

Литература

1. *Серегин В.В., Кукулиев Р.М.* Лазерные гиометры и их применение. М., 1990.
2. *Bilger H.R., Stedman G.E., Li Z. et al.* // IEEE Trans. Instrum. and Measur. 1995. 44, N2. P.468.
3. *Stedman G.E., Bilger H.R., Li Z. et al.* // Aust. J. Phys. 1993. 46. P.87.
4. *Жаров В.Е., Маркова С.Н., Сажин М.В., Федосеев Е.Н.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1992. №1. С. 85 (Moscow University Phys. Bull. 1992. N1. P.86).

5. *Жаров В.Е., Крайнов В.А., Маркова С.Н., Сажин М.В.* // Там же. 1995. №3. С. 81.
6. *Chow W.W., Gea-Banacloche J., Pedrotti L.M. et al.* // Rev. Mod. Phys. 1985. 57, N1. P.61.
7. *Ананьев Ю.А.* Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М., 1979.

Поступила в редакцию
06.05.96

АСТРОНОМИЯ

УДК 524.388

**ИЕРАРХИЧЕСКИЕ ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ
МАКСИМАЛЬНОЙ НАСЕЛЕННОСТИ**

В.Г.Сурдин
(ГАИШ)

Показано, что в Галактике могут существовать иерархические звездные системы, содержащие десятки компонентов. Их поиск возможен с помощью космических астрометрических инструментов и обещает при положительном исходе дать ценнейший материал для звездной космогонии.

1. Введение

Все звезды являются членами звездных систем — двойных и кратных звезд, рассеянных и шаровых скоплений, галактик. За исключением двойных звезд, каждая из этих систем может иметь один из двух типов внутренней организации: иерархический или хаотический. Двойные системы в этом смысле представляют вырожденный случай, обладающий крайней степенью устойчивости. Внутренняя структура систем, начиная с тройных, может быть представлена двумя характерными типами — иерархическим и хаотическим. Пример кратной звезды хаотического типа (С-системы) дает Трапеция Ориона, у которой взаимные расстояния между ее четырьмя звездами одного порядка. Эти системы крайне неустойчивы и распадаются за время, близкое к динамическому. Существуют также кратные системы иерархического типа (Н-системы), обладающие асимптотической устойчивостью. Примеры таких систем дают нам кратные звезды типа ϵ Луг, состоящие из двух относительно тесных пар, разделенных значительным расстоянием (рис.1). На каждом уровне иерархии динамика такой системы близка к динамике двойной звезды.

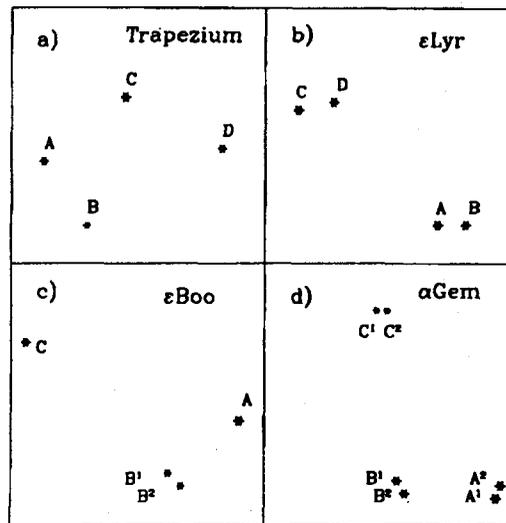


Рис.1. Примеры С- и Н-систем: а) 4-кратная хаотическая система Трапеция Ориона; б) и в) 4-кратные иерархические системы ϵ Лир и ϵ Волопаса двух крайних типов упаковки: ϵ Луг относится к типу $(n + n)$ и имеет два уровня иерархии ($H = 2$), а ϵ Вово принадлежит к типу $(n + 1)$ и имеет $H = 3$; д) 6-кратная Н-система α Близнецов (Кастор) имеет промежуточный тип упаковки и $H = 3$. Масштаб на рисунках б), в) и д) не выдержан.

