

Статистическая теория дискретного описания эволюции звездных систем

В.А. Захожай

Поступила в редакцию 15 октября 2008 г.

Аннотация. Предлагается концепция статистического описания развития звездных систем. Представлены алгоритмы для вычисления вероятностей ключевых событий, которые определяют эволюцию галактики. Обсуждаются результаты создания статистической теории дискретного описания развития звездных систем.

THE STATISTICAL THEORY OF THE DISCRETE DESCRIPTION OF EVOLUTION OF STAR SYSTEMS, by *V.A. Zakhozhay*.

1 Введение

Наблюдаемые статистические свойства звездных систем отражают разнообразие тех процессов, которые проходили в них в прошлом. Поэтому необходимо искать их объяснение в различных процессах, которые сопровождали эволюцию звездных систем.

При изучении развития звездных систем выделяют исследования (Марочник, Сучков, 1984):

- а) динамической эволюции;
- б) химической эволюции;
- в) истории звездообразования;
- г) эволюции звездного состава.

В этом перечне не конкретизированы:

- эволюция субзвездного состава (субзвезды открыты в молодых звездных системах и в популяции околосолнечного окружения);
- изменение статистических свойств параметров, которые характеризуют вышеперечисленные пункты а–г.

Настоящая работа посвящена поиску адекватного описания изменения статистических свойств звездных систем, которые эволюционируют по определенному сценарию с учетом наличия в них субзвезд и звезд, находящихся на различных стадиях развития.

2 Суть исследований

Предлагается решение задачи о разработке методики статистического описания формирования структурных обособленно-замкнутых звездных систем. В таких системах:

- 1) предполагается выполнение закона сохранения массы;
- 2) эволюция представляется в виде последовательной цепи сменяющихся ключевых событий.

Первый фактор дает возможность проведения нормировок в статистических алгоритмах, описывающих различные состояния звездных систем определенного возраста. Второй – пре-

дусматривает введение понятия “ключевого события” в эволюции звездных систем и их компонентов, которое наступает с определенной вероятностью. Такая постановка задачи была сформулирована автором (Захойай, 1996), когда был предложен метод представления эволюции ориентированным графом, где узлам были поставлены в соответствие долевые содержания звездных систем и их компонентов, находящихся на ключевых этапах развития. В ключе развития обсуждаемого метода была также решена задача о получении спектров масс джинсовских фрагментов, адекватно описывающих процессы фрагментации политропного шара, медленно вращающегося облака и области, попавшей в зону ударной волны (Захойай, 1995).

В целях развития данного направления исследований существует необходимость в построении алгоритмов, которые бы позволили вычислять долевые содержания ключевых событий, отражающих дискретный эволюционный процесс развития звездных систем. При формировании населений таких сложных звездных систем, как галактики, выделяются вероятности наступления следующих ключевых событий: выделение газовой среды, идущей на образование звездных систем более низкой иерархии; формирование скоплений, которые формируют центр, гало и поле галактики. Эволюция звездно-субзвездного состава в скоплениях описывается в приближении каскадной фрагментации с последующим образованием популяций субзвезд и звезд, находящихся на ключевых фазах эволюции: протозвезд, звезд главной последовательности, гигантов и звездных остатков. Газовая составляющая в таких эволюционирующих системах формируется из остатка вещества от первичной фрагментации, звездного ветра и оболочек, теряемых звездой на конечной стадии развития. Общую принципиальную схему развития звездных систем (галактик и звездных скоплений) отражают ориентированные графы, представленные в работе автора (Захойай, 1996), узлы которых определяют появление ключевых событий в истории Галактики с вероятностью x_{ξ} . Они образуют конечное множество вероятностей $x_{\xi} \in X$ ключевых событий, определяющих эволюцию Галактики:

a_{rs}^i — доля массы вещества, оставшаяся в межзвездной среде после образования скоплений звезд ($i = 0$) и ушедшая на образование последних ($i = 1$) соответственно;

v_{rs}^j — доля массы скоплений, устремившаяся к центру Галактики (из-за динамического звездного трения) ($j = 1$) и сохранившаяся в скоплениях звезд ($j = 2$) до конца r -фазы звездообразования Галактики;

g_{rsi}^{k1} — доля массы вещества, оставшаяся после образования звезд и субзвезд в ядре, поле и скоплениях Галактики ($k = 1 \div 4$);

$g_{rsi}^{k2}, g_{rsi}^{k3}$ — доли массы вещества, ушедшие на образование субзвезд и звезд соответственно (смысл k аналогичен предыдущей записи);

f_{rs}^k — доля массы вещества, принадлежащая ядру ($k = 1$), полю ($k = 2, 3$) и скоплениям ($k = 4$) Галактики;

$p_{rsi}^{k\lambda}$ — доля вещества, содержащаяся в звездах главной последовательности ($\lambda = 1$), гигантах ($\lambda = 2$), звездных остатках ($\lambda = 3$) нулевого возраста через время t ;

$w_{rsi}^{k\lambda}$ — доля вещества, теряемая объектами за счет звездного ветра ($\lambda = 1, 2$) и сверхветра + потери оболочек — $\lambda = 3$.

