ. Скорость прицельного движения первого и второго тела обозначим, соответственно, v и $k \cdot v$, углы между векторами скоростей первого и второго тела и плоскостью XOY — α_1 и α_2, а моменты прохождения первым и вторым телом своих прицельных точек — t_1 и $t_1 + \tau$.

Уравнения прицельного движения первой звезды имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= 1, \\ y_1 &= -v \cos \alpha_1 \cdot (t - t_1), \\ z_1 &= -v \sin \alpha_1 \cdot (t - t_1), \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

второй звезды —

$$\left.\begin{aligned} x_2 &= \rho\cos\varphi + kv\cos\alpha_2\cdot\sin\varphi\cdot(t - t_1 - \tau), \\ y_2 &= \rho\sin\varphi - kv\cos\alpha_2\cdot\cos\varphi\cdot(t - t_1 - \tau), \\ z_2 &= -kv\sin\alpha_2(t - t_1 - \tau), \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

и третьей —

$$\left.\begin{aligned} x_3 &= -x_1 - x_2, \\ y_3 &= -y_1 - y_2, \\ z_3 &= -z_1 - z_2, \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

Величины α_1, α_2 и φ задавались как случайные, равномерно распределенные в промежутке $[0,2\pi]$. Величина k получалась при помощи равенства $\beta = \ln k$, в котором β принималось случайным равномерно распределенным в промежутке $[-1, +1]$. Случайная величина ρ задавалась в промежутке $[0,1]$ с плотностью вероятности 2ρ, а τ как равномерно распределенная в промежутке $[-1/2v, +1/2v]$.

Чтобы получить достаточный диапазон значений H, вводилась вспомогательная величина

$$L = \frac{T_0}{2G}.$$

Так как в начальный момент счета тела находятся еще далеко друг от друга, то $|-U_0| \ll T_0$. В момент же, когда λ достигает минимума, тела находятся недалеко от своих прицельных точек. Поэтому величина L не должна намного отличаться от H. Если значения L выбирать в достаточно широком интервале, то будет обеспечен и достаточный ранг значений H.

Значения L задавались равными $L = 0.05$, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.40, 0.50, 0.75, 1.00, 2.00, 3.00, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00. Для каждого из этих значений L рассматривалось 100 случайных начальных условий. Таким образом всего были выполнены вычисления для 1600 случайных тройных сближений.

После получения случайных величин α_1, α_2, ρ, φ, k знание фиксируемой L определяло по очевидной формуле

$$v^2 = \frac{8GL}{3(1 + k^2)}$$

скорость первой звезды, после чего можно было получить значение случайной величины τ.

За начальный момент интегрирования принимается момент t_0, когда до сближения расстояние между наиболее медленно движущимся телом и его прицельной точкой равно 10. Начальные координаты и компоненты скорости определялись при помощи равенств (4)—(6). Всякий раз для начального момента производилась проверка знака полной энергии тройной системы и знаков энергий каждой из трех пар тел, которые можно выделить в системе. Если хоть одна из этих энергий оказывалась отрицательной, вычисление с данными начальными условиями не выполнялось.

Численное интегрирование уравнений истинных движений тел выполнялось с контролями: постоянство полной энергии и главного момента количества движения системы и неподвижность ее центра инерции. Вычисление заканчивалось в момент, когда после сближения тел расстояние одного из них от центра инерции становилось равным 15 единицам расстояния. В момент, когда в ходе истинного движения величина λ достигала минимума, определялась потенциальная энергия U_1, что позволяло найти H.

Из общего числа 1600 случайных тройных сближений 656 завершились образованием двойной системы. Табл. 1 показывает число рассмотренных сближений N, имеющих данное значение H, число образовавшихся при этом двойных систем n и относительную частоту образования двойных систем n/N, которая должна быть близка к вероятности образования двойных систем при данном H.

Таблица 1

H	N	n	n/N
<0.2	278	208	0.75
0.2— 0.4	165	108	0.66
0.4— 0.6	147	88	0.60
0.6— 0.8	100	57	0.57
0.8— 1.2	159	85	0.54
1.2— 2.0	169	62	0.37
2.0— 3.0	98	26	0.27
3.0— 4.0	104	14	0.14
4.0— 6.0	122	5	0.14
6.0—23.0	258	3	0.01
	1600	656	

Таблица показывает, что вероятность захвата, действительно, сильно зависит от значения характеристики H. Наиболее интересным, по-видимому, результатом является большая вероятность захвата. Она не очень мала даже в тех случаях, когда полная энергия сближения в несколько раз превосходит абсолютную величину потенциальной энергии в момент сильного тройного взаимодействия.