Подавляющее большинство известных звездных систем относится к хаотическому типу: от трапедий и рассеянных скоплений до галактик (табл. 1). Систем же иерархических известно значительно меньше — это кратные звезды, содержащие до 6 членов. Таким образом, хотя известны многочисленные примеры С-скоплений (например, рассеянные и шаровые), мы пока не обнаружили Н-скоплений, что, естественно, требует обсуждения.

Таблица 1
Параметры хаотических звездных систем

Тип системы	Число членов	Время жизни (лет)
Кратные системы типа		
Трапедии	2 – 10	$10^4 - 10^6$
Звездные ассоциации	$10 - 10^3$	$10^6 - 10^7$
Рассеянные скопления	$50 - 10^4$	$10^8 - 10^9$
Шаровые скопления	$10^4 - 10^6$	$10^{10} - 10^{11}$
Карликовые галактики	$10^5 - 10^9$	$10^{12} - 10^{14}$
Нормальные галактики	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{14} - 10^{16}$

В космогоническом смысле Н-системы значительно информативнее С-систем, поскольку первые описываются большим количеством устойчивых параметров, имеющих отношение к процессу формирования: например, отношением масс и орбитальными параметрами компонентов одного уровня иерархии, соотношением этих величин на соседних уровнях иерархии, соотношением кратности и населенности системы (рис. 2) и т.п. Напротив, С-системы, имеющие хаотическую структуру, описываются лишь несколькими крупномасштабными параметрами (масса, центральная плотность, степень концентрации), сравнительно быстро эволюционирующими со временем и не сохраняющими информацию о процессе формирования системы.

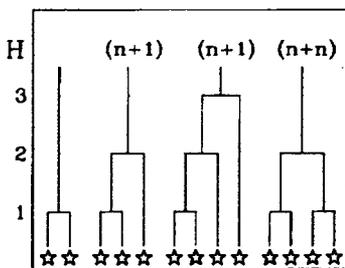


Рис.2. Структуры простейших иерархических звездных систем. H — уровень иерархии. Начиная с 4-кратных систем возможны два предельных типа упаковки: максимально плотный $(n+n)$ и минимально плотный $(n+1)$

Именно поэтому Н-системы столь ценны для космогонии. Чем больше уровней иерархии в такой системе, тем больший диапазон истории своего формирования они “помнят”. Однако обнаружение Н-систем связано со значительно большими трудностями, чем С-систем. Дело в том, что с увеличением числа звезд (N) их поверхностная плотность в Н-системах убывает, тогда как в С-системах, как правило, возрастает. Выделение членов системы на фоне звезд поля также значительно проще для С-систем, члены которых имеют лучевые скорости и собственные движения одного порядка, тогда как в Н-системах скорости взаимного движения быстро

убывают с переходом к более высоким уровням иерархии. Поэтому очевидно, что известные нам примеры Н-систем (рис. 3) со значениями $H \leq 3$ не исчерпывают всего многообразия этих систем.

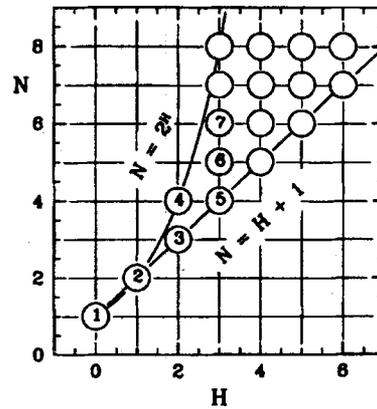


Рис.3. Диаграмма “кратность — иерархичность”. Здесь N — число звезд в Н-системе (кратность), H — степень иерархии системы. Примеры систем: 1 — все одиночные, 2 — все двойные, 3 — все тройные, 4 — ϵ Лyr, 5 — ϵ Boo, 6 — ζ UMa + 80 UMa (система Мизар—Алькор, где Мизар сам представляет собой систему типа ϵ Лyr), 7 — Кастор.

Чем более заполненной наблюдательными примерами окажется NH -диаграмма (рис. 3), тем точнее мы сможем понять процесс коллапса и фрагментации протозвездного вещества [1]. В данной заметке мы обсудим возможность существования высоконаселенных звездных Н-систем (т.е. Н-скоплений) в условиях Галактики и перспективы их обнаружения.