Согласно (Захойай, 1996), нижние индексы означают принадлежности: rs — к матрице, описывающей общий галактический эволюционный процесс; i — к i -му ярусу подграфа в вероятностях g, h, p, w .

Статистическое описание образования скоплений и населения поля Галактики

В общем случае вычисление вышеперечисленных вероятностей наступления ключевых событий, входящих в графы, возможно при наличии определенных связей и функций распределения. Исходя из двухуровневой фрагментации, когда вначале образуются скопления звезд с дальнейшей каскадной фрагментацией в протоскоплениях, первой является связь между массами протоскоплений M_J и звездно-субзвездных скоплений нулевого возраста M :

$$M_J = \xi(M). \quad (1)$$

При наличии такой связи и спектра масс протоскоплений $\phi(M_J)$ можно вычислить спектр масс звездно-субзвездных скоплений нулевого возраста:

$$\varphi(M) = \phi[\xi(M)] \left| \frac{d\xi(M)}{dM} \right|. \quad (2)$$

Долевые содержания вещества, оставшегося (α^0) в межзвездной среде после ее фрагментации, и вещества, ушедшего на образование звездных протоскоплений (α^1), очевидно, вычисляются из выражений:

$$\alpha^0 = \int_0^{M_{J0}} \phi(M_J) dM_J \bigg/ \int_0^{M_{J\infty}} \phi(M_J) dM_J, \quad (3)$$

$$\alpha^1 = 1 - \alpha^0, \quad (4)$$

где M_{J0} – минимальная масса фрагмента, образующаяся путем самогравитации, $M_{J\infty}$ – максимальная масса фрагмента, образующаяся в протоскоплении.

Здесь и далее нижние rs -индексы во всех вероятностях и i -индексы в вероятностях g , h , p , w опущены, чтобы не загромождать приводимые выражения.

Доли массы скоплений устремившиеся к центру Галактики (из-за динамического звездного трения) (v^1) и сохранившиеся в скоплениях звезд (v^2) на определенный момент времени t , при наличии спектра масс (2) могут быть вычислены из выражений:

$$v^1 = \int_{M_{tm}}^{M_{\infty}} \varphi(M) dM \bigg/ \int_{M_0}^{M_{\infty}} \varphi(M) dM, \quad (5)$$

$$v^2 = \int_{M_0}^{M_{tm}} \varphi(M) dM \bigg/ \int_{M_0}^{M_{\infty}} \varphi(M) dM, \quad (6)$$

где M_{tm} – минимальная масса скопления, которое за время t полностью утрачивает момент количества движения относительно центра Галактики за счет динамического трения.

Если M_{td} – масса звездных скоплений, рассеивающихся за время t , то доли массы вещества, принадлежащие в это время ядру (f^1), полю (f^2, f^3) и сохранившимся скоплениям (f^4) будут:

$$f^1 = f^4 = \frac{\int_{M_0}^{M_\infty} \varphi(M, t) dM}{\int_{M_0}^{M_\infty} \varphi(M, 0) dM}, \quad (7)$$

$$f^2 = f^3 = 1 - f^1 = 1 - f^4. \quad (8)$$

Статистическое описание образования каскадной фрагментации в протоскоплениях

На втором уровне фрагментации (стадии каскадной фрагментации) в протоскоплениях образуются протосубзвезды и протозвезды, долевые содержания которых обозначим g^2 и g^3 соответственно. Часть вещества (g^1) остается при фрагментации. Оставшаяся часть газа (g^4) идет на следующий этап звездообразования. Для вычисления перечисленных долевых содержаний в протоскоплении с массой M_J необходимо знать спектр масс протозвезд $\phi(m_J)$:

$$g^1 = \int_0^{m_0} \phi(m_J) dm_J \Big/ \int_0^{M_J} \phi(m_J) dm_J, \quad (9)$$

$$g^2 = \int_{m_0}^{m_1} \phi(m_J) dm_J \Big/ \int_0^{M_J} \phi(m_J) dm_J, \quad (10)$$

$$g^3 = \int_{m_1}^{m_\infty} \phi(m_J) dm_J \Big/ \int_0^{M_J} \phi(m_J) dm_J, \quad (11)$$

$$g^4 = \left[\int_0^{m_0} \phi(m_J) dm_J + \int_{m_\infty}^{M_J} \phi(m_J) dm_J \right] \Big/ \int_0^{M_J} \phi(m_J) dm_J, \quad (12)$$

где m_0 и m_1 – минимальная и максимальная масса образующихся субзвезд, m_∞ – максимальная масса образующихся звезд.