Табл. 2 дает распределение N, n и n/N в зависимости от отношения наибольшего расстояния к наименьшему — r_{max}/r_{min} в момент сильного тройного взаимодействия.

Таблица 2

r_{max}/r_{min}	N	n	n/N
1.0— 1.4	118	39	0.33
1.4— 1.8	290	114	0.39
1.8— 2.2	338	152	0.45
2.2— 2.6	231	108	0.47
2.6— 3.0	154	74	0.48
3.0— 3.4	135	66	0.49
3.4— 3.8	62	26	0.42
3.8— 4.6	93	30	0,32
4.6— 6.0	84	27	0.32
6.0—10.0	70	16	0.23
10.0—20.0	25	4	0.16

Наибольшая относительная частота и, следовательно, вероятность образования двойных систем приходится на область значений r_{max}/r_{min} — [1,8—3,4], что соответствует случаю, когда расстояния между телами в момент наибольшего тройного взаимодействия сравнимы, но не почти равны. Интересно, что в тех случаях, когда расстояния наибольшего взаимодействия почти одинаковы, относительная

Таблица 3

e	n	e	n
0.0—0.1	2	0.5—0.6	56
0.1—0.2	7	0.6—0.7	84
0.2—0.3	17	0.7—0.8	70
0.3—0.4	26	0.8—0.9	123
0.4—0.5	39	0.9—1.0	231

частота захватов несколько меньше. Еще меньше она в тех случаях, когда одно из расстояний между телами намного уступает двум другим.

Табл. 3, дающая распределение эксцентриситетов в образовавшихся двойных, показывает, что плотность вероятности монотонно и сильно растет с увеличением e.

Таблица 4

a	n	a	n
<1.0	12	7.0— 8.0	27
1.0—2.0	59	8.0— 10.0	37
2.0—3.0	99	10.0— 14.0	27
3.0—4.0	128	14.0— 20.0	20
4.0—5.0	93	20.0— 30.0	17
5.0—6.0	66	30.0— 100.0	19
6.0—7.0	38	100.0—2510.0	14

В табл. 4 представлено распределение больших полуосей у образовавшихся пар.

Обнаруживается отчетливый максимум в области $3 < a < 4$.

Астрономическая обсерватория
ЛГУ

FORMATION OF BINARY SYSTEMS IN TRIPLE ENCOUNTERS

T. A. AGEKIAN, J. P. ANOSOVA, B. N. BEZGUBOVA

The probability of formation of binary systems as a result of triple encounters of stars is investigated. The numerical solutions of equations of motion is obtained using a computer in the sample of 1600 chance initial conditions. 656 encounters were accomplished with the formation of binary systems. The probability of binary system formation depends on value H — the ratio of the system total energy to the absolute value of potential energy in the moment of the strongest triple interaction. Besides the greatest probability of binary system formation corresponds to the cases when three distances between the stars in the moment of the strongest triple interaction are comparable.

ЛИТЕРАТУРА

1. *В. А. Амбарцумян*, Астрон. ж., 14, 3, 1937.
2. *О. Ю. Шмидт*, ДАН СССР, 58, № 2, 1947.
3. *Г. Ф. Хильми*, Проблема *n* тел в небесной механике и космогонии. Изд. АН СССР, 1951.
4. *Г. А. Мерман*, Бюлл. ИТА, 5, 325, 1953.
5. *Г. А. Мерман*, Бюлл. ИТА, 5, 373, 1953.
6. *В. Ф. Проскурин*, Бюлл. ИТА, 5, 429, 1953.
7. *Р. А. Саакян*, О вероятности захвата в задаче трех тел, АН АрмССР, 1961.
8. *Т. А. Агекян, Ж. П. Аносова*, Астрон. ж., 44, 126, 1967.
9. *Т. А. Агекян, Ж. П. Аносова*, Астрофизика, 4, 31, 1968.
10. *Ж. П. Аносова*, Астрофизика, 5, 161, 1969.