2. Характеристики иерархических систем

Н-скопление характеризуется количеством входящих в него звезд (N) и максимальным уровнем иерархии в их объединении (H). Связь между этими параметрами зависит от типа упаковки и существует в пределах от $N = H + 1$ для систем наименее плотной упаковки типа $(n+1)$ до $N = 2^H$ для систем наиболее плотной упаковки типа $(n+n)$ (см. рис.3). Важной характеристикой системы, отвечающей за ее устойчивость во внешнем приливном поле, является ее средняя плотность. Если все звезды имеют одинаковую массу m , а также одинаковые эксцентриситеты всех орбит в системе (e) и отношения больших полуосей орбит на соседних уровнях иерархии ($k = a_{i+1}/a_i$), то средняя плотность массы в скоплении типа $(n+1)$ составляет

$$\rho_{n+1} = \frac{3mN^4 k^6}{32\pi [a(1+e)(N-1)k^N]^3}, \quad (1)$$

а в скоплении типа $(n+n)$ соответственно

$$\rho_{n+n} = \frac{3mN(k-1)^3}{4\pi [a(1+e)N \log_2 k]^3}, \quad (2)$$

где a — полуось двойных систем первого уровня иерархии (т.е. минимальная полуось системы).

3. Устойчивость системы во внешнем поле

Распад звездной системы в регулярном приливном поле Галактики происходит при выполнении условия

Роша [2]:

$$\rho \leq \frac{9M_G(R)}{4\pi R^3}, \quad (3)$$

где $M_G(R)$ — масса Галактики в пределах радиуса галактической орбиты системы (R). Для модели Галактики в виде сингулярной изотермической сферы, в которой круговая скорость V_c постоянна, имеем

$$M_G(R) = \frac{RV_c^2}{G}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) при $V_c = 220$ км/с получим выражение для критической плотности системы:

$$\rho_c = 8 \left(\frac{R}{1 \text{ кпк}} \right)^{-1} M_\odot / \text{пк}^3. \quad (5)$$

Сравнивая (1) и (2) с (5), получим ограничение на число звезд в H -скоплении, устойчивом в приливном поле Галактики. Поскольку нас интересуют наиболее населенные, а следовательно, наиболее плотные системы, то значения входящих в (1) и (2) величин мы примем минимальными. Величина полуоси тесной двойной системы практически ограничена значением $a \approx 6R_\odot(m/M_\odot)^{1/3}$ [3]. Поскольку мы принимаем массы всех звезд $m = 1M_\odot$, то значение $a = 6R_\odot$. Как было показано в [4], время распада тройных систем быстро возрастает с ростом отношения $k = a_{i+1}/a_i$ и при $k = 8$ становится практически бесконечным. Поэтому примем $k = 8$ и $e = 0,6$. Тогда получим в диапазоне галактоцентрических расстояний $2 \text{ кпк} \leq R \leq 30 \text{ кпк}$ значение максимального числа звезд в системах типа $(n+n)$:

$$N_{\text{max}}(n+n) = 9 \quad (6)$$

и в системах типа $(n+1)$:

$$N_{\text{max}}(n+1) = 512. \quad (7)$$

Для всех промежуточных типов упаковки значение N_{max} заключено между этими предельными величинами, не зависящими от возраста системы. Однако для систем с возрастом более 10^8 лет существует высокая вероятность встречи звездной системы с гигантскими молекулярными облаками [5]. Принимая среднюю плотность облака $\rho_{\text{ГМС}} \approx 30M_\odot/\text{пк}^3$ [6], получим максимальные значения населенности молодых H -скоплений: $N_{\text{max}}(n+n) = 256$ и $N_{\text{max}}(n+1) = 8$.

4. Время жизни С- и H-скоплений

Время жизни С-систем (τ_c) определяется процессом диссипации [7] и выражается через динамическое время системы и количество ее членов:

$$\tau_c \approx t_{\text{dyn}} \cdot \frac{6N}{\lg N}. \quad (8)$$

Для систем различной населенности это время приведено в табл. 1. Здесь важно, что с ростом N возрастает и время жизни τ_c .