Наличие связи масс протозвезд m_J с начальными массами звезд и субзвезд m

$$m_J = \zeta(m) \quad (13)$$

дает возможность вычислить звездно-субзвездный спектр масс

$$n(m) = \phi[\zeta(m)] \left| \frac{d\zeta(m)}{dm} \right|, \quad (14)$$

с помощью которого определяются долевые содержания субзвезд (p^1), звезд нулевого возраста (p^i , $i = 2-5$), которые принадлежат различным начальным интервалам масс, и доли вещества (w^i , $I = 1-5$), теряемые протосубзвездами и протозвездами до выхода на главную последовательность:

$$p^1 = \int_{m_{10}}^{m_{11}} n(m)dm \Big/ \int_{m_{00}}^{m_{01}} \phi(m_J)dm_J, \quad (15)$$

$$p^2 = \int_{m_{21}}^{m_{22}} n(m)dm \Big/ \int_{m_{01}}^{m_{02}} \phi(m_J)dm_J, \quad (16)$$

$$p^3 = \int_{m_{22}}^{m_{23}} n(m)dm \Big/ \int_{m_{02}}^{m_{03}} \phi(m_J)dm_J, \quad (17)$$

$$p^4 = \int_{m_{23}}^{m_{24}} n(m)dm \Big/ \int_{m_{03}}^{m_{04}} \phi(m_J)dm_J, \quad (18)$$

$$p^5 = \int_{m_{24}}^{m_{25}} n(m)dm \Big/ \int_{m_{04}}^{m_{05}} \phi(m_J)dm_J, \quad (19)$$

$$w^1 = 1 - p^1, \quad (20)$$

$$w^2 = 1 - p^2, \quad (21)$$

$$w^3 = 1 - p^3, \quad (22)$$

$$w^4 = 1 - p^4, \quad (23)$$

$$w^5 = 1 - p^5, \quad (24)$$

где $m_{h\lambda}$ и $m_{0\lambda}$ (для $h, \lambda = 1 \div 5$) – соответствуют начальным граничным значениям масс интервалов, в пределах которых находятся звезды на ключевых стадиях эволюции.

Согласно данным численного моделирования (Адамс, Лафлин, 1997; Хегер и др., 2003) и их анализу, проведенному в работах (Захожай, 2002, 2007), в пределах этих значений $m_{h\lambda}$ и $m_{0\lambda}$ изменяются массы субзвезд и звезд – $\mu_{h\lambda}$ ($m \in \mu$), находящиеся на ключевых стадиях эволюции, что отражает структурная схема космических объектов, представленная на рис. 1.

Переход от одной стадии эволюции космических тел к последующей сопровождается потерей определенной массы: кокона (при переходе от протозвезд к главной последовательности), вещества, уносимого звездным ветром (на стадиях главной последовательности и гигантов), внешней оболочки (при переходе от стадии гиганта к звездным остаткам) или полному разрушению звезды, если звезда не имеет звездного остатка (звезды с начальными массами более $100 M_{\odot}$). Будем характеризовать темп потери массы звездой средней скоростью, которая зависит от массы космического тела нулевого возраста $\bar{K}_{h\lambda} = \bar{K}_{h\lambda}(m)$, где $h = 3, 5$; $\lambda = 1, 2$. Тогда масса космического тела через время τ будет следующей:

$$\mu_{h\lambda\tau} = \mu_{h\lambda} - \bar{K}_{h\lambda}\tau. \tag{25}$$

Зная время жизни звезды на каждой ключевой стадии эволюции, представляется возможным связать все граничные массы ключевых фаз между собой. Эта же связь и преобразования типа (2) и (14) позволяют связать спектры масс звезд, находящихся на стадиях протозвезд и главной последовательности, со спектрами масс гигантов нулевого возраста и звездных остатков. Перечисленные функции распределения позволяют вычислить долевые содержания звезд, находящихся на всех ключевых эволюционных стадиях в звездных системах.

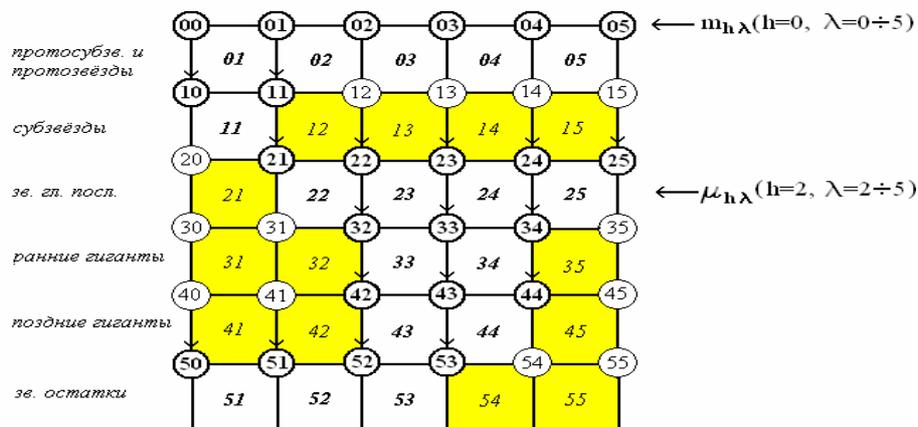


Рис. 1. Структурная схема космических объектов, образующихся путем самогравитации. В кружках показаны границы масс нулевого возраста выделенных типов космических тел; стрелочками – их “переход”, когда космическое тело переходит с одной ключевой фазы к последующей. Индексы, представляющие выделенные типы космических тел, показаны в центре квадратов. Заштрихованные квадраты и блеклые индексы в центре кружков – отсутствующие цепи эволюции космических тел и их значения интервалов масс согласно (Адамс, Лафлин, 1997; Хегер и др., 2003) соответственно

Результаты исследований и выводы

В данной работе завершена разработка концепции статистической теории дискретного описания развития звездных систем графами, узлам которых поставлены в соответствие долевые содержания звездных систем и их компонентов, находящихся на ключевых этапах развития (Захожай, 1996). Полученные алгоритмы для вычисления долевых содержаний вещества, которое идет на формирование различных популяций галактики, очерчивают определенный круг необходимых функций распределения по массе.

В рамках развития предложенной концепции ранее

- выполнены расчеты теоретических спектров масс джинсовских сгустков с учетом физического состояния фрагментирующей системы (Захожай, 1995);
- выполнены теоретические расчеты спектра масс компонентов звездной системы в зависимости от ее возраста с учетом диссипации звезд и субзвезд и звездной эволюции (Захожай, 2001);
- получены обобщенные статистические модели эволюционирующих субзвезд (Писаренко и др., 2007) и звезд различного элементного состава и связи для физических параметров эволюционирующих звезд на основании теоретических моделей и

статистических соотношений, базирующихся на наблюдательных данных (Захожай, 2007);

- получен звездно-субзвездный спектр масс нулевого возраста для популяций населения околосолнечного окружения и диска Галактики (Захожай, 2008).

Полученные результаты составляют необходимую базу для изучения эволюции звездных систем статистическими методами и анализа их современного состояния.

Литература

- Захожай В.А. // Радиофиз. и радиоастрон. 2001. Т. 6. №. 2. С. 97.
- Захожай В.А. // Вісн. астрон. школи 2002. Т. 3. №. 2. С. 81.
- Захожай В.А. // Дис. докт. физ.-мат. наук. Статистические закономерности в звездных системах. Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина. 2007.
- Марочник Л.С. Сучков А.А. // Галактика. М.: Наука. 1984.
- Писаренко А.И., Яценко А.А., Захожай В.А. // Астрон. журн. 2007. Т. 84. №. 8. С. 675.
- Адамс, Лафлин (Adams F.C., Laughlin Gr.) // Rev. Mod. Phys. 1997. V. 69. №. 2. P. 337.
- Хегер и др. (Heger A., Fryuer C.L., Woosley S.E., et al.) // Astrophys. J. 2003. V. 591. Iss.1. P. 288.
- Захожай (Zakhozhaj V.A.) // Astron. Astrophys. Transact. 1995. V. 6. P. 221.
- Захожай (Zakhozhaj V.A.) // Astron. Astrophys. Transact. 1996. V. 10. P. 321.
- Захожай (Zakhozhay V.A.) // Astrophys. Space Sci. 2008. V. 315. №. 1–4. P. 13–19.