Вместе с тем легко видеть, что время жизни H -скоплений типа $(n+n)$ определяется длительностью эволюции наиболее массивного его члена, поскольку потеря им значительной массы в конце жизни автоматически вызывает "цепную реакцию" распада всей системы. Поскольку распределение звезд по массе в широких парах описывается функцией Солпитера ($dn/dm \sim m^{-2,35}$), мы можем использовать ее для оценки массы наиболее массивного члена (m_{max}) системы из N звезд с массой наиболее легкого члена m_{min} :

$$m_{\text{max}} = 0,37N^{0,74} \left(\frac{m_{\text{min}}}{1M_\odot} \right)^{0,26} M_\odot. \quad (9)$$

А поскольку время жизни (t в годах) звезд солнечного химического состава на главной последовательности уменьшается с ростом их массы (m в единицах M_\odot) [8],

$$\lg t = \begin{cases} 10 - 3,6 \lg m + \lg^2 m & ; \quad 0,2 < m < 100, \\ 6,3 & ; \quad m \geq 100, \end{cases} \quad (10)$$

то очевидно, что даже в отсутствие внешних возмущений предельно плотное H -скопление может существовать тем дольше, чем менее оно населено: для $m_{\text{min}} = 0,2M_\odot$ и $N = 32$ из (9) и (10) получим $t = 3 \cdot 10^9$ лет, тогда как для $N = 256$ только $1,5 \cdot 10^7$ лет. Следовательно, H -скопления из десятков звезд могут встречаться в поле Галактики, тогда как аналогичные системы из сотен звезд, если и будут выявлены, то лишь в пределах наиболее молодых звездных группировок — ассоциаций и комплексов [9].

5. Возможность обнаружения H-скоплений

В астрономических публикациях неоднократно упоминалось об обнаружении кратных звезд, содержащих до 8—9 членов. Однако принадлежность всех наблюдаемых звезд к одной системе ни разу не была доказана астрометрически или спектроскопически. Поэтому пока можно с уверенностью говорить лишь о системах с $N = 6$. Из полученных выше соотношений легко оценить ожидаемые параметры максимально плотных H -систем (табл. 2). Как видим, ожидаемая дисперсия ско-

Таблица 2
Параметры иерархических систем

Тип упаковки	Число звезд	Диаметр (пк)	Дисперсия скоростей звезд (км/с)
(n+1)	8	0,04	1,0
(n+1)	9	0,3	0,4
(n+n)	256	0,3	2,0
(n+n)	512	2,3	1,0

ростей звезд в них вполне соответствует точности измерений современных корреляционных спектрометров, но наземные астрометрические методы применимы к ним только в пределах 100—200 пк от Солнца. В этом

смысле перспективными являются космические астрометрические инструменты, например "Ломоносов", обещающие существенное повышение точности измерений. С учетом наблюдаемой распространенности кратных звезд в Галактике и возможности инструментов ближайшего будущего вполне реальным выглядит обнаружение иерархических систем, содержащих до нескольких десятков членов [10]. Для звездной космогонии такая перспектива чрезвычайно привлекательна.

Автор благодарит за плодотворные дискуссии профессора Х. Циммермана (H.Zimmermann) из Обсерватории Йенского университета (Германия).

Литература

1. Сурдин В.Г., Ламзин С.А. Протозвезды. М., 1992.
2. King I.R. // Astron. J. 1962. 67. P. 471.

3. Тутуков А.В. // Письма в Астрон. журн. 1983. 9. С. 160.
4. Аносова Ж.П., Орлов В.В. // Тр. Астрон. обс. ЛГУ. 1985. 40. С. 66.
5. Сурдин В.Г. Рождение звезд. М., 1997.
6. Blitz L. Giant molecular clouds // Protostars and Planets. III. / Eds E.H.Levy, Lunine J.I. Tucson, 1993. P. 125.
7. Spitzer L. Dynamical evolution of globular clusters. Princeton, 1987.
8. Масевич А.Г., Тутуков А.В. Эволюция звезд. М., 1988.
9. Ефремов Ю.Н. Очаги звездообразования в галактиках. Звездные комплексы и спиральные рукава. М., 1989.
10. Сурдин В.Г. // Астрон. цирк. 1988. №1528. С. 17.

Поступила в редакцию
22.05.96